
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΜΗΤΡΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ**

Νάννος Ιωάννης

Πατσιούρα Ευαγγελία Ραφαηλία

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

ΒΟΛΟΣ 2025



© 2025 Νάννος Ιωάννης, Πατσιούρα Ευαγγελία Ραφαηλία

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 (Επιβλέπων): Κούτας Λάμπρος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής (Συνεπιβλέπων): Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Παπαθεοχάρης Θεοχάρης, Εντεταλμένος Διδάσκων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους καθηγητές Κούτα Λάμπρο και Παπακωνσταντίνου Χρήστο, για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, ευχαριστούμε την Ιωάννα Σκυριανού, υποψήφια διδάκτορα του τμήματος, για την άψογη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Τέλος, ευχαριστίες οφείλουμε στο προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατασκευών Ο.Σ. για τη βοήθεια και τη συνεργασία κατά την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών.

Νάννος Ιωάννης

Πατσιούρα Ευαγγελία Ραφαηλία

ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΜΗΤΡΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ

Νάννος Ιωάννης

Πατσιούρα Ευαγγελία Ραφαηλία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Κούτας Λάμπρος

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της καμπτικής ενίσχυσης δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (Ο.Σ.), με τη χρήση μίας νέας γενιάς σύνθετων υλικών, γνωστά ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) ή Textile Reinforced Mortars (TRM). Στόχος ήταν η διερεύνηση ενός νέου κονιάματος γεωπολυμερούς, του οποίου η σύσταση αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για χρήση σε ενισχύσεις. Το κονίαμα αυτό συγκρίθηκε με ένα τσιμεντοειδές κονίαμα εμπορικά διαθέσιμο. Αρχικά, πραγματοποιείται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στα IAM και στην καμπτική ενίσχυση δοκών με αυτά. Έπειτα παρουσιάζεται αναλυτικά ολόκληρη η πειραματική διαδικασία, από την κατασκευή των δοκιμών μέχρι την διεξαγωγή των πειραμάτων κάμψης τεσσάρων σημείων. Τέλος, τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται και αναλύονται σε όρους φορτίου αστοχίας, δυσκαμψίας και συντελεστή αποδοτικότητας σύνθετου υλικού, δίνοντας έμφαση στην αποδοτικότητα της γεωπολυμερούς μήτρας. Παράμετροι προς διερεύνηση αποτέλεσαν το είδος του κονιάματος και ο αριθμός στρώσεων πλέγματος άνθρακα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για το νέο κονίαμα γεωπολυμερούς δείχνουν ότι είναι ένα υποσχόμενο νέο υλικό στο πεδίο των ενισχύσεων.

Λέξεις Κλειδιά: Οπλισμένο σκυρόδεμα, ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, καμπτική ενίσχυση, γεωπολυμερή.

FLEXURAL STRENGTHENING OF RC BEAMS WITH CARBON FIBER-REINFORCED GEOPOLYMER MATRIX

Abstract

This thesis focuses on the flexural strengthening of reinforced concrete (RC) beams using a new generation of composite materials known as Textile Reinforced Mortars (TRM). The main objective was to investigate a novel geopolymer-based mortar developed at the Laboratory of Reinforced Concrete Technology and Construction of the University of Thessaly, for structural strengthening applications. This new mortar was compared to a commercially available cement-based mortar. The study begins with a brief literature review on TRM systems and their application in flexural strengthening of RC beams. This is followed by a detailed description of the experimental procedure, from specimen preparation to the execution of four-point bending tests. Experimental results are then presented and analyzed in terms of failure load, stiffness, and composite material efficiency index, with emphasis on the performance of the geopolymer matrix. Key parameters investigated include the type of mortar and the number of carbon textile layers used. The findings for the new geopolymer mortar were promising for structural strengthening applications.

Keywords: *reinforced concrete, textile reinforced mortar, flexural strengthening, geopolymer.*

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Κατάλογος Πινάκων.....	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	14
1.1 Η ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών Ο.Σ.....	14
1.1.1 Ενίσχυση δοκών Ο.Σ.	15
1.2 Προηγμένα σύνθετα υλικά στις ενισχύσεις κατασκευών Ο.Σ.....	15
1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας	16
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	18
2.1 Εισαγωγή – Περιγραφή του υλικού.....	18
2.1.1 Ίνες	18
2.1.2 Ινοπλέγματα.....	20
2.1.3 Ανόργανη μήτρα	22
2.2 Μηχανικές ιδιότητες ΙΑΜ	22
2.3 Ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ. με ΙΑΜ	26
2.3.1 Μορφές αστοχίας δοκών Ο.Σ. ενισχυμένων σε κάμψη με ΙΑΜ.....	27
2.3.2 Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα καμπτικής ενίσχυσης δοκών Ο.Σ. με ΙΑΜ	28
2.4 Τα γεωπολυμερή στο πεδίο των ενισχύσεων κατασκευών	33
2.4.1 Λίγα λόγια για τα γεωπολυμερή	33
2.4.2 Καμπτική ενίσχυση δοκών με γεωπολυμερή	34
2.5 Σύνοψη της βιβλιογραφίας- ερευνητικά κενά	37
Κεφάλαιο 3 : Πειραματικό πρόγραμμα.....	37
3.1 Εισαγωγή.....	37
3.2 Δοκίμια.....	38
3.2.1 Γεωμετρία και οπλισμός δοκιμών	38

3.2.2 Περιγραφή δοκιμών- παράμετροι διερεύνησης.....	39
3.3 Υλικά.....	40
3.3.1 Σκυρόδεμα	40
3.3.2 Κονίαμα ενίσχυσης.....	41
3.3.3 Ινόπλεγμα	43
3.3.4 Χάλυβας	44
3.4 Προετοιμασία δοκιμών	44
3.4.1 Σκυροδέτηση.....	45
3.4.2 Ενίσχυση δοκών	46
3.5 Πειραματική διάταξη	50
3.6 Στατικό σύστημα.....	52
Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση	54
4.1 Εισαγωγή.....	54
4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	54
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων για κάθε δοκό.....	55
4.3.1 Δοκός REF.....	55
4.3.2 Δοκός T_1.....	56
4.3.3 Δοκός T_3.....	58
4.3.4 Δοκός Γ_1	60
4.3.5 Δοκός Γ_3	62
4.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων- Σχολιασμός	64
4.5 Σχολιασμός και σύγκριση των δυσκαμψιών	72
4.5.1 Δυσκαμψία δοκού T_1	74
4.5.2 Δυσκαμψία δοκού T_3	75
4.5.3 Δυσκαμψία δοκού Γ_1.....	75
4.5.4 Δυσκαμψία δοκού Γ_3.....	75



4.6 Ανάλυση διατομής	76
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	85
5.1 Συμπεράσματα.....	85
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	87
Βιβλιογραφία	88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Διάβρωση οπλισμού (Κουρνέτας 2010)	14
Σχήμα 2.1 Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα (Τριανταφύλλου 2004).....	19
Σχήμα 2.2 Ινοπλέγματα (α) Άνθρακα, (β) Υάλου, (γ) Βασάλτη, (δ)PBO, (ε) Χάλυβα...21	
Σχήμα 2.3 Τομή κλώνου νήματος ινών χωρίς εμποτισμό (αριστερά) και με εμποτισμό (δεξιά) (Τριανταφύλλου 2016).....	21
Σχήμα 2.4 Τυπική απόκριση IAM σε εφελκυσμό (De Santis κ.α. 2017).....	24
Σχήμα 2.5 (α) Single lap and (β) Double lap διατμητικές δοκιμές για τη μελέτη της συνάφειας IAM και σκυροδέματος (Κούτας κ.α. 2019).....	25
Σχήμα 2.6 Μορφές αστοχίας δοκού Ο.Σ. ενισχυμένη με IAM (Koutas et al. 2019).....	27
Σχήμα 2.7 Σημεία τοποθέτησης την ενίσχυσης (Liu and Yang 2022).....	36
Σχήμα 3.1 Γεωμετρία δοκού και διαστάσεις διατομής.....	38
Σχήμα 3.2 Οπλισμοί δοκού σε πλάγια όψη και τομή και διαστάσεις σε εκατοστά.....	39
Σχήμα 3.3 Πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού (α) θλιπτικής και (β) εφελκυστικής αντοχής κυλίνδρου,(γ) θλιπτικής αντοχής κύβου.....	40
Σχήμα 3.4 Πρίσματα για τον προσδιορισμό μηχανικών χαρακτηριστικών τσιμεντοειδούς κονιάματος.....	41
Σχήμα 3.5 Δοκιμές προσδιορισμού (α) θλιπτικής και (β) εφελκυστικής αντοχής κονιάματος.....	42
Σχήμα 3.6 Ινόπλεγμα άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές.....	43
Σχήμα 3.7 Κλωβοί οπλισμού πριν την τοποθέτηση στους ξυλότυπους.....	44
Σχήμα 3.8 Καλούπια δοκιμίων.....	44
Σχήμα 3.9 Δοκίμια κατά τη σκυροδέτηση.....	45
Σχήμα 3.10 Μήτρες για τη λήψη δοκιμίων σκυροδέματος.....	46
Σχήμα 3.11 Επιφάνεια δοκιμίου (α) πριν την εκτράχυνση (β) μετά την εκτράχυνση...47	
Σχήμα 3.12 Ανάδευση κονιαμάτων.....	47
Σχήμα 3.13 Εφαρμογή κονιάματος με τη βοήθεια οδηγών (α) δοκός πριν την εφαρμογή κονιάματος (β) δοκός κατά την εφαρμογή κονιάματος.....	48

Σχήμα 3.14 Διαδικασία ενίσχυσης, (α) εφαρμογή πρώτης στρώσης κονιάματος, (β) εμφάνιση του ινοπλέγματος στο κονίαμα, (γ), (δ) δοκοί μετά το πέρας της ενίσχυσης.....	49
Σχήμα 3.15 Σκαρίφημα με αποστάσεις εφαρμογής φορτίων και πειραματική διάταξη (διαστάσεις σε εκατοστά).....	50
Σχήμα 3.16 Διάταξη πειράματος.....	51
Σχήμα 3.17 Όργανα καταγραφής δοκιμών.....	51
Σχήμα 3.18 Στατικό σύστημα.....	52
Σχήμα 3.19 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών.....	53
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης για δοκό αναφοράς.....	55
Σχήμα 4.2 (α) Αρχική κατάσταση δοκού REF, (β) Ρηγμάτωση πριν την αστοχία (γ), (δ) Αστοχία δοκού.....	56
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσο για δοκό T_1.....	57
Σχήμα 4.4 (α) Αρχική κατάσταση δοκού T_1 (β), (γ), (δ) Αστοχία δοκού.....	57
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσο για δοκό T_3.....	59
Σχήμα 4.6 (α) Αρχική κατάσταση δοκού T_3 (β), (γ), (δ) Αστοχία δοκού.....	59
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσο για δοκό Γ_1.....	61
Σχήμα 4.8 (α) Αρχική κατάσταση δοκού Γ_1, (β), (γ), (δ) Αστοχία δοκού.....	61
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για δοκό Γ_3.....	62
Σχήμα 4.10 (α) Αρχική κατάσταση δοκού Γ_3, (β) Ρηγματώσεις δοκού πριν την αστοχία, (γ), (δ) Αστοχία δοκού.....	63
Σχήμα 4.11 Συνολικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο των δοκιμών.....	64
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς Γ_1, T_1, REF και φορτία αστοχίας.....	66
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς Γ_3, T_3, REF και φορτία αστοχίας.....	67
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς Γ_1, Γ_3, REF και φορτία αστοχίας.....	69
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς T_1, T_3, REF και φορτία αστοχίας.....	71
Σχήμα 4.16 Στάδια δυσκαμψίας σε 3-γραμμικό διάγραμμα φορτίου βύθισης.....	73

Σχήμα 4.17 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας στο στάδιο Ι.....	73
Σχήμα 4.18 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας στο στάδιο ΙΙ.....	74
Σχήμα 4.19 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας στο στάδιο ΙΙΙ.....	74
Σχήμα 4.20 Λεπτομέρειες διατομής δοκού, κατανομή παραμορφώσεων, εσωτερικές δυνάμεις στη δοκό αναφοράς.....	78
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα ροής των πράξεων για τον υπολογισμό της ενεργού τάσης στη δοκό αναφοράς.....	78
Σχήμα 4.22 Λεπτομέρειες διατομής δοκού, κατανομή παραμορφώσεων, εσωτερικές δυνάμεις στις ενισχυμένες δοκούς.....	80
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα ροής των πράξεων για τον υπολογισμό της ενεργού τάσης στις ενισχυμένες δοκούς.....	81
Σχήμα 4.24 Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης, ενεργού τάσης, συντ/στη αποδοτικότητας.....	82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Τριανταφύλλου 2004).....	20
Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά υπό εξέταση δοκών (Liu and Yan 2022).....	36
Πίνακας 3.1 Ονοματολογία δοκιμίων και χαρακτηριστικά ενίσχυσης.....	39
Πίνακας 3.2 Ιδιότητες σκυροδέματος.....	40
Πίνακας 3.3 Αντοχή τσιμεντοειδούς κονιάματος.....	42
Πίνακας 3.4 Αντοχή γεωπολυμερούς κονιάματος.....	42
Πίνακας 3.5 Ιδιότητες ινοπλέγματος άνθρακα.....	43
Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....	54
Πίνακας 4.2 Τιμές της δυσκαμψίας σε κάθε στάδιο.....	72
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης διατομής.....	82

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Η ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών Ο.Σ.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών ολοένα και αυξάνεται. Κύρια μέριμνα των μηχανικών αποτελεί η προστασία της ανθρώπινης ζωής, η λειτουργικότητα μιας κατασκευής στην πάροδο του χρόνου και ο παράγοντας του κόστους. Η παλαιότητα των κτιρίων και κατ' επέκταση η μη συμμόρφωση τους με τους ισχύοντες κατασκευαστικούς κανόνες, τα θέτει σε κίνδυνο σε περίπτωση καταστροφών όπως πυρκαγιές και κυρίως σεισμούς, οι οποίοι αποτελούν μείζον πρόβλημα για την Ελλάδα και μεγάλο πεδίο μελέτης για επιστήμονες και μηχανικούς. Άλλους επιτακτικούς λόγους ενίσχυσης αποτελούν η φθορά των δομικών υλικών που παρέρχεται με την πάροδο του χρόνου, όπως η διάβρωση του οπλισμού (Σχ. 1.1), τα δυσμενή φορτία που υπόκεινται η κατασκευή καθώς και η αλλαγή των φορτίων σχεδιασμού είτε λόγω της χρήσης του κτιρίου για διαφορετικό σκοπό είτε λόγω στατικής ανεπάρκειας. Σε σύγκριση με την ανέγερση νέων κτηριακών δομών, η ενίσχυση και ανακαίνιση υφιστάμενων σε όποιες περιπτώσεις καθίσταται εφικτό, αποτελεί συμφέρουσα επιλογή από άποψη χρόνου, κόστους και σπατάλης πρώτων υλών, προωθώντας ταυτόχρονα την βιώσιμη ανάπτυξη και την κυκλική οικονομία στον κατασκευαστικό τομέα (Yan et al. ,2025).



Σχήμα 1.1 Διάβρωση οπλισμού (Κουρνέτας 2010)

1.1.1 Ενίσχυση δοκών Ο.Σ.

Οι δοκοί σε μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος έχουν πρωταρχικό ρόλο στη λειτουργία του στατικού συστήματος του κτιρίου, αποτελώντας βασικά στοιχεία για την στήριξη και την διανομή δυνάμεων. Συνεπώς είναι παραπάνω επιρρεπής σε φθορές διαφόρων αιτιών όπως, μηχανικών καταπονήσεων, διάβρωσης του οπλισμού κ.α., καθιστώντας την ενίσχυση τους απαραίτητη για την ακέραια στατική λειτουργία των κατασκευών και την εξασφάλιση μεγαλύτερης διάρκειας ζωής και ασφάλειας.

1.2 Προηγμένα σύνθετα υλικά στις ενισχύσεις κατασκευών Ο.Σ.

Ένα σύνθετο υλικό τυπικά αποτελείται από ένα σύστημα δύο ή και παραπάνω υλικών, τα οποία είναι αναμιγμένα και συγκολλημένα. Σε μακροσκοπική κλίμακα, παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού αποτελεί το σκυρόδεμα (ανάμιξη τσιμέντου, άμμου, αδρανών). Σε μικροσκοπική κλίμακα, από υλικά όπως τα μέταλλα προκύπτουν τα κράματα και από πλαστικά προκύπτουν τα πολυμερή (Nagavally, 2016).

Τα σύνθετα υλικά προκύπτουν από τον συνδυασμό ινών οπλισμού με υψηλές μηχανικές ιδιότητες π.χ. (άνθρακα, γιालού, αραμιδίου) σε μήτρα οργανικής αλλά και ανόργανης φύσεως, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται πρόσφυση στην υπό ενίσχυση δομική επιφάνεια και μεταφέρονται τα φορτία στις ίνες. Μέσω της χρήσης τους επιτυγχάνεται αποτελεσματική αποκατάσταση των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων σε όλο τον τομέα των κατασκευών.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ, FRP) έχουν κερδίσει σημαντική αναγνώριση μετά την εφαρμογή τους σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Έχουν ευρεία χρήση ως εξωτερική ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ. σε υφιστάμενες κατασκευές λόγω των ευνοϊκών ιδιοτήτων τους. Τα συστήματα ΙΟΠ ανθρακονημάτων και οργανικής εποξειδικής μήτρας έχουν αναγνωριστεί σε παγκόσμιο επίπεδο με την ύπαρξη συγκεκριμένων κανονισμών σχεδιασμού.

Πάραυτα, τα συστήματα ΙΟΠ έχουν εμφανίσει μειονεκτήματα, κυρίως λόγω της εποξειδικής μήτρας τους, που δεν θα μπορούσαν να παραλειφθούν (Koutas et al., 2019). Συγκεκριμένα, τα βασικότερα από αυτά αποτελούν το υψηλό κόστος, η ασυμβατότητα με το υλικό του υποστρώματος, η αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες και χαμηλές θερμοκρασίες, η μέτρια αντοχή της εποξειδικής μήτρας σε

συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πυρκαγιάς, η αδιαπερατότητα τους, καθώς και η δυσκολία εύρεσης ειδικευμένου προσωπικού (Koutas and Papakonstantinou, 2021).

Διερευνώντας λύσεις στην αντιμετώπιση των παραπάνω μειονεκτικών παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται με την χρήση εποξειδικών ρητινών, θεωρήθηκε ορθή η αντικατάστασή τους με ανόργανες μήτρες, μια εναλλακτική και βιώσιμη επιλογή, αποτελούμενες κυρίως από τσιμεντοειδή αλλά και άλλου είδους κονιάματα όπως τα κονιάματα γεωπολυμερούς. Παρ' όλα αυτά, στους συνεχής μανδύες που χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις συστημάτων ΙΟΠ, η διείσδυση και ο πλήρης εμποτισμός τους από την ανόργανη, συνήθως τσιμεντοειδή μήτρα, δεν είναι δυνατή λόγω του μεγέθους των κόκκων του κονιάματος. Ακόμα και ένα λεπτόκοκκο κονίαμα δεν καταφέρνει να διαπεράσει και να εμποτίσει το ύφασμα όπως οι εποξεικές ρητίνες (Koutas et al. 2019). Λύση στο πρόβλημα ήρθε να δώσει η χρήση πλεγμάτων ινών, τα οποία αποτελούνται από ευθύγραμμους κλώνους ινών διατεταγμένους σε δύο διευθύνσεις, με κενά ενδιάμεσα τους (βροχίδες). Η ύπαρξη των βροχίδων επιτρέπει την διείσδυση και τον εμποτισμό των ινοπλεγμάτων εντός της μήτρας και την ανάπτυξη μηχανικής εμπλοκής μεταξύ του ινοπλέγματος και της μήτρας. Τα υλικά αυτά ονομάζονται Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) ή Textile Reinforced Mortar (TRM) όπως αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι ίνες οι οποίες συνθέτουν τους κλώνους των ινοπλεγμάτων είναι συνήθως ίνες άνθρακα, PBO, γυαλιού, βασάλτη και χαλύβδινων συρμάτων.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η καμπτική συμπεριφορά δοκών οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με ινοπλισμένα πολυμερή σε ανόργανη μήτρα. Αναλυτικότερα, κατασκευάστηκαν πέντε δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος διαστάσεων 1600x120x200 mm. Για την ενίσχυση των δύο δοκών χρησιμοποιήθηκαν ινοπλέγματα ινών άνθρακα με τσιμεντοειδές κονίαμα, ενώ για τις άλλες δύο ινοπλέγματα ινών άνθρακα με κονίαμα γεωπολυμερούς. Στην πέμπτη δοκό δεν εφαρμόστηκε κάποια ενίσχυση και χρησιμοποιήθηκε ως δοκός αναφοράς. Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Παράμετροι που τέθηκαν υπό

διερεύνηση ήταν ο αριθμός των στρώσεων της ενίσχυσης καθώς και το είδος του κονιάματος. Με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν και ύστερα από περαιτέρω επεξεργασία τους, ακολούθησε η σύγκριση των παραμέτρων και εξήχθησαν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία τους.

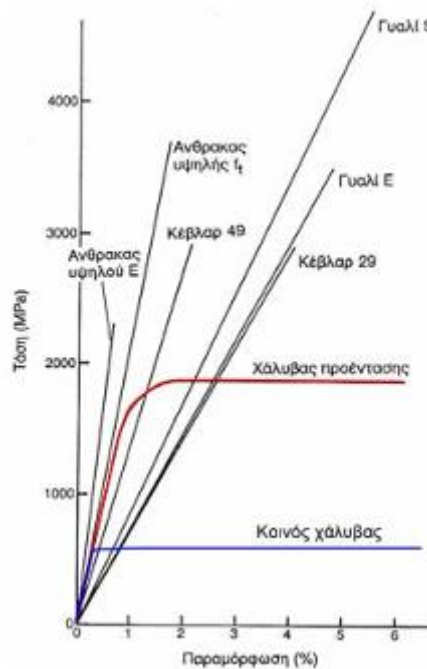
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή – Περιγραφή του υλικού

Η ιστορία των ΙΑΜ, δηλαδή του συνδυασμού ινών με ανόργανες μήτρες, ξεκίνησε το γύρω στο 1980, ενώ οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν στη Γερμανία τη δεκαετία του 1990 (Triantafillou, 2016). Το υλικό που προέκυψε αποτελείται από υφάσματα ινών, τουλάχιστον δύο διευθύνσεων, εμποτισμένο σε ανόργανη μήτρα, τσιμεντοειδή και όχι μόνο. Η επιτυχημένη χρήση του υλικού αυτού στην ανέγερση και κυρίως στην ενίσχυση κατασκευών Ο.Σ. εμφανίζεται στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Η ανάπτυξη του συνδέεται με τις αδυναμίες που παρουσιάζουν οι εποξεικές ρητίνες των ΙΟΠ ενώ τα αποτελέσματα της χρήσης του σε ενισχύσεις δείχνουν ότι πρόκειται για ένα πολλά υποσχόμενο υλικό (Koutas et al., 2019). Αξίζει να σημειωθεί πως παρά των πολλών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί, τα πειραματικά δεδομένα θεωρούνται ακόμα ελλιπή κάτι που φαίνεται επίσης από την έλλειψη κωδίκων σχεδιασμού.

2.1.1 Ίνες

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά έχουν πρωτεύων ρόλο στη διαμόρφωση των τελικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου συστήματος (Prashanth et al., 2017). Στα σύνθετα υλικά, οι ίνες με διάμετρο 5-25μm, έχουν τον ρόλο ανάληψης δυνάμεων παράλληλα στη διεύθυνση τους (κατά κανόνα εφελκυστικών). Βασικό τους γνώρισμα αποτελεί η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή τους και η γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι το σημείο της θραύσης. Στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η γραμμική ελαστική συμπεριφορά των ινών μέχρι τη θραύση, η ψαθυρή τους αστοχία σε αντίθεση με τον απλό χάλυβα και τον χάλυβα προέντασης που παρουσιάζουν διγραμμική συμπεριφορά και αυξημένη πλαστιμότητα.



Σχήμα 2.1 Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα (Τριανταφύλλου, 2004)

Οι βασικότερες ίνες που συναντώνται στις ενισχύσεις είναι ίνες άνθρακα, υάλου και αραμιδίου. Σύμφωνα με τον Τριανταφύλλου (2004), οι ίνες άνθρακα (πυκνότητα $1800-1900 \text{ kg/m}^3$) προέρχονται από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) ή απόσταξη καρβούνου (pitch). Οι ίνες άνθρακα φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας από τα άλλα δύο υλικά. Οι ίνες υάλου (πυκνότητα $2300-2500 \text{ kg/m}^3$) παρασκευάζονται από λιωμένο γυαλί και έχουν μικρότερο κόστος από τις ίνες άνθρακα και αραμιδίου. Οι ίνες αραμιδίου (πυκνότητα 1450 kg/m^3) διακρίνονται ανάλογα με την προέλευση τους είτε από αρωματικό πολυαμίδιο (Kevlar, Twaron) είτε αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora). Λόγω της καλής τους συμπεριφοράς σε κρουστικά φορτία συναντώνται σε κατασκευές όπως υποστηλώματα γεφυρών όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης οχημάτων, ως μανδύες. Στον Πίνακα 2.1, συνοψίζονται κάποιες βασικές τους ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας, η εφελκυστική αντοχή και η οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας.

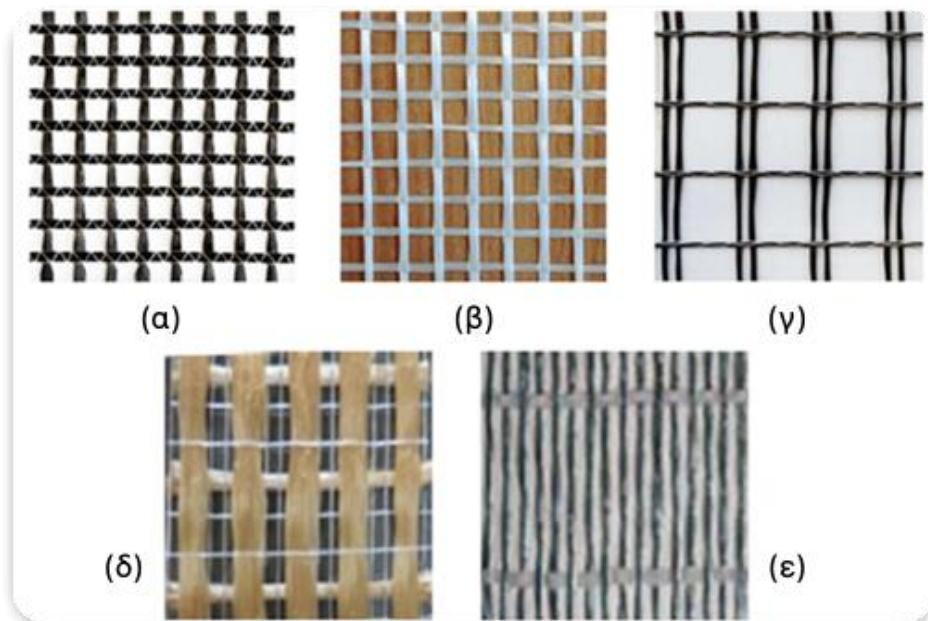
Πίνακας 2.1 Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Τριανταφύλλου, 2004)

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (kN/mm ²)	Εφελκυστική αντοχή (N/mm ²)	Οριακή παραμόρφωση εφελκ. αστοχίας (%)
Άθρακας			
Υψηλής αντοχής	215–235	3500–4800	1.4–2.0
Υπέρ-υψηλής αντοχής	215–235	3500–6000	1.5–2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικ.	350–500	2500–3100	0.5–0.9
Υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικ.	500–700	2100–2400	0.2–0.4
Γυαλί			
E	70–75	1900–3000	3.0–4.5
Z	70–75	1900–3000	3.0–4.5
S	85–90	3500–4800	4.5–5.5
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου ελαστικ. (Kevlar 29)	70–80	3500–4100	4.3–5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικ. (Kevlar 49, Twaron)	115–130	3500–4000	2.5–3.5

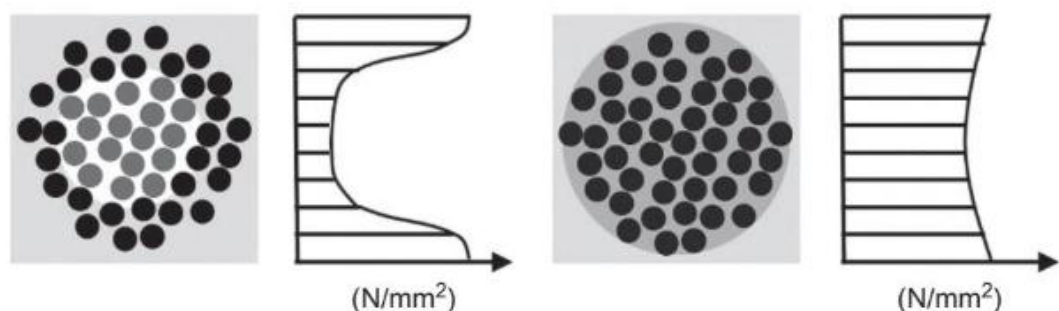
2.1.2 Ινοπλέγματα

Τα ινοπλέγματα διαδραματίζουν το ρόλο του οπλισμού σε ένα σύστημα ΙΑΜ και αποτελούνται από κλώνους ινών, δύο ή και παραπάνω διευθύνσεων, σχηματίζοντας βροχίδες. Η διάταξη των κλώνων για πλέγματα δύο διευθύνσεων μπορεί να είναι κάθετη ($0^\circ/90^\circ$) ή χιαστί ($45^\circ/-45^\circ$), ενώ για πλέγματα τεσσάρων διευθύνσεων ένας συνδυασμός των δύο. Οι βροχίδες διευκολύνουν τη διεύθυνση της ανόργανης μήτρας στο πλέγμα, εξασφαλίζοντας την ανάπτυξη μηχανικής εμπλοκής μεταξύ των υλικών. Ένα τυπικό πλέγμα, ανάλογα από το υλικό που προέρχεται, ζυγίζει από 150-600 g/m², ενώ το μέγεθος του κυμαίνεται από 8 μέχρι 30 mm (Koutas et al., 2019). Τα συνηθέστερα πλέγματα που χρησιμοποιούνται στα ΙΑΜ προέρχονται από ίνες υάλου, άνθρακα, αραμιδίου, βασάλτη, PBO και χάλυβα, ενώ στο Σχήμα 2.2 παρατίθενται εικόνες ινοπλεγμάτων των εν λόγω υλικών. Για την επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες όπως οι επιθυμητές ιδιότητες, το κόστος, αντοχή σε διάφορα φθοροποιά περιβάλλοντα (Triantafyllou, 2016). Σε κάποιες περιπτώσεις πραγματοποιείται προ εμποτισμός των πλεγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση της εσωτερικής δομής τους και προσδίδεται γεωμετρική σταθερότητα, με αποτέλεσμα να διατηρείται η ευθυγραμμία των κλώνων σταθερή κατά τη διάρκεια του εμποτισμού του ινοπλέγματος με το κονίαμα (Μπουρνάς, 2008). Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η διανομή της τάσης μεταξύ των νημάτων ινών σε μία τομή του κλώνου. Χωρίς τον εμποτισμό,

το κονίαμα εισχωρεί μόνο στα σημεία με τα οποία έρχεται σε άμεση επαφή. Με τον εμποτισμό το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των νημάτων. Μειονέκτημα του εμποτισμού των πλεγμάτων αποτελεί η ακαμψία που αποκτούν, κάνοντας την εφαρμογή τους σε περίπλοκες γεωμετρικά επιφάνειες δυσκολότερη. (Koutas et al., 2019).



Σχήμα 2.2 Ινοπλέγματα (α) Άνθρακα, (β) Υάλου, (γ) Βασάλτη, (δ) PBO, (ε) Χάλυβα (Koutas et al., 2019)



Σχήμα 2.3 Τομή κλώνου νήματος ινών χωρίς εμποτισμό (αριστερά) και με εμποτισμό (δεξιά) (Triantafyllou, 2016)

2.1.3 Ανόργανη μήτρα

Η ανόργανη μήτρα (inorganic matrix) αποτελεί βασικό στοιχείο των IAM, καθώς μέσω των ιδιοτήτων της καθορίζεται η συνάφεια μεταξύ αυτής και του ινοπλέγματος. Η συνάφεια αυτή κρίνεται μείζονος σημασίας για την αποτελεσματικότητα των IAM ως μέσο ενίσχυσης. Η μήτρα είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά των δυνάμεων στις ίνες και πολλές φορές αποκαλείται κονίαμα, όταν ο μέγιστος κόκκος αδρανών που χρησιμοποιείται είναι $<2\text{mm}$. Βασικότερη ιδιότητα του κονιάματος αποτελεί η ικανότητα διείδυσης του στο ινόπλεγμα. Συνεπώς, η σύσταση της μήτρα θα πρέπει να ρυθμίζεται ανάλογα με τις ιδιότητες του εκάστοτε ινοπλέγματος που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, πλέγματα υψηλής απορροφητικότητας και μικρών κενών μεταξύ των κλώνων απαιτούν κονίαμα υψηλότερης ρευστότητας (Μπουρνάς, 2008). Η χημική συμβατότητα ινοπλεγμάτων και ανόργανης μήτρας ευθύνεται για την ανθεκτικότητα των IAM. Επιθυμητές ιδιότητες των κονιαμάτων αποτελούν το χαμηλό ιξώδες, υψηλή εργασιμότητα, επαρκή διατμητική αντοχή αστοχιών όπως αποκολλήσεις, να είναι λεπτόκοκο και να έχει χαμηλό ρυθμό απώλειας εργασιμότητας. Το συνηθέστερο κονίαμα που χρησιμοποιείται προέρχεται από κοινό τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ (Portland). Τέλος, με την προσθήκη πολυμερών στο κονίαμα, μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του και βελτίωση της συνάφειας μεταξύ της μήτρας και του ινοπλέγματος.

2.2 Μηχανικές ιδιότητες IAM

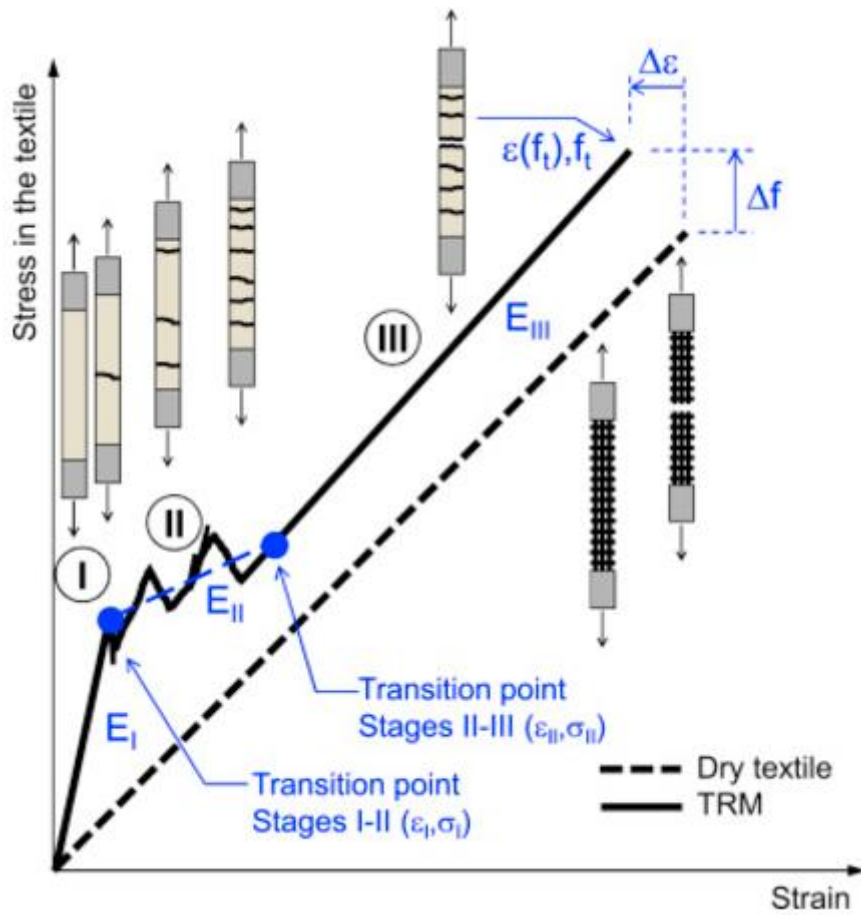
Παρόλη τη δημοφιλία των IAM ως μέθοδο ενίσχυσης την τελευταία δεκαετία η γνώση που υπάρχει πάνω στην περίπλοκη μηχανική τους συμπεριφορά φαίνεται ακόμα ελλιπής. Ο προεμποτισμός των πλεγμάτων, οι μηχανικές ιδιότητες της ανόργανης μήτρας, η μακροχρόνια αντοχή σε δυσμενείς συνθήκες, η σωστή τοποθέτηση των ινοπλεγμάτων, οι ιδιότητες του υποστρώματος, χρήζουν βαθύτερης μελέτης και κατανόησης (De Santis et al., 2017).

Οι βασικές ιδιότητες όπως η μέγιστη τάση, η μέγιστη παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας διερευνήθηκαν σε εφελκυστικές δοκιμές από διάφορους ερευνητές στη βιβλιογραφία (De Santis et al., 2017, D'Antino and Papanicolaou, 2017, D'Antino and Papanicolaou, 2018). Οι ερευνητές δούλεψαν με δοκίμια διάφορων

γεωμετριών προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή της γεωμετρίας του δοκιμίου στο τελικό αποτέλεσμα. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια IAM με γεωμετρία επιφανειακού τύπου, καθώς και άλλα δοκίμια που χρησιμοποιούνται σε τυπικά πειράματα εφελκυσμού, όπως τα λεγόμενα bone-shaped που είναι μεγαλύτερα στις περιοχές που πιάνει το μηχάνημα ή dumbbell που είναι παχύτερα στις περιοχές που πιάνει το μηχάνημα. Η γεωμετρία των τελευταίων, επιτρέπει την αστοχία στην κεντρική περιοχή του πλέγματος. Γενικότερα αποδεικνύεται πως η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας έχει μεγάλη επιρροή σε πειράματα εφελκυσμού. Λεπτομέρειες όπως ο τρόπος προσαρμογής του δοκιμίου στο μηχάνημα επιβολής της φόρτισης επηρεάζουν άμεσα τη μορφή αστοχίας του δοκιμίου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως ο προεμποτισμός του πλέγματος επιδρά ευεργετικά στην αντοχή του όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα.

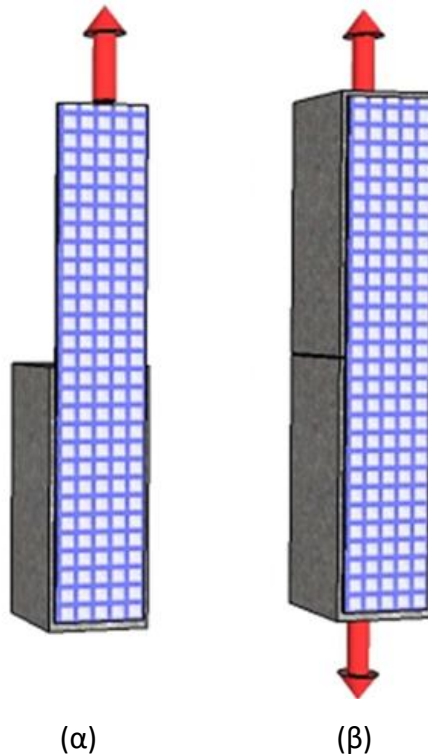
Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η τυπική απόκριση των IAM σε εφελκυστική δοκιμή (μαύρη συνεχής γραμμή), ενώ με μαύρη διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η απόκριση ενός σκέτου ινοπλέγματος χωρίς εμποτισμό σε ανόργανη μήτρα. Επιπλέον, πάνω από την καμπύλη φαίνεται η κατάσταση του δοκιμίου σε κάθε στάδιο μέχρι να επέλθει η αστοχία. Παρατηρείται πως το διάγραμμα χωρίζεται σε τρία ευδιάκριτα στάδια.

1. Το δοκίμιο παραμένει άθικτο χωρίς καμία ρωγμή και η ανόργανη μήτρα συνεισφέρει στην ανάληψη φορτίου και στη δυσκαμψία.
2. Η έναρξη του δεύτερου σταδίου σηματοδοτείται με την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής την οποία σταδιακά διαδέχονται και άλλες. Λόγω των ρωγμών παρατηρείται πτώση του φορτίου.
3. Υπάρχει πλήρης ανάπτυξη των ρωγμών και μέχρι να επέλθει η τελική θραύση των ινών τα ινοπλέγματα είναι αυτά που συμβάλλουν στην αύξηση της αντίστασης.



Σχήμα 2.4 Τυπική απόκριση IAM σε εφελκυσμό (De Santis et al., 2017)

Η συνάφεια μεταξύ του IAM και του σκυροδέματος αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας καθώς από αυτή εξαρτάται η αποτελεσματικότητα των IAM ως μέτρο ενίσχυσης. Παράγοντες που επηρεάζουν τη συνάφεια και μελετώνται στη βιβλιογραφία (Koutas et al., 2019, De Santis et al., 2017, Raoof et al., 2016) είναι η επικάλυψη ή μη των πλεγμάτων και η γεωμετρία τους, η καλή διείσδυση της μήτρας στο πλέγμα, η καλή προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος καθώς ο αριθμός των στρώσεων του υλικού, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, το πλάτος ενίσχυσης και το μήκος αγκύρωσης. Τα πειράματα που διενεργούνται συνήθως για την εξέταση της συνάφειας είναι πειράματα απλής (μονής) και διπλής διάτμησης (single lap and double lap) τα οποία παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 (α) Single lap and (β) Double lap διατμητικές δοκιμές για τη μελέτη της συνάφειας IAM και σκυροδέματος (Koutas et al. 2019)

Οι κύριες μορφές αστοχίας που παρατηρούνται σε αυτές τις πειραματικές δοκιμές είναι:

1. Ολίσθηση του πλέγματος εντός της μήτρας
2. Αποκόλληση του IAM μαζί με μέρος της επικάλυψης του σκυροδέματος
3. Αποκόλληση του IAM στην ένωση του κονιάματος με το σκυρόδεμα
4. Θραύση των ινών του IAM

Στις δοκιμές της βιβλιογραφίας η κύρια μορφή αστοχίας που επικράτησε ήταν η ολίσθηση του πλέγματος εντός της μήτρας. Μερικές επιπλέον παρατηρήσεις είναι ότι με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων του υλικού και του πλάτους της ενίσχυσης επήλθε και αύξηση της συνάφειας, η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος δεν επέφερε σημαντικές αλλαγές στην αποτελεσματικότητα του IAM καθώς και η χρήση σκυροδέματος μικρότερης αντοχής είχε ως αποτέλεσμα μικρή μείωση της συνάφειας (περίπου 7,5%). Επιπλέον, ο προεμποτισμός των πλεγμάτων φαίνεται να οδήγησε σε αύξηση της συνάφειας και αλλαγή του τρόπου αστοχίας σε αποκόλληση του IAM στην ένωση κονιάματος και σκυροδέματος.

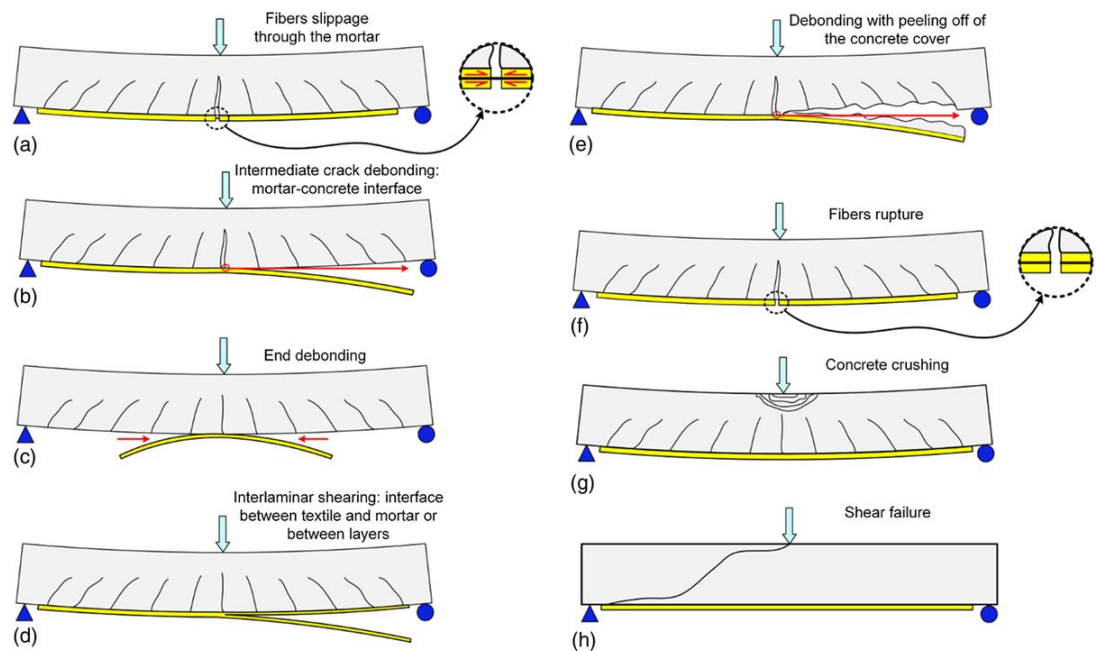
Σύμφωνα με τους Raoof and Bournas (2017), η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος ενίσχυσης με IAM ή ΙΟΠ που βασίζεται στη συνάφεια μεταξύ των υλικών μπορεί να διακυβευτεί σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών και πυρκαγιών. Διεξήχθησαν πειράματα διπλής διάτμησης με δοκίμια IAM και ΙΟΠ να δοκιμάζονται σε θερμοκρασίες 20°C, 50°C, 75°C, 100°C, 150°C, με τα τελευταία να δοκιμάζονται επίσης σε θερμοκρασίες 200°C, 300°C, 400°C, 500°C. Σε αντίθεση με τα ΙΟΠ, των οποίων η συνάφεια μειώθηκε δραματικά, η συνάφεια των δοκιμίων IAM έδειξε να επηρεάζεται σε μικρό βαθμό. Όσον αφορά τις αστοχίες, η αστοχία συνάφειας των ΙΟΠ παρατηρήθηκε μέχρι τους 50°C, ενώ των IAM εντοπίζεται σε θερμοκρασίες από 20°C μέχρι και 400°C.

2.3 Ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ. με IAM

Η ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ. με IAM είναι κατάλληλη για σχεδόν όλων των ειδών τις καταπονήσεις, όπως καμπτικές, διατμητικές, στρεπτικές και αξονικές (Brückner et al., 2005). Τα βασικά κριτήρια που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε περίπτωση είναι το φορτίο αντοχής, το κριτήριο του ελάχιστου οπλισμού και το μήκος αγκύρωσης. Η διεύθυνση των ινών θα πρέπει να συμπίπτει με τη διεύθυνση της φόρτισης. Για παράδειγμα στην περίπτωση των δοκών ή των πλακών μίας διεύθυνσης και ενός υφάσματος με ίνες σε δύο διευθύνσεις, μόνο οι ίνες παράλληλα στον άξονα του μέλους παραλαμβάνουν δυνάμεις, ενώ οι ίνες τις άλλης διεύθυνσης βοηθούν στην εξασφάλιση ανάπτυξης μηχανικής εμπλοκής. Αντίθετα στις πλάκες δύο διευθύνσεων, δυνάμεις παραλαμβάνονται και από τις δύο διευθύνσεις του ινοπλέγματος. Σημαντικό βήμα αποτελεί η προετοιμασία της επιφάνειας ενίσχυσης πριν την τοποθέτηση στρώσεων IAM, συνήθως με τη μέθοδο της αμμοβολής και με καθαρισμό της επιφανείας από τυχόν κατάλοιπα. Στόχος είναι η επίτευξη της καλύτερης δυνατής συνάφειας για την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.

2.3.1 Μορφές αστοχίας δοκών Ο.Σ. ενισχυμένων σε κάμψη με IAM

Η πολυπλοκότητα της μηχανικής συμπεριφοράς των IAM καθρεπτίζεται στις πολλές μορφές αστοχίας που μπορούν να αναπτύξουν. Σύμφωνα με τους Koutas et al. (2019), οι τρόποι αστοχίας των συστημάτων IAM είναι παρόμοιοι με αυτούς των ΙΟΠ, με πολλές έρευνες να παραθέτουν και άλλες μορφές. Γενικά, οι τρόποι αστοχίας ενός στοιχείου ενισχυμένου με IAM μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αστοχίες λόγω είτε αστοχίας του σύνθετου υλικού είτε αστοχίας του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.6 Μορφές αστοχίας δοκού Ο.Σ. ενισχυμένη με IAM (Koutas et al., 2019)

Στο Σχήμα 2.6 παρατίθενται σχηματικά, οι μορφές αστοχίας μίας δοκού Ο.Σ. Από το σχήμα (α) μέχρι το (f) οι αστοχίες οφείλονται στο σύνθετο υλικό, ενώ στα υπόλοιπα σχήματα οφείλονται στο σκυρόδεμα. Παρακάτω αναλύονται οι αστοχίες που οφείλονται στο σύνθετο υλικό.

1. Ολίσθηση ινών μέσα στη μήτρα (Σχ.2.6(a)). Οφείλεται στον μη επαρκή εμποτισμό του ινοπλέγματος με το κονίαμα και την κακή συνάφεια στη διεπιφάνεια ινοπλέγματος κονιάματος.
2. Αποκόλληση στη διεπιφάνεια κονιάματος-σκυροδέματος(Σχ.2.6(b) και (c)). Προκαλείται από την απώλεια συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του κονιάματος.

3. Διαστρωματική απόσχιση (Σχ.2.6(d)). Παρατηρείται μία επιφάνεια θραύσης εντός του σύνθετου υλικού, συμβαίνει όταν η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και κονιάματος και μεγαλύτερη από αυτή του κονιάματος με το ινόπλεγμα. Επιπλέον, συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται επικαλυμμένα ινοπλέγματα.
4. Αποκόλληση της ενίσχυσης μαζί με τμήματα της επικάλυψης του σκυροδέματος (Σχ.2.6(e)).
5. Θραύση των ινών (Σχ.2.6(f)). Πρόκειται για ψαθυρή αστοχία που οδηγεί σε απότομη πτώση του φορτίου. Όταν οι ίνες του υφάσματος στην περιοχή της μέγιστης ροπής υποβάλλονται σε υψηλές εφελκυστικές τάσεις, θραύονται μόνο σε ένα τμήμα.
6. Οι αστοχίες που συνδέονται με το σκυρόδεμα μπορούν να οφείλονται σε σύνθλιψη του σκυροδέματος λόγω μεγαλύτερης αναλογίας χαλύβδινου οπλισμού στο σκυρόδεμα και μικρότερης αναλογίας IAM (Σχ.2.6(g)). Επιπλέον, ο υπεροπλισμός του στοιχείου κατά τη διαστασιολόγηση μπορεί να επιφέρει αστοχία του σκυροδέματος σε διάτμηση πριν την καμπτική αστοχία, πράγμα ανεπιθύμητο (Σχ.2.6(h)).

2.3.2 Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα καμπτικής ενίσχυσης δοκών

Ο.Σ. με IAM

Η καμπτική ενίσχυση δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα με IAM έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές στη βιβλιογραφία, όπως οι Koutas and Papakonstantinou (2021), Giese et al. (2020), Ombres (2011). Κύριοι παράγοντες υπό διερεύνηση αποτέλεσαν η επιρροή του είδους της ανόργανης μήτρας και των ινοπλεγμάτων, ο αριθμός των στρώσεων του υλικού, καθώς και η ηλικία του IAM και το επίπεδο προ-ρηγμάτωσης. Τέλος, οι Raoof et al. (2017) και οι Elsanadedy et al. (2013), συνέκριναν την καμπτική αντοχή δοκών ενισχυμένων με IAM, έναντι δοκών ενισχυμένων με ΙΟΠ. Σε όλες τις περιπτώσεις οι δοκοί υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων.

Οι Koutas and Papakonstantinou (2021), ερεύνησαν την επιρροή του είδους της ανόργανης μήτρας στην αύξηση της καμπτικής αντοχής εννέα δοκών μέσα από δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων. Οι δοκοί ενισχύθηκαν με διάφορες στρώσεις IAM

(τρεις και έξι), χρησιμοποιήθηκαν ίνες βασάλτη με μικρό μέγεθος βροχίδων και ίνες υάλου με μεγάλο μέγεθος βροχίδων, ενώ η διαφορά μεταξύ των κονιαμάτων ήταν οι προσθήκη συνθετικών πολυμερών στο ένα εκ των δύο. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες εξετάστηκαν και οι ερευνητές συμπέραναν τα εξής:

- Γενικά, η ενίσχυση με IAM αύξησε την καμπτική αντοχή όλων των δοκών με τις ενισχυμένες να παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκαμψία από τη μη ενισχυμένη.
- Ο τύπος του κονιάματος παίζει μεγάλο ρόλο στην επίδοση της ενίσχυσης. Στην περίπτωση της αστοχίας από θραύση ινών, η αποτελεσματικότητα των δύο κονιαμάτων ήταν παρόμοια. Στις υπόλοιπες μορφές αστοχίας, το κονίαμα με τα πολυμερή παρουσίασε σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή.
- Η μορφή της αστοχίας επηρεαζόταν άμεσα από το είδος του κονιάματος (εκτός της περίπτωσης θραύσης ινών). Οι δοκοί χωρίς την ενισχυμένη μήτρα παρουσίασαν αποκόλληση του IAM στην ένωση με το σκυρόδεμα, ενώ διαστρωματική αστοχία παρατηρήθηκε στις δοκούς με ενισχυμένη μήτρα.
- Με τον διπλασιασμό των στρώσεων IAM στις δοκούς με ενισχυμένη μήτρα η καμπτική αντοχή αυξήθηκε, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες με το μη ενισχυμένο κονίαμα που σημείωσε πτώση. Η πτώση πιθανότατα οφείλεται σε κακή συνάφεια στη διεπιφάνεια IAM-σκυροδέματος.
- Ο διπλασιασμός των στρώσεων δεν φάνηκε να επηρεάζει την αστοχία όταν αυτή συνδεόταν με αποκόλληση στη διεπιφάνεια, ενώ στην περίπτωση της θραύσης ινών ο διπλασιασμός οδήγησε στην αλλαγή της μορφής αστοχίας σε αποκόλληση στη διεπιφάνεια.
- Στις δοκούς με την ενισχυμένη μήτρα δεν παρατηρήθηκε αλλαγή στην καμπτική συμπεριφορά με χρήση των δύο διαφορετικών ινοπλεγμάτων. Στη μήτρα χωρίς την ενίσχυση, οι ίνες υάλου οδήγησαν σε καλύτερη καμπτική συμπεριφορά από τις ίνες βασάλτη.

- Τελικά, η ενίσχυση ανόργανης μήτρας με σύνθετα πολυμερή, κάτω από ορισμένες συνθήκες, έχει θετικά αποτελέσματα στην αύξηση της αποτελεσματικότητας των ενισχύσεων με IAM.

Οι Giese et al. (2020) σε έρευνα τους ασχολήθηκαν με παραμέτρους που σχετίζονται με τον αριθμό των στρώσεων IAM (δύο, τρεις και τέσσερις), την ηλικία του IAM (τριών, επτά και εικοσιοκτώ ημερών) και το επίπεδο προ-ρηγμάτωσης της δοκού (0%, 50%, 100%), μέσα από δοκιμή τεσσαρών σημείων σε δοκούς τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 1500mm x 200mm x 120mm. Τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτή την έρευνα ήταν η αύξηση του φορτίου αντοχής όλων των δοκών μετά την ενίσχυση και ότι η ηλικία του IAM καθώς και το επίπεδο προ-ρηγμάτωσης, είχαν επιρροή στα φορτία διαρροής και ρηγμάτωσης αλλά όχι στο φορτίο αντοχής. Τέλος η αύξηση των στρώσεων IAM οδήγησε στην αύξηση της καμπτικής αντοχής.

Ο Ombres (2011) ανέλυσε τη συμπεριφορά 12 δοκών οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με IAM ινοπλέγματος PBO με δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων. Μελετήθηκε η επιρροή μηχανικών και γεωμετρικών παραμέτρων και πραγματοποιήθηκε σύγκριση ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και στις θεωρητικές προβλέψεις. Στα αποτελέσματα τονίστηκε η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με IAM με ινοπλέγματα PBO που προσέδωσαν στο σύστημα αντοχή και πλαστιμότητα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των θεωρητικών μοντέλων ταυτίζονται με τα πειραματικά μόνο όταν δεν υφίσταται κάποια αστοχία που περιλαμβάνει αποκόλληση. Τέλος οι μορφές αστοχίας καθοριζόταν ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων του σύνθετου υλικού.

Η αποτελεσματικότητα συστήματος ενίσχυσης με IAM έναντι συστήματος ΙΟΠ μελετήθηκε από τους Elsanadedy et al. (2013). Παράγοντες υπό διερεύνηση αποτέλεσαν, ένας νέος τύπος ινοπλέγματος με ίνες από βασάλτη, ο αριθμός των στρώσεων ινοπλέγματος, καθώς και η απόδοση ενός σύνθετου τσιμεντοειδούς κονιάματος ενισχυμένου με πολυμερή. Συνοψίζεται πως το σύνθετο κονίαμα με τα πολυμερή παρουσίασε καλύτερη συνάφεια μεταξύ των στρώσεων, αλλά και με το σκυρόδεμα, σε σχέση με το απλό τσιμεντοειδές κονίαμα. Επιπλέον, η προσθήκη επιπλέον στρώσεων ινοπλέγματος φαίνεται να αποδίδει θετικά, αυξάνοντας την

καμπτική αντοχή σε ποσοστά από 39% έως και 91%. Τέλος, παρόλο που το σύστημα ενίσχυσης με ΙΟΠ φάνηκε ελαφρώς αποτελεσματικότερο όσον αναφορά την καμπτική αντοχή, το σύστημα με ΙΑΜ απέδωσε καλύτερα όσον αναφορά την πλαστιμότητα.

Οι Raoof et al. (2017) συνέκριναν την καμπτική αντοχή επτά δοκών ενισχυμένων με ΙΑΜ έναντι πέντε δοκών ενισχυμένων με ΙΟΠ. Χρησιμοποιήθηκε και μία δοκός χωρίς ενίσχυση ως δοκός αναφοράς. Άλλοι παράγοντες προς εξέταση αποτέλεσαν το υλικό του ινοπλέγματος (άνθρακας, βασάλτης, γυαλί), ο αριθμός στρώσεων πλέγματος, το σύστημα αγκύρωσης στα άκρα της ενίσχυσης (μανδύας τύπου U), όπως και αν το ινόπλεγμα ήταν επικαλυμμένο ή όχι. Το γενικό αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ότι παρότι τα συστήματα ενίσχυσης με ΙΟΠ ήταν αποτελεσματικότερα, τα συστήματα ΙΑΜ παρουσίασαν αξιολογα αποτελέσματα, κυρίως έπειτα από χρήση επικαλυμμένου πλέγματος και κατάλληλη αύξηση του αριθμού των στρώσεων. Αναλυτικότερα τα συμπεράσματά που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- Τα συστήματα ενίσχυσης με ΙΟΠ παρουσίασαν μεγαλύτερη καμπτική αντοχή σε σχέση με τα συστήματα ΙΑΜ. Παρόλα αυτά η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πλέγματος στα ΙΑΜ αύξησε και την αποτελεσματικότητα του συστήματος.
- Στα συστήματα ΙΑΜ, πέρα από την αύξηση των στρώσεων, χρήση επικαλυμμένου πλέγματος ενισχύει σημαντικά την επίδοση του συστήματος.
- Όσον αναφορά τα διαφορετικής προέλευσης πλέγματα άνθρακα που εξετάστηκαν, και στα δύο συστήματα ενίσχυσης, η επίδοση τους καθορίστηκε από την επικάλυψη τους ή μη, καθώς και από τον αριθμό των στρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Την μεγαλύτερη αποδοτικότητα παρουσίασαν οι επτά στρώσεις επικαλυμμένου πλέγματος βασάλτη, ακολούθησαν οι επτά στρώσεις μη επικαλυμμένου πλέγματος υάλου και τέλος, η μία στρώση πλέγματος άνθρακα.

- Η αγκύρωση με χρήση μανδύα τύπου U φαίνεται να είχε διαφορετική επίδραση στα δύο συστήματα. Στα συστήματα ενίσχυσης με ΙΟΠ η επίδραση ήταν ιδιαίτερα ευεργετική, με την αύξηση της αντοχής να φτάνει ακόμα και το ποσοστό του 90%. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της καμπτικής αντοχής των συστημάτων ΙΑΜ ήταν αρκετά περιορισμένη, μόλις 9%, με το γεγονός αυτό να αποδίδεται σε ολίσθηση των πλεγμάτων.
- Τα συστήματα ΙΟΠ αστόχησαν είτε λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το σκυρόδεμα, είτε λόγω θραύσης των ινών. Τα συστήματα ΙΑΜ εμφάνισαν επιπλέον μηχανισμούς αστοχίας, όπως ολίσθηση των ινών μέσα στη μήτρα και διαστρωματική αστοχία. Οι διάφορες μορφές αστοχίας φάνηκε να επηρεάζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του πλέγματος (επικάλυψη, αριθμός στρώσεων, υλικό).
- Τέλος, η δυσκαμψία και των δύο συστημάτων ΙΑΜ και ΙΟΠ, αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με τη δοκό αναφοράς (μέχρι 72% και 1298% αντίστοιχα).

2.4 Τα γεωπολυμερή στο πεδίο των ενισχύσεων κατασκευών

2.4.1 Λίγα λόγια για τα γεωπολυμερή

Τα τελευταία χρονιά η ανάγκη για μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η όλο πιο φιλική ως προς το περιβάλλον κατεύθυνση του κατασκευαστικού κλάδου αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κάθε οικονομίας. Στον κατασκευαστικό κλάδο, τα υλικά με βάση το τσιμέντο όπως το σκυρόδεμα είναι τα κύρια δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαφόρων υποδομών παγκοσμίως (Almutairi et al., 2021).

Η παραγωγή τσιμέντου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλης ποσότητας εκπομπών του θερμοκηπίου που ευθύνονται για την υπερθέρμανση του πλανήτη, συγχρόνως με την κατανάλωση μεγάλης ποσότητας πρώτων υλών. Σύμφωνα με τους Liu and Yang (2022), βάσει υπολογισμών, για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου, καταναλώνονται περίπου δύο τόνοι πρώτων υλών (δηλαδή ασβεστόλιθος και σχιστόλιθος) και περίπου ένας τόνος αερίων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και οξειδίου του αζώτου (NO) (δηλ. 0,87 τόνοι CO_2 και 3 kg NO). Σύμφωνα με τους Zhang et al. (2018), σε περίπου τέσσερις δισεκατομμύρια τόνους αερίων εκπομπών ετησίως ανέρχονται οι αέριες εκπομπές του θερμοκηπίου για την παραγωγής τσιμέντου, η οποία παραγωγή είναι υπεύθυνη για περίπου το 7% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων, επιβαρύνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Με στόχο να μειωθούν οι επιβλαβείς επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή και τη χρήση σκυροδέματος, μπορούν να ενσωματωθούν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις για την αντικατάσταση των συμβατικών υλικών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα. Διάφορα βιομηχανικά απόβλητα, τα οποία παράγονται σε τεράστιες ποσότητες καθημερινά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά στην παραγωγή τσιμέντου. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου αλλά και της κατανάλωσης φυσικών πρώτων υλών που έχουν σχέση με το τσιμέντο.

Η δομή που ονομάστηκε γεωπολυμερές εισήχθη για πρώτη φορά από τον Davidovits το 1979 και αναπτύχθηκε για την διευκόλυνση της επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικών στερεών αποβλήτων. Η δομή αυτή αποτελούνταν από βασικά υλικά

που περιείχαν σε αφθονία αλουμίνιο και πυρίτιο, ενώ η ενεργοποίηση της επετεύχθη με αλκαλικό διάλυμα ως συνδετικό υλικό. Το γεωπολυμερές είναι ένας νέος τύπος ανόργανου τσιμεντοειδούς υλικού που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια. Μειώνει επίσης σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και για αυτό αναγνωρίζεται ως μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση συγκριτικά με το συνηθισμένο τσιμέντο Πόρτλαντ.

Επί του παρόντος, το υλικό έχει κερδίσει δημοτικότητα μεταξύ των ερευνητών και διενεργούνται σχετικές έρευνες σχετικά με την απόδοση, με βάση την ανθεκτικότητα του γεωπολυμερούς σκυροδέματος. Οι προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι το σκυρόδεμα γεωπολυμερούς επιδεικνύει σημαντικά καλύτερη ανθεκτικότητα σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα με τσιμέντο σε επιθετικά περιβάλλοντα. Παρόλα αυτά, λόγω της ποικιλίας των πρόδρομων υλικών και της πολυπλοκότητας της απόδοσης της ανθεκτικότητας, η υφιστάμενη βιβλιογραφία σχετικά με την ανθεκτικότητα του γεωπολυμερούς σκυροδέματος παραμένει ελλιπής, χωρίς μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση και ταξινόμηση της αντοχής των διαφόρων συστημάτων γεωπολυμερούς σκυροδέματος.

2.4.2 Καμπτική ενίσχυση δοκών με γεωπολυμερή

Οι Parakonstantinou and Katakalos (2009), διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε πέντε δοκούς. Από τις πέντε συνολικά δοκούς, οι τρεις ενισχύθηκαν με ένα υβριδικό σύστημα υψηλής αντοχής αποτελούμενο από χαλύβδινα νήματα εμποτισμένα σε ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς, ενώ οι άλλες δύο αποτέλεσαν τις δοκούς αναφοράς. Πριν την ενίσχυση η επιφάνεια εφαρμογής του σύνθετου υλικού καθαρίστηκε και απομακρύνθηκαν τυχόν σκόνες και ακαθαρσίες. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε η μήτρα γεωπολυμερούς και εφαρμόστηκαν οι ταινίες χάλυβα πάνω στη δοκό. Ακολούθησε η αποθήκευση των δοκών για τουλάχιστον 14 ημέρες σε θερμοκρασία δωματίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ενισχυμένες δοκοί παρουσίασαν σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία από τις μη ενισχυμένες και η ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή συστήματος ενίσχυσης με βάση τις χαλύβδινες χορδές υψηλής αντοχής. Τέλος, σημαντικό παράγοντα στην αποτελεσματικότητα του

συστήματος αποτέλεσε ο χρόνος σκλήρυνσης της ανόργανης μήτρας, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως δεν παρατηρήθηκε κάποια αποκόλληση της μήτρας και της επικάλυψης του σκυροδέματος.

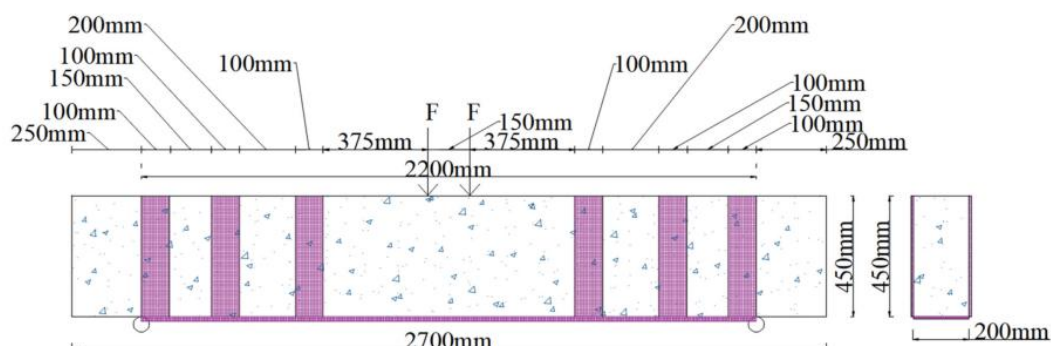
Οι Menna et al. (2013), διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα δύο συστημάτων ενίσχυσης με γεωπολυμερή, ως εναλλακτική των συστημάτων που χρησιμοποιούν εποξειδική ρητίνη, λόγω της κακής της συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες. Δύο δοκοί ενισχύθηκαν με ένα σύστημα χαλύβδινων χορδών υψηλής αντοχής και γεωπολυμερούς μήτρας και οι άλλες δύο με σύστημα ανθρακονημάτων και γεωπολυμερούς μήτρας. Χρησιμοποιήθηκε και μία δοκός χωρίς ενίσχυση ως δοκός αναφοράς. Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων και δεν χρησιμοποιήθηκε μηχανική αγκύρωση για τη στερέωση του σύνθετου υλικού. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μήτρα γεωπολυμερούς παρουσίασε πολύ καλή προσκόλληση πάνω στην επικάλυψη του σκυροδέματος και στα χαλύβδινα καλώδια και δεν παρατηρήθηκε κανένα φαινόμενο αποκόλλησης. Επιπλέον το σύστημα με τα χαλύβδινα καλώδια και το γεωπολυμερές παρουσίασε αυξημένη καμπτική αντοχή. Αξίζει να σημειωθεί πως στο σύστημα με τα ανθρακονήματα η αύξηση της καμπτικής αντοχής ήταν μικρότερη λόγω της κακής συνάφειας μεταξύ της μήτρας με το πλέγμα.

Οι Liu και Yan (2022), τόνισαν την ελλιπή βιβλιογραφία πάνω στην καμπτική ενίσχυση δοκών Ο.Σ. γενικότερα, πόσο μάλλον στις δοκούς που φέρουν ήδη κάποιο βαθμό προ-ρηγμάτωσης. Με αυτή την αφορμή, οι ίδιοι σε έρευνα που διεξήγαγαν μελέτησαν δοκούς Ο.Σ. με κάποιο βαθμό αρχικής προ-ρηγμάτωσης, κάποιες ενισχυμένες με πλέγματα άνθρακα και κονίαμα γεωπολυμερούς και κάποιες ενισχυμένες πλέγματα άνθρακα και εποξεική ρητίνη. Παράμετροι που τέθηκαν υπό διερεύνηση ήταν η συμπεριφορά του γεωπολυμερούς κονιάματος, η επιρροή του αριθμού στρώσεων του πλέγματος καθώς και το πλάτος των αρχικών ρωγμών στην καμπτική απόδοση. Συνολικά, μελετήθηκαν πέντε δοκοί των οποίων οι ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 παρακάτω. Μία ήταν μη ενισχυμένη και χωρίς αρχικές ρωγμές και χρησιμοποιήθηκε ως δοκός αναφοράς. Η ενίσχυση τοποθετήθηκε κατά μήκος του κάτω μέρους κάθε δοκού, καθώς στα άκρα της με μανδύα τύπου U (Σχ. 2.6). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Τα αποτελέσματα

αυτού του πειράματος έδειξαν ελαφρώς μειωμένη καμπτική αντοχή στις δοκούς με το κονίαμα γεωπολυμερούς. Συγκεκριμένα οι δοκοί με την εποξεική ρητίνη παρουσίασαν αυξημένη αντοχή κατά 7,76% σε σχέση με τις δοκούς με το κονίαμα γεωπολυμερούς. Επιπλέον, η αύξηση των στρώσεων πλέγματος από δύο σε τρεις, στις δοκούς με το κονίαμα γεωπολυμερούς φάνηκε ευνοϊκή, καθώς οδήγησε σε 1,86% αύξηση της καμπτικής αντοχής.

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά υπό εξέταση δοκών (Liu and Yang, 2022)

Δοκός	Τύπος συγκολλητικού	Αριθμός στρώσεων πλέγματος	Πλάτος αρχικών ρωγμών
1	-	-	-
2	Γεωπολυμερές κονίαμα	2	0,15mm
3	Εποξεική ρητίνη	2	0,15mm
4	Γεωπολυμερές κονίαμα	2	0,2mm
5	Γεωπολυμερές κονίαμα	3	0,2mm



Σχήμα 2.7 Σημεία τοποθέτησης την ενίσχυσης (Liu and Yang, 2022)

2.5 Σύνοψη της βιβλιογραφίας- ερευνητικά κενά

Από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι τα συστήματα ενίσχυσης με IAM αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στο πεδίο των ενισχύσεων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Το ερευνητικό υλικό που παρατέθηκε, εστιάζει κυρίως σε παράγοντες όπως ο τύπος της μήτρας, το υλικό και ο αριθμός στρώσεων του πλέγματος, το επίπεδο προ-ρηγμάτωσης των δοκών και το σύστημα αγκύρωσης του συστήματος ενίσχυσης. Η βιβλιογραφία για IAM με κονιάματα γεωπολυμερούς είναι ακόμα ελλιπής, με περισσότερη έρευνα να απαιτείται πάνω στην αποδοτικότητα, τις πολλαπλές στρώσεις πλέγματος και της συνάφειας, τόσο μεταξύ των στρώσεων όσο και μεταξύ ενίσχυσης και σκυροδέματος. Η εργασία αυτή, έρχεται να ενισχύσει την υπάρχουσα βιβλιογραφία, εξετάζοντας ένα νέο κονίαμα γεωπολυμερούς και συγκρίνοντας το με ένα συμβατικό τσιμεντοειδές, προσφέροντας νέα πειραματικά δεδομένα και αναλύσεις σε όρους φορτίου αστοχίας, δυσκαμψίας και συντελεστή αποδοτικότητας της ενίσχυσης.

Κεφάλαιο 3 : Πειραματικό πρόγραμμα

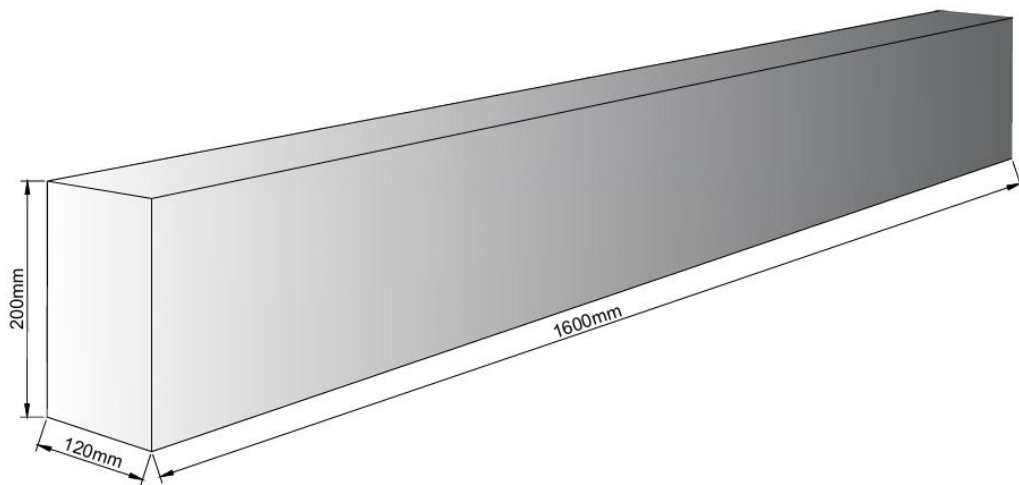
3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανάλυση του συνόλου της πειραματικής διαδικασίας. Οι πειραματικές δοκιμές εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, κατά το διάστημα Φεβρουάριος 2024 – Σεπτέμβριος 2024. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε αφορούσε την κατασκευή πέντε δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα τέσσερις εξ αυτών ενισχύθηκαν καμπτικά με χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, ενώ η πέμπτη αποτελούσε δοκό αναφοράς. Όλες οι δοκοί είχαν ίδια διάσταση και το πείραμά είχε ως στόχο την παρατήρηση των ποικίλων μορφών αστοχίας για κάθε τύπο κονιάματος και για τον διαφορετικό αριθμό των στρώσεων ινοπλεγμάτων που εφαρμόζονται.

3.2 Δοκίμια

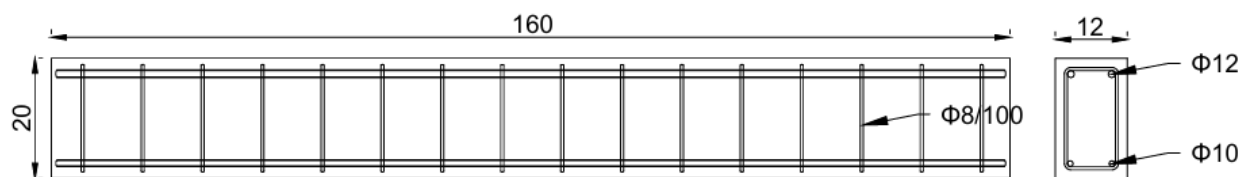
3.2.1 Γεωμετρία και οπλισμός δοκιμών

Στο πειραματικό πρόγραμμα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν πέντε και διερευνήθηκαν ως προς την καμπτική αντοχή τους μέσω της υποβολής τους σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων. Τα τέσσερα εκ των πέντε δοκιμίων ήταν ενισχυμένα με διαφορετικά κονιάματα ενώ και ο αριθμός των στρώσεων των ινοπλεγμάτων που εφαρμόζονται διέφερε σε κάθε ένα από τα ενισχυμένα δοκίμια. Η πέμπτη δοκός, δεν ενισχύθηκε και αποτέλεσε τη δοκό αναφοράς. Στο Σχ. 3.1 φαίνεται η γεωμετρία και οι διαστάσεις των δοκών.



Σχήμα 3.1 Γεωμετρία δοκού και διαστάσεις διατομής

Το μήκος του κάθε δοκιμίου επιλέχθηκε να είναι 1600 mm, το πλάτος 120 mm και το ύψος 200 mm. Το κάθε δοκίμιο οπλίστηκε κατά τη διαμήκη διεύθυνση με χαλύβδινο οπλισμό 2 $\varnothing$ 12 πάνω, 2 $\varnothing$ 10 κάτω και $\varnothing$ 8/100 στην εγκάρσια διεύθυνση, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2 σε πλάγια όψη. Ο χάλυβας ήταν κατηγορίας B500C. Ο οπλισμός επιλέχθηκε με σκοπό την αποφυγή της διατμητικής αστοχίας και της θραύσης του σκυροδέματος. Στόχος ήταν η πλαστική συμπεριφορά της δοκού, δηλαδή η ικανότητα ανάπτυξης παραμορφώσεων και η αποφυγή της πρώιμης αστοχίας του σκυροδέματος πριν τη διαρροή του χάλυβα. Σε περίπτωση τοποθέτησης ράβδων μεγάλου εμβαδού ή και μεγάλου αριθμού, μειώνεται η πλαστιμότητα της δοκού με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρού βέλους κάμψης, οδηγώντας στην μη ενεργοποίηση του συστήματος ενίσχυσης.



Σχήμα 3.1 Οπλισμοί δοκού σε πλάγια όψη και τομή και διαστάσεις σε εκατοστά

3.2.2 Περιγραφή δοκιμών- παράμετροι διερεύνησης

Οι δοκοί όπως και προαναφέρθηκε ήταν πέντε εκ των οποίων οι τέσσερις ήταν ενισχυμένες. Η διεργασία που υπέστησαν οι δοκοί για την ενίσχυση τους ήταν η ίδια. Για την ενίσχυση τους χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά κονιάματα. Ένα κονίαμα τσιμεντοειδές, εμπορικά διαθέσιμο και ένα κονίαμα γεωπολυμερούς, το οποίο αναπτύχθηκε στο εργαστήριο. Τα δοκίμια ενισχύθηκαν με μια και τρεις στρώσεις από πλέγμα άνθρακα και για τα δύο κονιάματα. Ακολουθεί περεταίρω ανάλυση σε επόμενη ενότητα.

Η ονομασία κάθε δοκιμίου προέκυψε από το είδος του κονιάματος και τον αριθμό στρώσεων πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ενίσχυση. Το δοκίμιο αναφοράς ονομάστηκε REF. Όλα τα παραπάνω βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 3.1.

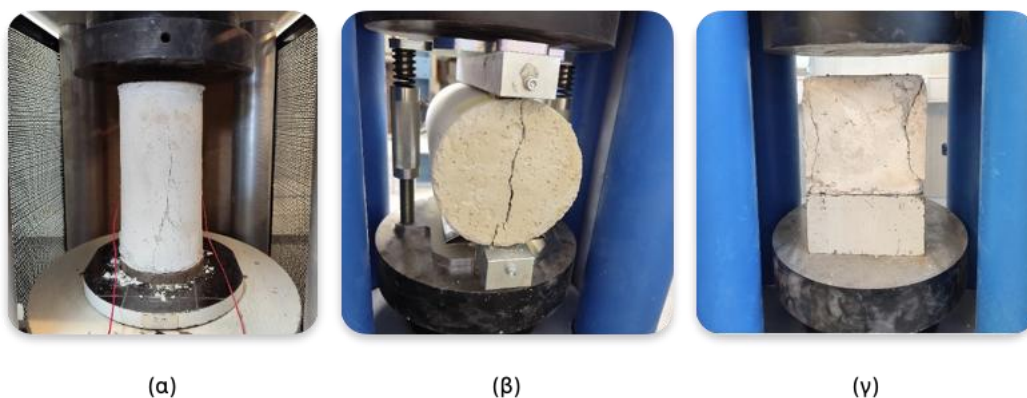
Πίνακας 3.1 Ονοματολογία δοκιμών και χαρακτηριστικά ενίσχυσης

Ονομασία δοκιμίου	Τύπος κονιάματος	Τύπος δοκιμίου	Αριθμό στρώσεων ενίσχυσης
REF	—	Χωρίς ενίσχυση	—
T_1	Τσιμεντοειδές	Ενισχυμένη	1
T_3	Τσιμεντοειδές	Ενισχυμένη	3
Γ_1	Γεωπολυμερούς	Ενισχυμένη	1
Γ_3	Γεωπολυμερούς	Ενισχυμένη	3

3.3 Υλικά

3.3.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών προήλθε από βιομηχανία παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος κατηγορίας C12/15 με αδρανή μέγιστου κόκκου 16 mm (γαρμπίλι). Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην αντοχή του σκυροδέματος, κατά τη σκυροδέτηση των δοκών σκυροδετήθηκαν τρεις κύβοι διαστάσεων 150 mm, καθώς και τρεις κύλινδροι διαστάσεων Φ150x300 mm, τα οποία εξετάστηκαν ως προς την εφελκυστική και τη θλιπτική αντοχή, δίνοντας τις τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 3.2. Στιγμιότυπα από τις πειραματικές δοκιμές που διεξήχθησαν φαίνονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού (α) θλιπτικής και (β) εφελκυστικής αντοχής κυλίνδρου, (γ) θλιπτικής αντοχής κύβου

Πίνακας 3.2 Ιδιότητες σκυροδέματος

Ιδιότητα	Είδος δοκιμίου	Τιμή ($M.O \pm T.A$)	Πρότυπο
Θλιπτική αντοχή	3 κύβοι 150 mm	35.86 ± 1.66 MPa	EN 12390-3
Θλιπτική αντοχή	3 κύλινδροι Φ150x300 mm	26.95 ± 0.47 MPa	EN 12390-3
Μέτρο ελαστικότητας	3 κύλινδροι Φ150x300 mm	26.78 ± 1.6 GPa	Μέτρηση από την κλίση της καμπύλης σ-ε από την θλίψη των κυλίνδρων

Εφελκυστική αντοχή	3 κύλινδροι Φ150x300 mm	3.28 ± 0.17 MPa	EN 12390-6
--------------------	----------------------------	---------------------	------------

3.3.2 Κονίαμα ενίσχυσης

Για την καμπτική ενίσχυση των δοκών χρησιμοποιήθηκαν δυο κονιάματα, εκ των οποίων το ένα ήταν τσιμεντοειδές κονίαμα εμπορικά διαθέσιμο ενώ το άλλο ήταν κονίαμα γεωπολυμερούς, το οποίο αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Ο.Σ. του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το τσιμεντοειδές κονίαμα για την παρασκευή του αναμίχθηκε με νερό, με αναλογία ανάμιξης 24% κατά βάρος νερού, ενώ δεν χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα πολυμερή.

Το κονίαμα γεωπολυμερούς που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο, είχε ως βάση τη μετακαολίνη, ενώ ως αλκαλικό διάλυμα ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκε πυριτικό κάλιο. Περιείχε επίσης θραυστή ασβεστολιθική άμμο ως αδρανές, με μέγιστο κόκκο 1 mm και ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 6 mm, σε περιεκτικότητα 1% κατ' όγκο. Οι σωστές αναλογίες των συστατικών για το κονίαμα γεωπολυμερούς προέκυψαν μετά από δοκιμές στο εργαστήριο. Παράλληλα, ποσότητα των κονιαμάτων τοποθετούνταν και σε μεταλλικές μήτρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, για τη δημιουργία δοκιμίων τα οποία θα χρησιμοποιούνταν για τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.



Σχήμα 3.4 Πρίσματα για τον προσδιορισμό μηχανικών χαρακτηριστικών τσιμεντοειδούς κονιάματος

Για τον προσδιορισμό της αντοχής των κονιαμάτων διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, καθώς και κάμψης τριών σημείων στα πρίσματα. Τα

αποτελέσματα που προέκυψαν, αναγράφονται στους Πίνακες 3.3 και 3.4. Φωτογραφικό υλικό από τις δοκιμές των πρισμάτων παρατίθεται στο Σχήμα 3.5.

Πίνακας 3.3 Αντοχή τσιμεντοειδούς κονιάματος

Ιδιότητα	Είδος δοκιμίου	Τιμή ($M.O \pm T.A$)	Πρότυπο
Καμπτική αντοχή	3 δοκοί/πρίσματα 40x40x160 mm	6.08 ± 0.62 MPa	EN 1015-11
Θλιπτική αντοχή	6 κύβοι 40 mm από 3 δοκοί/πρίσματα 40x40x160 mm	31.80 ± 0.68 MPa	EN 1015-11

Πίνακας 3.4 Αντοχή γεωπολυμερούς κονιάματος

Ιδιότητα	Είδος δοκιμίου	Τιμή ($M.O \pm T.A$)	Πρότυπο
Καμπτική αντοχή	3 δοκοί/πρίσματα 40x40x160 mm	6.65 ± 0.48 MPa	EN 1015-11
Θλιπτική αντοχή	6 κύβοι 40 mm από 3 δοκοί/πρίσματα 40x40x160 mm	29.0 ± 1.17 MPa	EN 1015-11



(α)

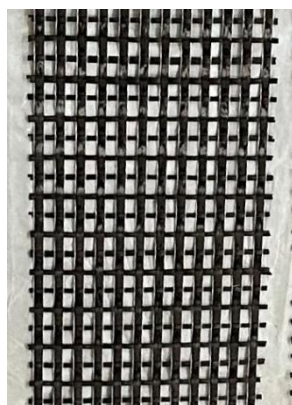


(β)

Σχήμα 3.5 Δοκιμές προσδιορισμού (α) θλιπτικής και (β) εφελκυστικής αντοχής κονιαμάτων

3.3.3 Ινόπλεγμα

Το ινόπλεγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι εμπορικά διαθέσιμο και σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι ένα ειδικό ύφασμα κατασκευασμένο από ανθρακονήματα υψηλής αντοχής. Το συγκεκριμένο ινόπλεγμα είναι άνευ επικάλυψης, υψηλής αντοχής και διατίθεται σε ρολά πλάτους 1m και μήκους 50m. Ακολουθούν οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλέγματος στον παρά κάτω Πίνακα 3.5. Η λωρίδα πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Ινόπλεγμα άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές

Πίνακας 3.5 Ιδιότητες ινοπλέγματος άνθρακα

Τύπος	Ινόπλεγμα άνθρακα υψηλής αντοχής
Βάρος (g/m ²)	≥ 170
Μέγεθος βροχίδας κλώνου (mm)	10 x 10
Πυκνότητα ινών (g/cm ³)	1,83
Μηχανικές ιδιότητες	
Αντοχή σε εφελκυσμό (kN/m)	>240
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	252 ± 2%
Επιφάνεια ανθεκτική στο φορτίο ανά μονάδα πλάτους (mm ² /m)	48
Ισοδύναμο πάχος στεγνού υφάσματος (mm)	0,048
Επιμήκυνση σε αστοχία (%)	2

3.3.4 Χάλυβας

Όλες οι ράβδοι οπλισμού, καθώς και οι συνδετήρες που τοποθετήθηκαν στα δοκίμια ήταν κατηγορίας χάλυβα B500C. Οι κλωβοί οπλισμού που τοποθετήθηκαν στους ξυλότυπους φαίνονται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Κλωβοί οπλισμού πριν την τοποθέτηση στους ξυλότυπους

3.4 Προετοιμασία δοκιμίων

Αρχικά για την προετοιμασία των δοκιμίων χρειάστηκε να κατασκευαστεί ειδικό καλούπι με τις διαστάσεις των δοκιμίων. Έπειτα, το καλούπι που κατασκευάστηκε για τις πέντε δοκούς λαδώθηκε κατά μήκος όλης της επιφάνειας που θα ερχόταν σε επαφή με το σκυρόδεμα για τη διευκόλυνση της έπειτα αφαίρεσης των δοκών. Τέλος, τοποθετήθηκε ο οπλισμός με χρήση ειδικών αποστατών έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ελάχιστη επικάλυψη. Το καλούπι μαζί με τον οπλισμό φαίνεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Καλούπια δοκιμίων

3.4.1 Σκυροδέτηση

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών προήλθε από βιομηχανία παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος και ήταν κατηγορίας C12/15 μέγιστου κόκκου αδρανών 16 mm. Μετά την προετοιμασία του ξυλότυπου με χρήση λαδιού περιμετρικά του για την ευκολότερη αποκόλληση του, ακολουθήσε η χύτευση του σκυροδέματος στα καλούπια. Η διαδικασία της χύτευσης έγινε με ιδιαίτερη προσοχή ώστε τόσο το σκυρόδεμα να καλύψει όλη την επιφάνεια του καλουπιού, όσο και να διαπεράσει όλο τον οπλισμό, για την αποφυγή δημιουργίας κενών αέρος εσωτερικά που θα επέφεραν πτώση αντοχής στην δοκό. Αφού ολοκληρώθηκε η χύτευση του σκυροδέματος, έγινε το τελείωμα στην ελεύθερη επιφάνεια των δοκών με ειδικό εργαλείο, με το τελικό αποτέλεσμα να φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Δοκίμια κατά τη σκυροδέτηση

Όπως προαναφέρθηκε, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής εφελκυστικής αντοχής, του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε τρεις κύβους διαστάσεων 150 mm καθώς και τρεις κυλίνδρους διαστάσεων $\Phi 150 \times 300$ mm. Για τη σκυροδέτηση των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές και πλαστικές μήτρες πρότυπων διαστάσεων (Σχ. 3.10).

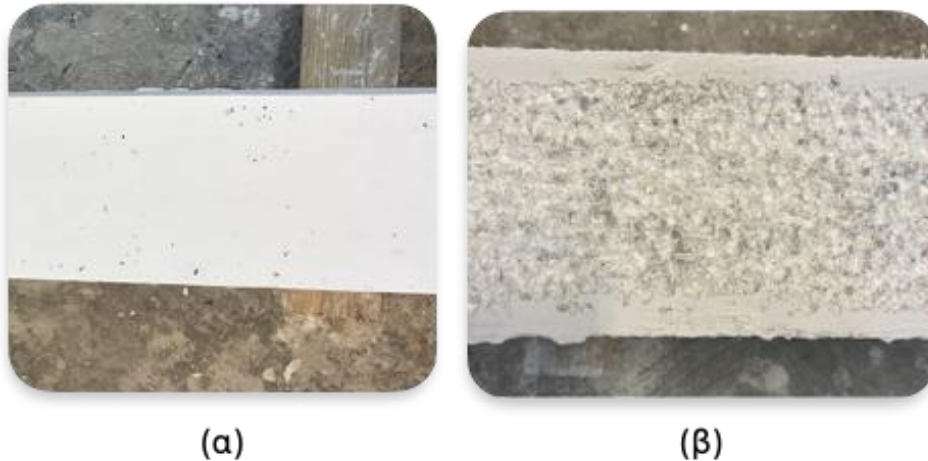


Σχήμα 3.10 Μήτρες για τη λήψη δοκιμών σκυροδέματος

Αφότου η διαδικασία της σκυροδέτησης των δοκών έλαβε τέλος, ακολούθησε η συντήρηση του σκυροδέματος. Αυτή η διαδικασία ήταν αναγκαία και περιλάμβανε για τις επτά πρώτες ημέρες συνεχή διαβροχή των επιφανειών έτσι ώστε να παραμένουν υγρές. Μετά το πέρας της πρώτης εβδομάδας, τα καλούπια αφαιρέθηκαν και απλώθηκαν στις ελεύθερες επιφάνειες του σκυροδέματος λινάτσες, όπου διαβρέχονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Συνολικά, η συντήρηση διήρκεσε 28 ημέρες. Αντίστοιχα, τα κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια συντηρήθηκαν με διαβροχή της ελεύθερης επιφάνειας τους για 28 ημέρες. Τα δοκίμια αυτά παρέμειναν τις πρώτες τρεις μέρες στις μήτρες 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.

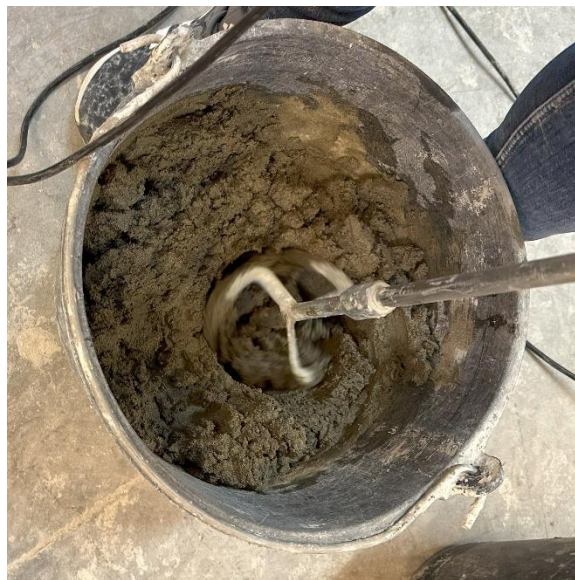
3.4.2 Ενίσχυση δοκών

Η διαδικασία της ενίσχυσης ξεκίνησε από την εκτράχυνση της επιφάνειας των δοκών, στις οποίες θα εφαρμοζόταν η ενίσχυση με ινοπλέγματα από ανόργανη μήτρα. Αυτή η διεργασία ήταν ιδιαίτερα σημαντική για τη συνάφεια του σκυροδέματος με το κονίαμα. Σχετική εικόνα ενός δοκιμίου πριν και μετά την εκτράχυνση, ακολουθεί στο Σχ. 3.11.



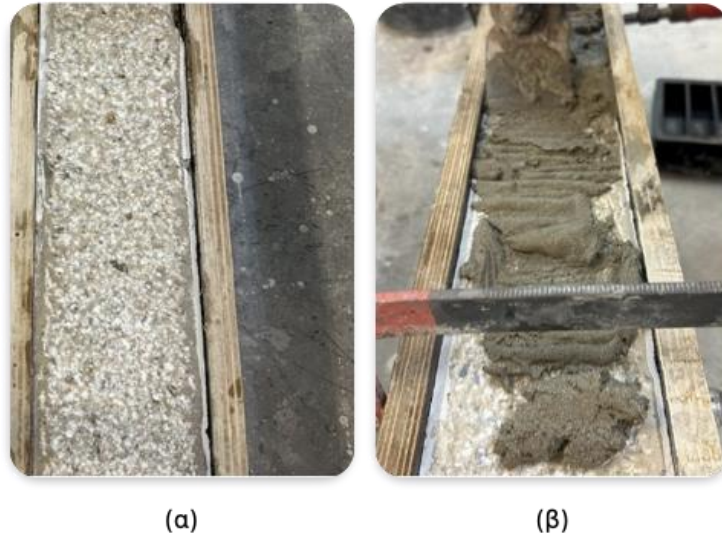
Σχήμα 3.11 Επιφάνεια σκυροδέματος (α) πριν την εκτράχυνση (β) μετά την εκτράχυνση

Μετά την περάτωση της πρώτης διεργασίας, τα δοκίμια ήταν έτοιμα για εφαρμογή της ενίσχυσης. Στη συνέχεια ακολούθησαν οι απαραίτητες αναμίξεις για την παρασκευή των δύο κονιαμάτων. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται οπτικό υλικό από τη διαδικασία αυτή. Ταυτόχρονα, με τη χρήση ειδικών κοπτικών εργαλείων το πλέγμα άνθρακα κόπηκε σε διαστάσεις με μήκος 130 cm και πλάτος 20 cm, χωρίς να υποστεί περεταίρω επεξεργασία.



Σχήμα 3.12 Ανάδευση κονιαμάτων

Τελικό στάδιο πριν την ενίσχυση ήταν η δημιουργία οδηγών που θα βοηθούσαν στη τήρηση του πάχους που είχε οριστεί την ενίσχυση των δοκών, 6mm και 10mm για τη μία και τις τρεις στρώσεις αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.13.



Σχήμα 3.13 Εφαρμογή κονιάματος με τη βοήθεια οδηγών (α) δοκός πριν την εφαρμογή κονιάματος (β) δοκός κατά την εφαρμογή κονιάματος

Η ενίσχυση ξεκίνησε με διαβροχή της δοκού και έπειτα τη διάστρωση μιας στρώσης κονιάματος στη εκτραχυμένη επιφάνεια της. Ακολούθησε η εμβάπτιση του ινοπλέγματος μέσα στο κονίαμα με εφαρμογή κατάλληλης πίεσης με το χέρι. Πάνω από το ινόπλεγμα τοποθετήθηκε και άλλη στρώση κονιάματος. Στην περίπτωση πολλαπλών στρώσεων ενίσχυσης, επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία μέχρι την τελευταία στρώση. Η διαδικασία που αναφέρθηκε παρουσιάζεται με φωτογραφικό υλικό στο Σχήμα 3.14.



(α)



(β)



(γ)

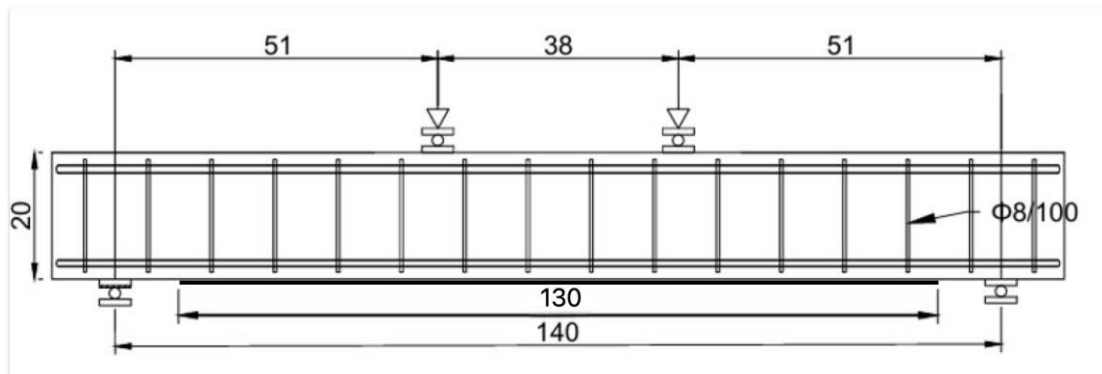


(δ)

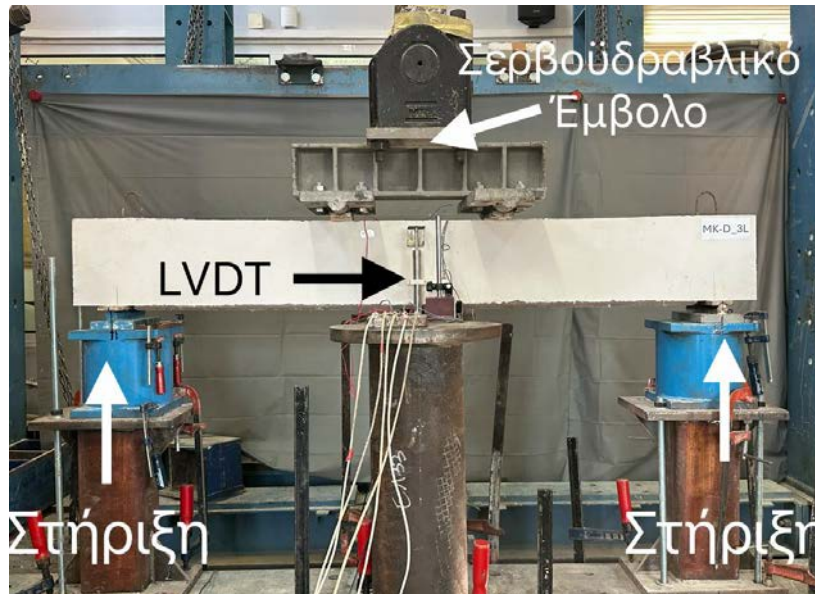
Σχήμα 3.14 Διαδικασία ενίσχυσης (α) εφαρμογή πρώτης στρώσης κονιάματος, (β) εμφάνιση ινοπλέγματος στο κονίαμα, (γ),(δ) δοκοί μετά το πέρας της ενίσχυσης

3.5 Πειραματική διάταξη

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρειάστηκε αρχικά να βαφτούν οι δοκοί με λευκό χρώμα καθιστώντας πιο εύκολη την παρατήρηση των ρηγματώσεων. Εν συνεχεία, κατασκευάστηκε η πειραματική διάταξη για δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων, ξεκινώντας με τις βάσεις που θα πατούσαν οι δοκοί, κύλιση στα αριστερά και άρθρωση στα δεξιά, με μεταξύ τους απόσταση 140cm (Σχ.3.15). Η δοκός τοποθετούταν στις μεταλλικές στηρίξεις που είχαν προσαρμοστεί και ευθυγραμμιζόταν ως προς τη θέση της στις στηρίξεις, έτσι ώστε τα φορτία να επιβάλλονται στο κατάλληλο μήκος του καμπτικού ανοίγματος. Παράλληλα, τοποθετήθηκε το σερβοϋδραυλικό έμβολο το οποίο ευθυγραμμιζόταν ώστε να μην υπάρχει εκκεντρότητα στην εφαρμογή της φόρτισης. Πάνω στη δοκό τοποθετούταν μεταλλικά πλακίδια στην άνω παρειά της, στα σημεία όπου θα πατούσε το έμβολο. Οι δοκοί υπεβλήθησαν σε μονοτονική φόρτιση κάμψης τεσσάρων σημείων, το φορτίο εφαρμόστηκε σε δύο σημεία εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος της δοκού, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα Σχήμα 3.15. Οι δοκιμές κάμψης των δοκών πραγματοποιήθηκαν σε δύσκαμπτο μεταλλικό πλαίσιο. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.16.

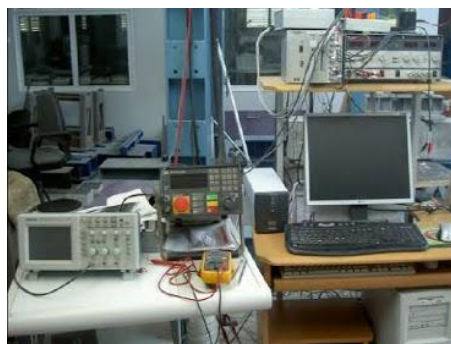


Σχήμα 3.15 Σκαρίφημα με αποστάσεις εφαρμογής φορτίων και πειραματική διάταξη
(διαστάσεις σε εκατοστά)



Σχήμα 3.16 Διάταξη πειράματος

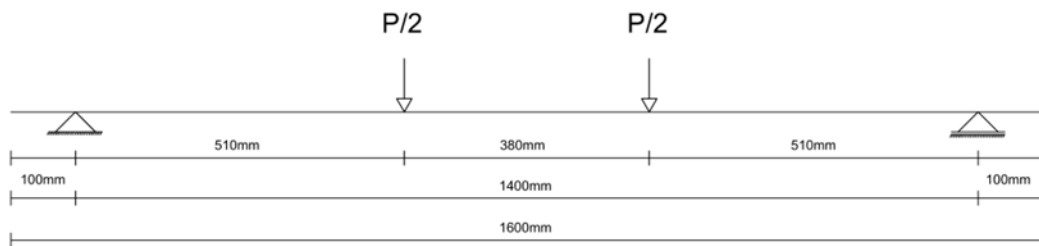
Οι καταγραφές των τιμών διαφόρων μεγεθών (δύναμης και μετακίνησης) έγιναν μέσω ειδικού καταγραφικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η μέτρηση και καταγραφή της δύναμης άσκησης του εμβόλου στη δοκό, έγινε μέσω της ενσωματωμένης σε αυτό δυναμοκυψέλης. Για την καταγραφή των μετακινήσεων ή βυθίσεων τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας τύπου LVDT σε κάθε μία πλευρά της δοκού στο μέσο του καμπτικού ανοίγματος (Σχ. 3.16). Οι αισθητήρες αυτοί, εφαρμόστηκαν σε μεταλλικές άκαμπτες γωνίες, που τοποθετήθηκαν σε απόσταση 20mm από την άνω παρειά της δοκού και 190mm από τα σημεία άσκησης των φορτίων. Θεωρείται ότι οι τιμές που καταγράφονται από τα LVDT ταυτίζονται με τις βυθίσεις στο μέσο της δοκού. Όλες οι μετρήσεις των αισθητήρων αποθηκεύονταν αυτόματα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων (Σχ. 3.17).



Σχήμα 3.17 Όργανα καταγραφής δοκιμών

3.6 Στατικό σύστημα

Στο Σχήμα 3.18 παρατίθεται το στατικό σύστημα του φορέα. Πρόκειται για μία αμφιέρειστη δοκό συνολικού μήκους 160 cm και δύο κατακόρυφα συγκεντρωμένα φορτία που ασκούνται εκατέρωθεν του μέσου σε απόσταση 19 cm.



Σχήμα 3.18 Στατικό σύστημα

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροπών στο Σχήμα 3.19, η ροπή μεγιστοποιείται ανάμεσα στα δύο επιβαλλόμενα φορτία, ενώ η τιμή της στις στηρίξεις είναι μηδενικές. Η τιμή της μέγιστης ροπής είναι ίση με $0,51 \text{ m} \times P/2 \text{ k N}$ σε $\text{k N}\cdot\text{m}$.

$$M_{max} = 0,51 \text{ m} \times \frac{P(\text{kN})}{2} \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

Όπου :

- M : η μέγιστη ροπή λόγω της κάμψης
- P : το συνολικό φορτίο που ασκείται από το έμβολο

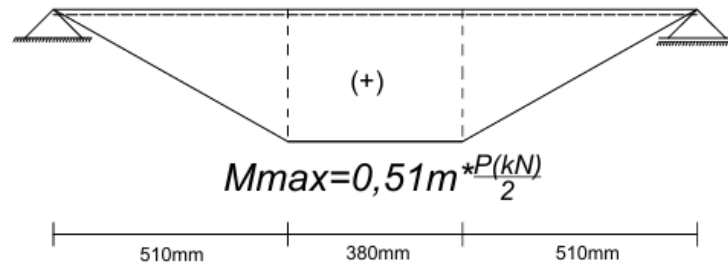
Από το διάγραμμα των τεμνουσών (Σχ.3.19), προκύπτει ότι η τέμνουσα μηδενίζεται στα σημεία μεγιστοποίησης της ροπής, δηλαδή στην περιοχή που περικλείουν ανάμεσα στα σημεία επιβολής των φορτίων. Οι τέμνουσες δυνάμεις μεγιστοποιούνται στα διαστήματα ανάμεσα στις στηρίξεις και στα σημεία επιβολής των φορτίων με την τιμή να είναι ίση με $P/2 \text{ k N}$.

$$Q_{max} = \frac{P}{2} \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

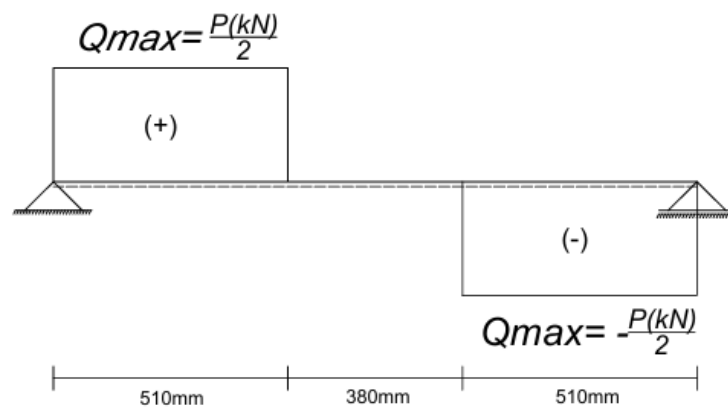
Όπου :

- Q : η τέμνουσα δύναμη
- P : το συνολικό φορτίο που ασκείται στο έμβολο

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΕΜΝΟΥΣΩΝ



Σχήμα 3.19 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές που περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, παρατίθενται και σχολιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης, καθώς και οι δυσκαμψίες για κάθε δοκό και πραγματοποιείται ανάλυση διατομών. Τέλος, τα δεδομένα που προέκυψαν για κάθε δοκό συγκρίνονται μεταξύ τους ώστε να ερευνηθεί ο ρόλος του αριθμού στρώσεων ινοπλεγμάτων και η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ενίσχυσης με τα δύο διαφορετικά κονιάματα, με έμφαση στο υπό διερεύνηση κονίαμα γεωπολυμερούς.

4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 4.1 με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας (φορτίο, βύθιση, μορφή αστοχίας) συνοπτικά για κάθε δοκό.

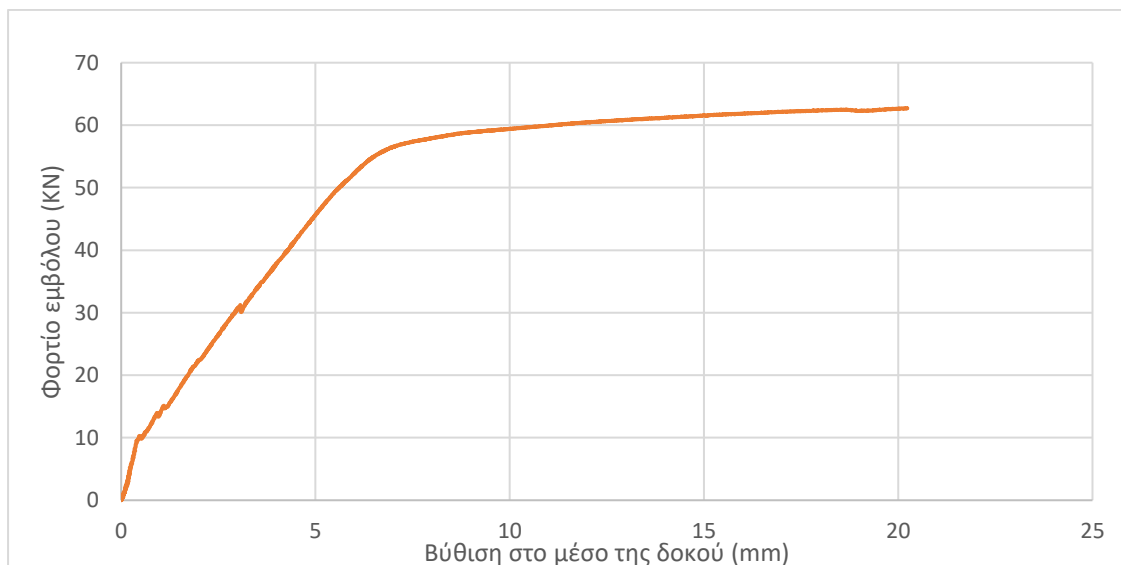
Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Ονομασία δοκιμίου	Φορτία (KN)			Βύθιση στο μέσο της δοκού (mm)			Μορφή αστοχίας
	Ρηγμάτωσης	Διαρροής	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Διαρροής	Αστοχίας	
REF	10,3	54,9	62,7	0,48	6,46	20,2	Θραύση σκυροδέματος
T_1	14,1	57,6	64,5	0,54	6,44	13,7	Αποκόλληση στη διεπιφάνεια
T_3	12,1	57,2	69,5	0,47	6	11,4	Διαστρωματική αστοχία
Γ_1	13,1	60,6	65,3	0,55	6,47	9,6	Ολίσθηση και θραύση ινών
Γ_3	15,3	64,3	78,9	0,63	6,6	17,6	Διαστρωματική αστοχία

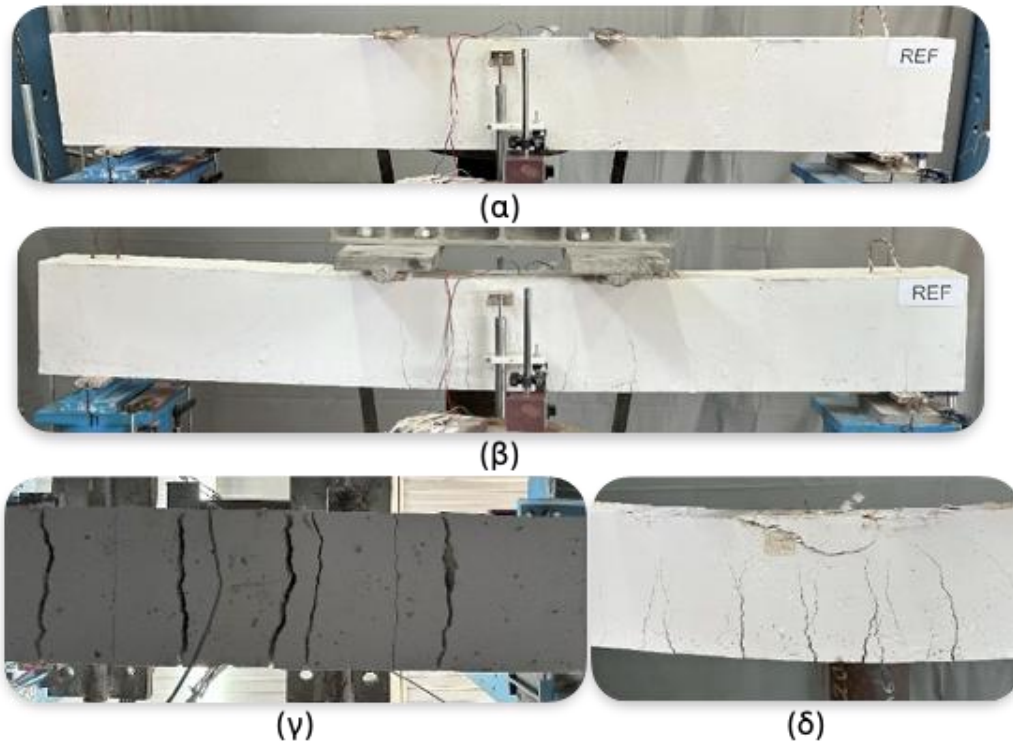
4.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων για κάθε δοκό

4.3.1 Δοκός REF

Στην δοκό REF δεν εφαρμόστηκε κάποια ενίσχυση και χρησιμοποιήθηκε ως δοκός αναφοράς. Στο Σχήμα 4.1 παρατίθεται το διάγραμμα φορτίου- βύθισης της δοκού. Η πρώτη καμπτική ρωγμή φαίνεται να δημιουργήθηκε στα 10,28 kN, με βύθιση στο κέντρο της δοκού ίση με 0,48mm. Ο χάλυβας διέρρευσε στα 54,87 kN, με τη βύθιση σε εκείνο το σημείο να αντιστοιχεί σε 6,46mm. Η καμπτική αστοχία της δοκού επήλθε στα 62,72 kN με βύθιση στο μέσο 20,23mm, ενώ η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $62,72 \text{ kN} / 2 \times 0,46\text{m} = 14,43\text{kNm}$. Η τιμή 0,46m για τον υπολογισμό της ροπής προκύπτει λαμβάνοντας ως καθαρό άνοιγμα το μήκος από το τέλος της στήριξης έως την αρχή της επόμενης και όχι από τα κέντρα τους όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.19. Μετά την αστοχία, το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 61,72 kN. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η αρχική κατάσταση της δοκού και ο τρόπος αστοχίας της.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης για δοκό αναφοράς

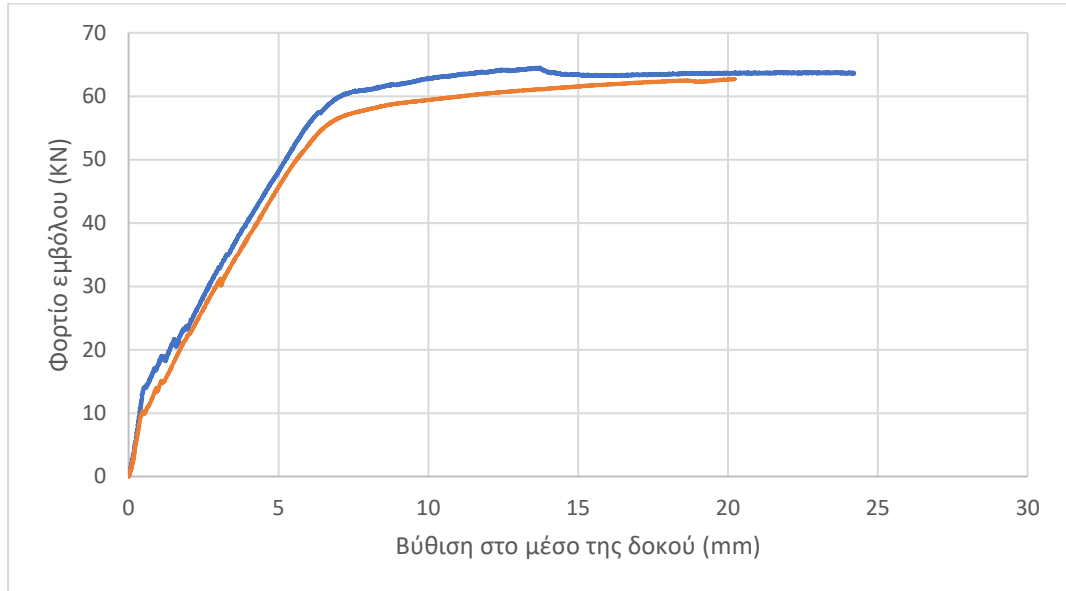


Σχήμα 4.2 (α) Αρχική κατάσταση δοκού REF, (β) Ρηγμάτωση πριν την αστοχία (γ), (δ) Αστοχία δοκού

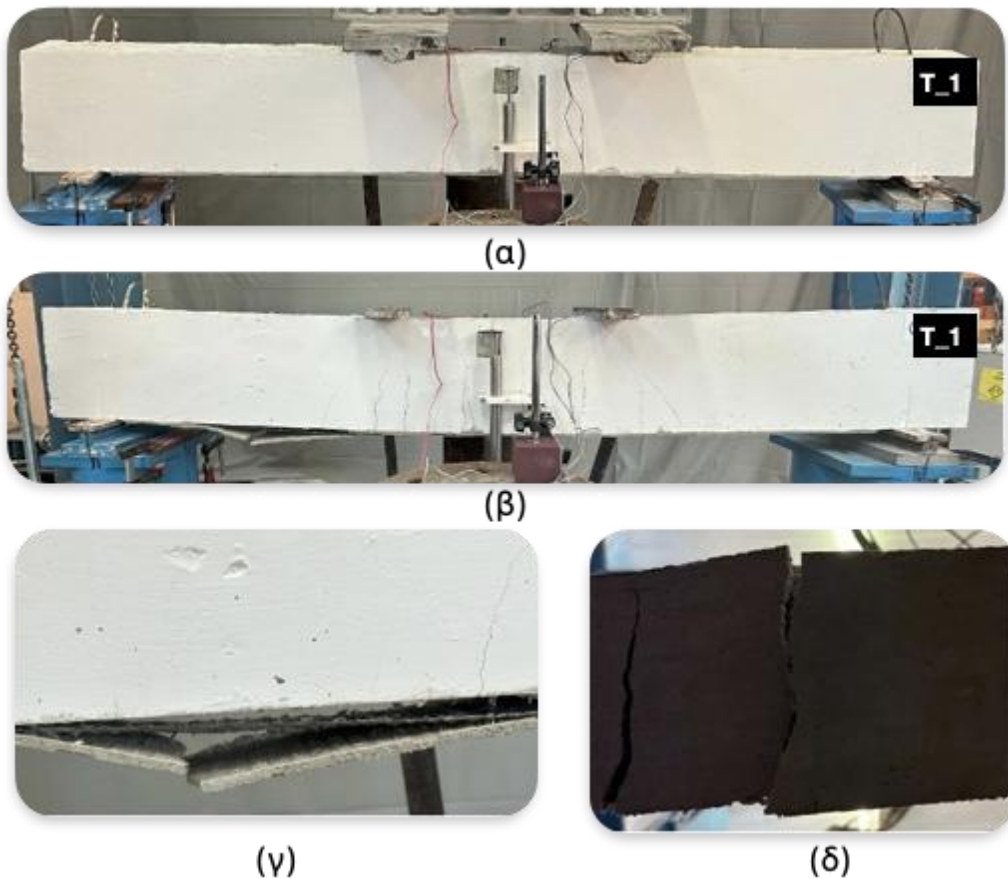
4.3.2 Δοκός T_1

Η δοκός T_1 ενισχύθηκε με μία στρώση πλέγματος και τσιμεντοειδή μήτρα. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-βύθισης της δοκού T_1 (μπλε γραμμή) συγκριτικά με τη δοκό REF (μπλε γραμμή). Η πρώτη ρηγμάτωση παρατηρήθηκε αργότερα σε σχέση με τη δοκό αναφοράς στα 14,12 kN με βύθιση 0,54mm και επέφερε αλλαγή στην κλίση του διαγράμματος. Ο χάλυβας διέρρευσε στα 57,61 kN με βύθιση στο κέντρο της δοκού στα 6,44mm. Η δοκός αστόχησε για φορτίο 64,54 kN με βύθιση σε αυτό το σημείο 13,7mm, ενώ η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $64,54 \text{ kN}/2 \times 0,46\text{m} = 14,84\text{kNm}$. Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε ήταν αποκόλληση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος, η οποία ξεκίνησε από καμπτική ρωγμή περίπου στο κέντρο από τα αριστερά, δηλαδή στην περιοχή επιβολής της μεγαλύτερης καμπτικής ροπής και επεκτάθηκε προς την αριστερή στήριξη. Παράλληλα φάνηκε και αποκόλληση του πλέγματος από τη μήτρα, υποδηλώνοντας κακή συνάφεια πλέγματος-κονιάματος, εκτός από κακή συνάφεια κονιάματος-σκυροδέματος. Αξίζει να σημειωθεί πως και άλλες καμπτικές ρωγμές

είχαν αρχίσει να διαδίδονται οριζόντια, με αποτέλεσμα την έναρξη των αποκολλήσεων και σε άλλα σημεία πριν την αστοχία. Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 4.4.



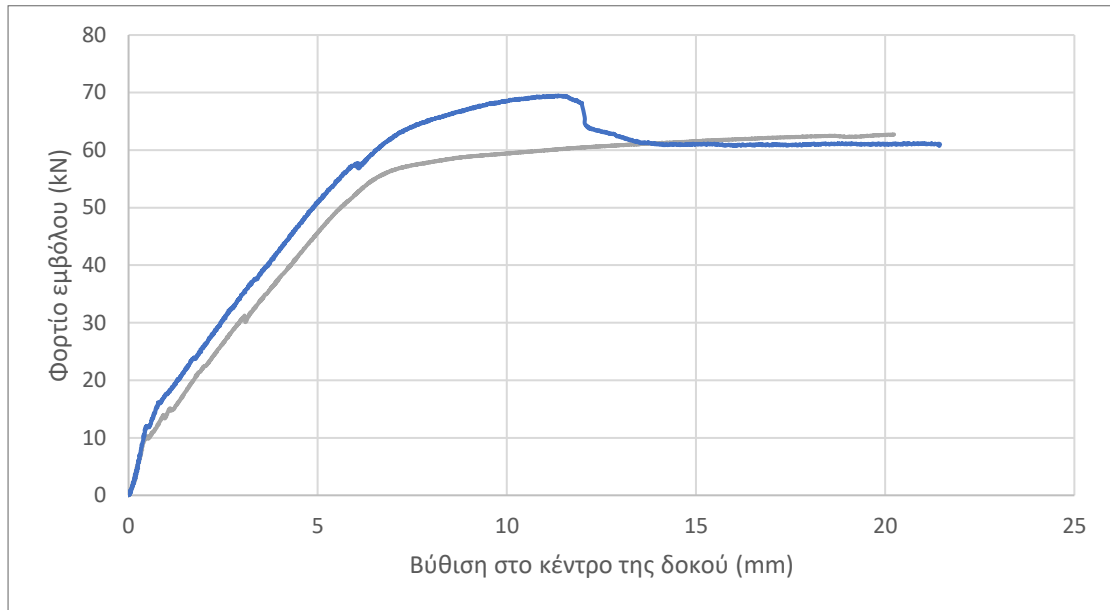
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσο για δοκό T_1



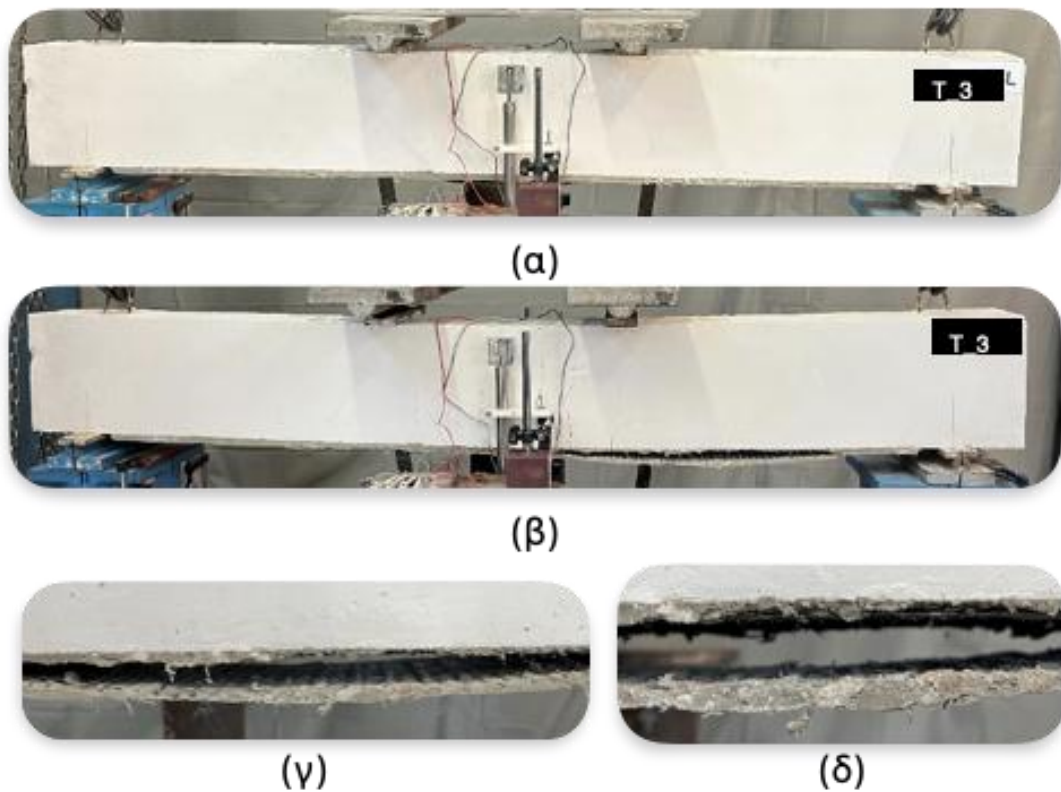
Σχήμα 4.4 (α) Αρχική κατάσταση δοκού T_1 (β),(γ),(δ) Αστοχία δοκού

4.3.3 Δοκός T_3

Το δοκίμιο T_3 ήταν ενισχυμένο με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος άνθρακα και τσιμεντοειδές κονίαμα. Από το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο Σχήμα 4.5 φαίνεται πως το εν λόγω δοκίμιο παρουσίασε την πρώτη καμπτική ρωγμή στα 12,06 kN, ενώ η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 0,47 mm. Αρχικά οι ρωγμές ήταν κάθετες και αραιές στο διάστημα ανάμεσα στα δύο επιβαλλόμενα φορτία και προκάλεσαν μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου κάτι που επαληθεύεται μέσα από το διάγραμμα-δύναμης μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Στη συνέχεια, όταν οι ρωγμές έγιναν πιο έντονες και πιο πυκνές επήλθε η διαρροή του χάλυβα με το φορτίο που ασκήθηκε στη δοκό να ήταν ίσο με 57,23 kN και η βύθιση στο μέσον της δοκού ήταν ίση με 6,02 mm. Η δοκός έλαβε το μέγιστο φορτίο όταν η βύθιση στο μέσον της ήταν ίση με 11,35 mm και η φορτίο ήταν ίσο με 69,49 kN, έχοντας αρκετές καθώς και έντονες ρηγματώσεις. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $69,49 \text{ kN} / 2 \times 0,46\text{m} = 15,98 \text{ kNm}$. Η αστοχία ξεκίνησε από μία καμπτική ρηγμάτωση κοντά στο κέντρο της δοκού, που διαδόθηκε οριζόντια προς τα δεξιά και οδήγησε σε διαστρωματική αποκόλληση, από την οποία φαίνεται η καλή συνάφεια μεταξύ κονιάματος και σκυροδέματος. Ακολούθησε απότομη μια πτώση φορτίου, της τάξεως των 10 kN. Από εκεί και έπειτα, δημιουργήθηκε πλατό και η δοκός παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με τη δοκό αναφοράς, πράγμα αναμενόμενο μιας και έπαψε η συνεισφορά της ενίσχυσης. Η αύξηση των στρώσεων σε τρεις φαίνεται να απέδωσε, καθώς η δοκός παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας σε σχέση με την T_1. Η αρχική κατάσταση της δοκού, καθώς και ο τρόπος αστοχίας της φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



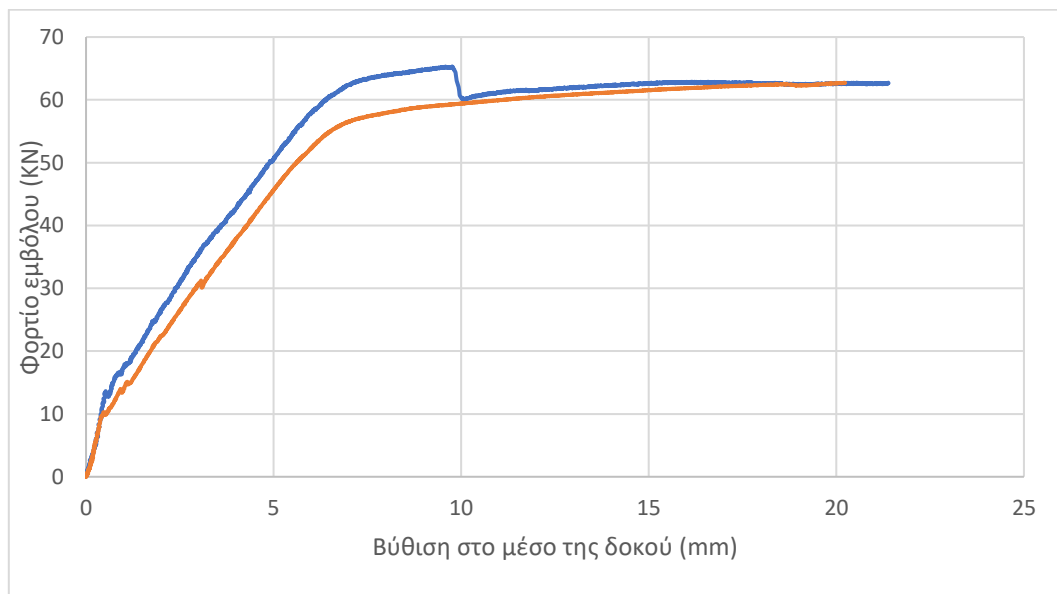
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσο για δοκό T₃



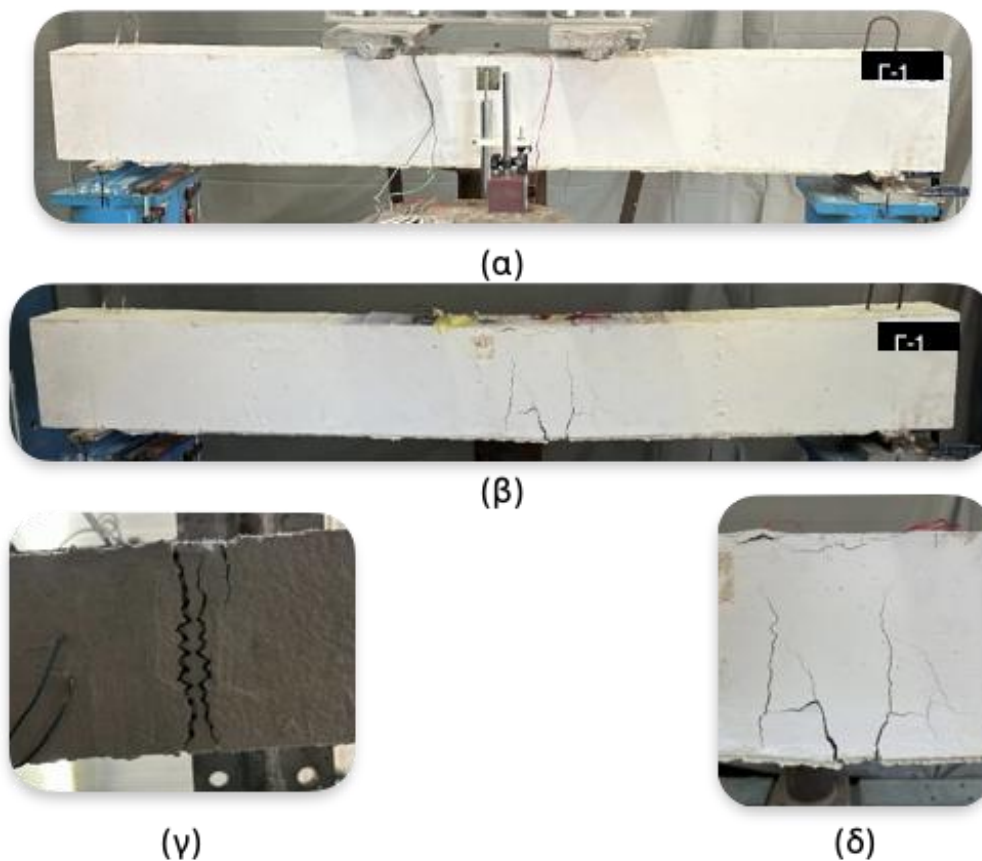
Σχήμα 4.6 (α) Αρχική κατάσταση δοκού T₃ (β),(γ),(δ) Αστοχία δοκού

4.3.4 Δοκός Γ_1

Το δοκίμιο Γ_1 ήταν ενισχυμένο με μια στρώση ινοπλέγματος άνθρακα και κονίαμα γεωπολυμερούς. Από το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο Σχήμα 4.7, φαίνεται πως το εν λόγω δοκίμιο, παρουσίασε την πρώτη καμπτική ρωγμή στα 13,11 kN, ενώ η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 0,55 mm. Αρχικά οι ρωγμές ήταν κάθετες και αραιές στο διάστημα ανάμεσα στα δύο επιβαλλόμενα φορτία και προκάλεσαν μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου κάτι που επαληθεύετε μέσα από το διάγραμμα δύναμης μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Παράλληλα όταν οι ρωγμές έγιναν πιο έντονες και πυκνές, επήλθε η διαρροή του χάλυβα με το φορτίο που ασκήθηκε στη δοκό να ήταν ίσο με 60,62 kN και η βύθιση στο μέσον της δοκού ήταν ίση με 6,47 mm. Η δοκός έλαβε το μέγιστο φορτίο όταν η βύθιση στο μέσον της ήταν ίση με 9,57 mm και η φορτίο ήταν ίσο με 65,30 kN, έχοντας αρκετές και έντονες ρηγματώσεις. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $65,30 \text{ kN} / 2 \times 0,46 \text{ m} = 15,02 \text{ kNm}$. Ο τρόπος αστοχίας αυτής της δοκού διέφερε από τις υπόλοιπες, καθώς αστόχησε λόγω θραύσης των ινών του σύνθετου υλικού. Αυτή η μορφή αστοχίας υποδηλώνει την επίτευξη καλής συνάφειας μεταξύ της ενίσχυσης και του σκυροδέματος, καθώς και μεταξύ πλέγματος και κονιάματος, που είχε ως αποτέλεσμα την εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής του πλέγματος. Τέλος, παρατηρείται μια μικρή σύνθλιψη του σκυροδέματος στο κέντρο της δοκού (Σχ.4.8(δ)). Η αρχική κατάσταση της δοκού, καθώς και ο τρόπος αστοχίας της φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



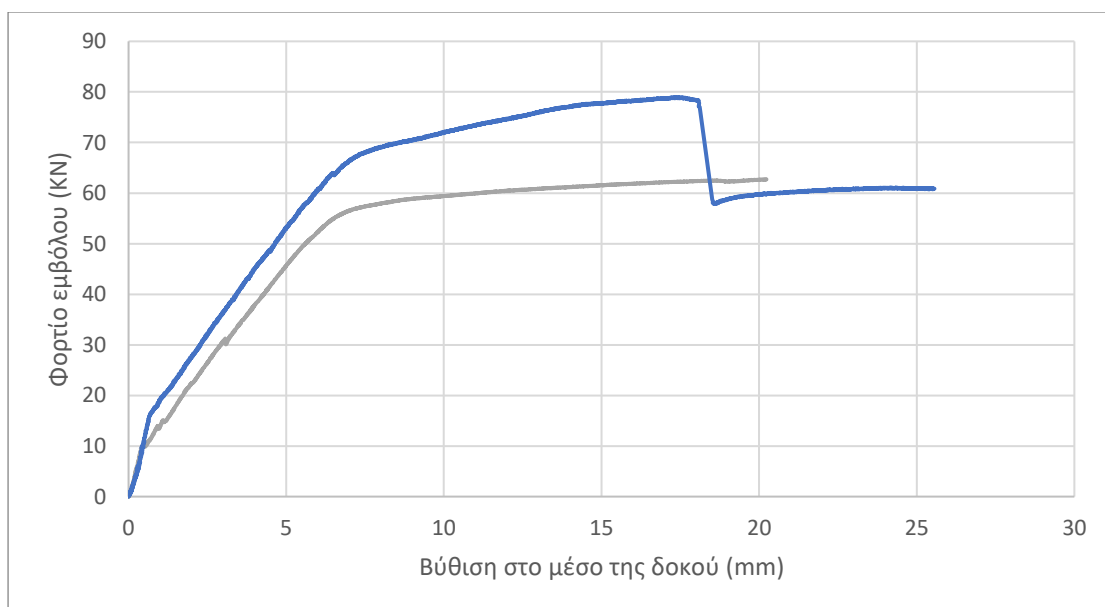
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσο για δοκό Γ_1



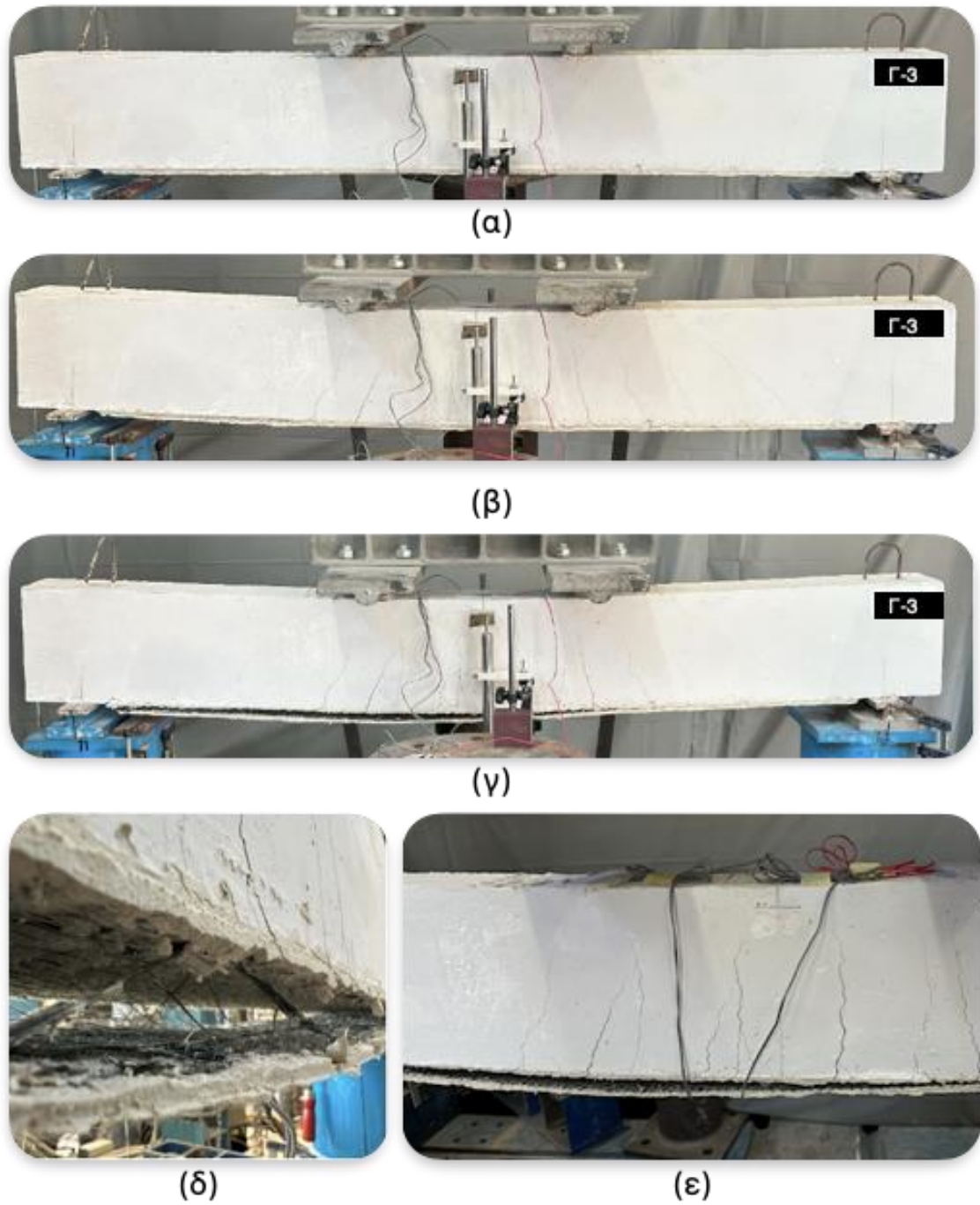
Σχήμα 4.8 (α) Αρχική κατάσταση δοκού Γ_1 , (β),(γ),(δ) Αστοχία δοκού

4.3.5 Δοκός Γ_3

Το δοκίμιο Γ_3 ήταν ενισχυμένο με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος άνθρακα και κονίαμα γεωπολυμερούς. Από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.9, φαίνεται πως το εν λόγω δοκίμιο, παρουσίασε την πρώτη καμπτική ρωγμή στα 15,33 kN ενώ η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 0,63 mm. Αρχικά οι ρωγμές ήταν κάθετες και αραιές στο διάστημα ανάμεσα στα δύο επιβαλλόμενα φορτία και προκάλεσαν μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου, κάτι που επαληθεύεται μέσα από το διάγραμμα δύναμης μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Στη συνέχεια, όταν οι ρωγμές έγιναν πιο έντονες και πιο πυκνές, επήλθε η διαρροή του χάλυβα με το φορτίο που ασκήθηκε στη δοκό να ήταν ίσο με 64,32 kN και η βύθιση στο μέσον της δοκού ήταν ίση με 6,61 mm. Η δοκός έλαβε το μέγιστο φορτίο όταν η βύθιση στο μέσον της ήταν ίση με 17,57 mm και η φορτίο ήταν ίσο με 78,93 kN, το μεγαλύτερο από όλες τις δοκιμαζόμενες δοκούς, έχοντας αρκετές καθώς και έντονες ρηγματώσεις. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $78,93 \text{ kN} / 2 \times 0,46\text{m} = 18,15\text{kNm}$. Η δοκός αστόχησε λόγω διαστρωματικής αποκόλλησης μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης στρώσης πλέγματος, υποδηλώντας καλή συνάφεια της μήτρας με το σκυρόδεμα και κακή συνάφεια με το πλέγμα. Συνοδεύτηκε από απότομη πτώση του φορτίου της τάξης των 20kN. Η αρχική κατάσταση της δοκού καθώς και η μορφή αστοχίας φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



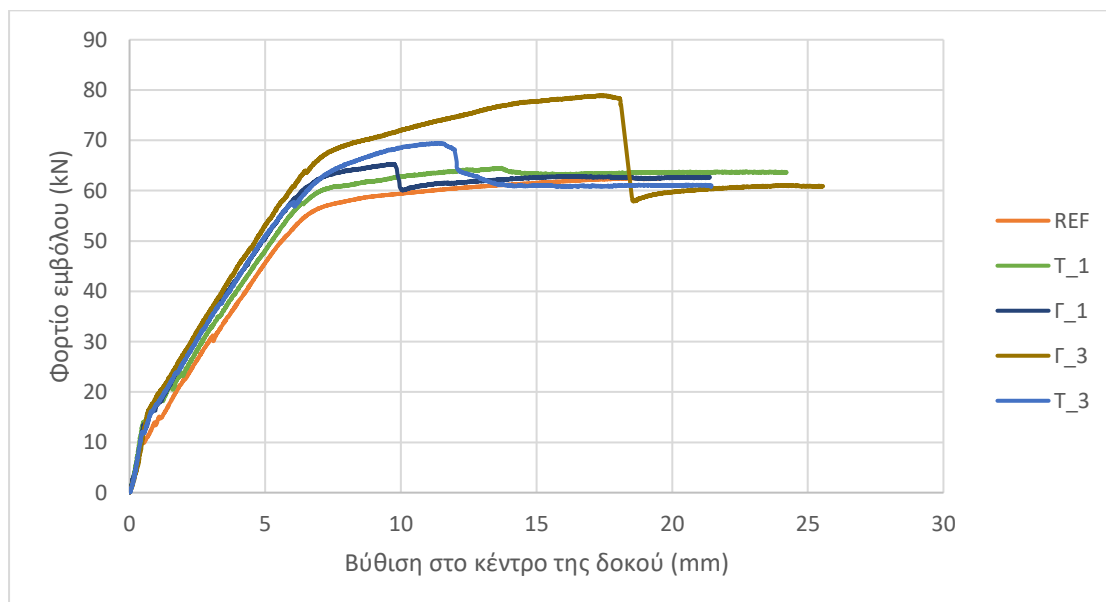
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για δοκό Γ_3



Σχήμα 4.10 (α) Αρχική κατάσταση δοκού Γ_3, (β) Ρηγματώσεις δοκού πριν την αστοχία, (γ), (δ) Αστοχία δοκού

4.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων- Σχολιασμός

Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών συγκριτικά, ώστε να γίνει αντιληπτή επιρροή των διαφορετικών κονιαμάτων και του αριθμού των στρώσεων πλέγματος, σε παραμέτρους όπως η μορφή αστοχίας, το μέγιστο φορτίο, η πλαστιμότητα και η δυσκαμψία. Κάθε φορά θα γίνεται και η σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς REF ώστε να γίνει αντιληπτό το ποσοστό της επίδρασης της ενίσχυσης στις δοκούς. Στο Σχήμα 4.11 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου εμβόλου με βύθιση δοκού στο μέσον όλων των δοκιμών που εξεταστήκαν ώστε να ληφθεί μια γενική εικόνα της συμπεριφοράς τους.



Σχήμα 4.11 Συνολικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο των δοκιμών

Στα πειράματα που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκε τσιμεντοειδές καθώς και κονίαμα γεωπολυμερούς, ενώ οι στρώσεις πλέγματος ήταν μεταξύ μιας και των τριών. Συνεπώς, η ομαδοποίηση των δοκών για τον συγκριτικό σχολιασμό θα γίνει με βάση τις στρώσεις και το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε.

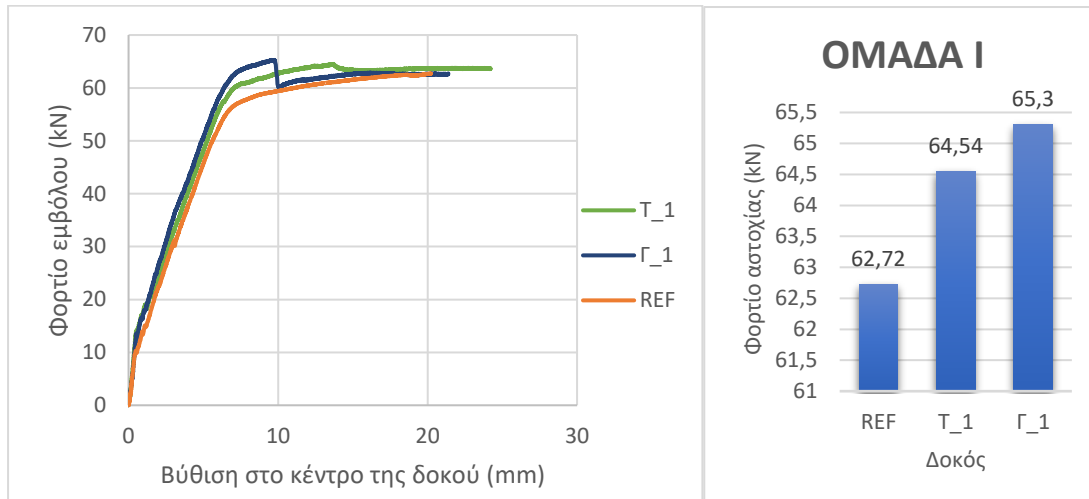
Στο παρακάτω διάγραμμα στο Σχήματος 4.12 παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά της πρώτης ομάδας δοκιμών που ενισχύθηκαν με μία στρώση ινοπλέγματος, ενώ τους εφαρμόστηκε διαφορετικό είδος του κονιαματος. Όπως αναμενόταν, όλα τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν σαφώς βελτιωμένη φέρουσα

ικανότητα συγκριτικά με το μη ενισχυμένο δοκίμιο αναφοράς (REF), γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της εξωτερικής ενίσχυσης με IAM.

Μεταξύ των ενισχυμένων δοκιμίων, καταγράφονται ουσιώδεις διαφορές ως προς τη μηχανική απόδοση, ανάλογα με τον τύπο του κονιάματος. Ειδικότερα, το δοκίμιο που ενισχύθηκε με κονίαμα γεωπολυμερούς εμφάνισε ανώτερη φέρουσα ικανότητα, αναπτύσσοντας υψηλότερες τιμές φορτίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ιδιαίτερα καλή συνάφεια μεταξύ γεωπολυμερούς κονιάματος και ινοπλέγματος, η οποία επέτρεψε την αποτελεσματικότερη ενεργοποίηση της ενίσχυσης. Ωστόσο, η αστοχία του δοκιμίου αυτού συνοδεύτηκε από απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας, χαρακτηριστικό ψαθυρής συμπεριφοράς.

Αντίθετα, το δοκίμιο που ενισχύθηκε με τσιμεντοειδές κονίαμα επέδειξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις πριν την αστοχία, γεγονός που υποδηλώνει πιθανώς αυξημένη πλαστιμότητα. Παρά την ελαφρώς χαμηλότερη μέγιστη αντοχή, η συμπεριφορά του μετά την αστοχία ήταν ηπιότερη, χωρίς απότομη απώλεια φέρουσας ικανότητας. Εντούτοις, παρατηρήθηκε μειωμένη συνάφεια μεταξύ του τσιμεντοειδούς κονιάματος και του ινοπλέγματος, γεγονός που ενδέχεται να εμπόδιζε την πλήρη αξιοποίηση της ενίσχυσης.

Τέλος, μετά την αστοχία του συστήματος ενίσχυσης, όλα τα δοκίμια εμφάνισαν συγκρίσιμη υπολειπόμενη φέρουσα ικανότητα, η οποία προσεγγίζει εκείνη του δοκιμίου αναφοράς. Ο παραπάνω σχολιασμός προκύπτει από την εξέταση των διαγραμμάτων στου Σχήμα 4.12, καθώς και από την οπτική εξέταση των δοκιμίων κατά τη διεξαγωγή του πειράματος που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.4 και 4.8.



Σχήμα 4.12 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς Γ_1 , T_1 , REF και φορτία αστοχίας

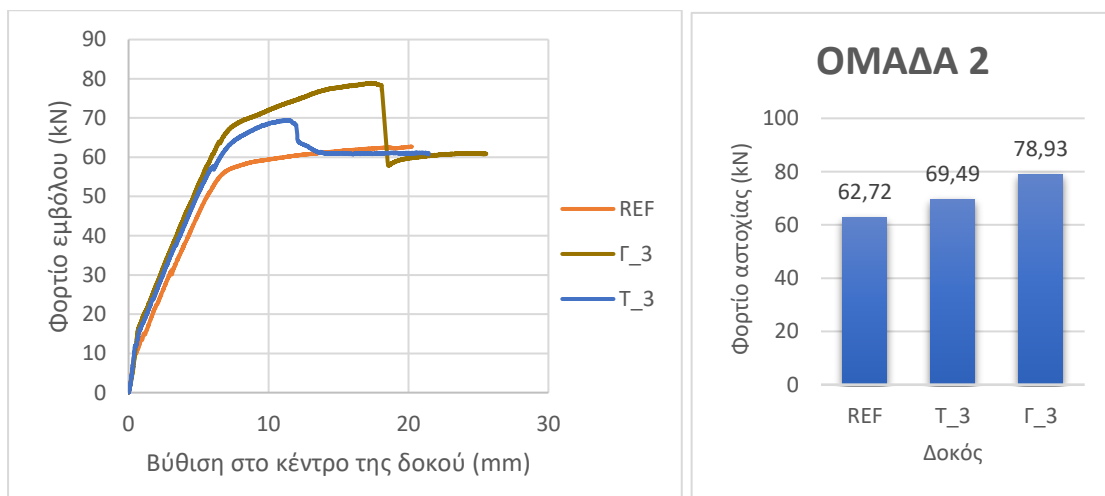
Στο παρακάτω διάγραμμα στου Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η καμπτική συμπεριφορά της δεύτερης ομάδας δοκιμών, τα οποία ενισχύθηκαν με τρεις στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα, ενώ μεταβλητός παρέμεινε ο τύπος του κονιάματος. Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-βύθισης, όλα τα ενισχυμένα δοκίμια επέδειξαν σημαντικά βελτιωμένη φέρουσα ικανότητα έναντι της μη ενισχυμένης δοκού αναφοράς (REF), κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.

Ωστόσο, αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις καταγράφηκαν μεταξύ του δοκιμίου με τσιμεντοειδές κονίαμα και εκείνου με γεωπολυμερές. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο με γεωπολυμερές κονίαμα εμφάνισε υψηλότερη μέγιστη αντοχή και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς φορτίου, γεγονός που είχε διαπιστωθεί και στην αντίστοιχη ομάδα με μία στρώση IAM. Το δοκίμιο με τσιμεντοειδές κονίαμα εμφάνισε πρόωρη αστοχία, συνοδευόμενη από μικρότερες παραμορφώσεις κατά την κρίσιμη φάση αστοχίας, γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη πλαστιμότητα.

Επιπλέον, η αποκόλληση του IAM στο δοκίμιο με τσιμεντοειδές κονίαμα δηλώνει φτωχή συνάφεια μεταξύ του υφάσματος και του υποστρώματος, οδηγώντας σε πρόωρη αποκόλληση και αδυναμία πλήρους αξιοποίησης της αντοχής των ινών. Αντίθετα, το γεωπολυμερές κονίαμα διασφάλισε καλύτερη συνάφεια με το σκυρόδεμα, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη εμπλοκή του ινοπλέγματος στη φέρουσα ικανότητα του στοιχείου. Η τελική αστοχία στο Γ_3, σημειώθηκε με

απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας, κοντά στα 20 kN. υποδεικνύοντας ότι η ενίσχυση λειτούργησε έως την πλήρη ενεργοποίησή της.

Μετά την αστοχία του IAM και στις δύο περιπτώσεις, η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμών συγκλίνει με εκείνη της δοκού αναφοράς, καταδεικνύοντας ότι το φέρον σύστημα επανήλθε στην αρχική, μη ενισχυμένη του κατάσταση. Ο παραπάνω σχολιασμός προκύπτει από την εξέταση των διαγραμμάτων στο Σχήμα 4.13, καθώς και από την οπτική εξέταση των δοκιμών κατά τη διεξαγωγή του πειράματος που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.6 και 4.10.



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς Γ_3 , T_3 , REF και φορτία αστοχίας

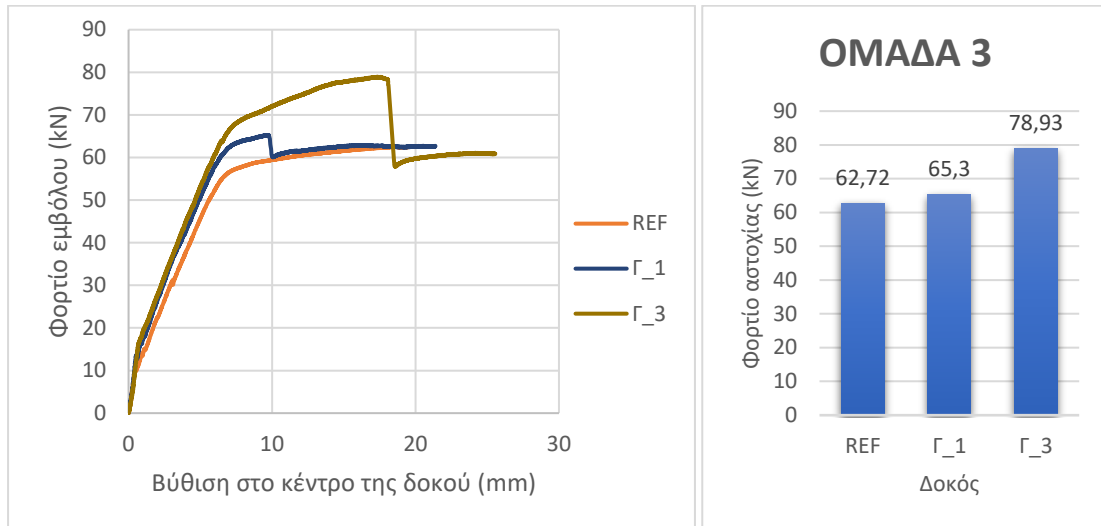
Στο παρακάτω διάγραμμα στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά της τρίτης ομάδας δοκιμών, τα οποία ενισχύθηκαν με διαφορετικό αριθμό στρώσεων υφάσματος ινών άνθρακα (IAM) και κονίαμα γεωπολυμερούς. Όπως αναμενόταν, και τα δύο ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν αισθητά αυξημένη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με τη δοκό αναφοράς (REF), επιβεβαιώνοντας τη θετική επίδραση της εξωτερικής ενίσχυσης.

Το δοκίμιο Γ1, το οποίο ενισχύθηκε με μία στρώση IAM, πέτυχε μέγιστο φορτίο 65,3 kN, τιμή ελαφρώς ανώτερη από εκείνη της δοκού αναφοράς. Μετά την κορυφή της καμπύλης, καταγράφηκε απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας στα 60 kN, με συνολική βύθιση 10 mm κατά τη φάση της αστοχίας. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει ελαφρώς αυξημένη αντοχή. Παρ' όλα αυτά, κατά την οπτική επιθεώρηση, το δοκίμιο Γ1 φάνηκε να διαθέτει ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ της γεωπολυμερικής μήτρας και του IAM, γεγονός που επέτρεψε στο ύφασμα να συμμετάσχει ενεργά στη μεταφορά φορτίων έως τη φάση αστοχίας.

Το δοκίμιο Γ3, το οποίο ενισχύθηκε με τρεις στρώσεις IAM, πέτυχε σαφώς καλύτερη απόδοση, με μέγιστο φορτίο 78,9 kN και αυξημένη βύθιση 17 mm, γεγονός που υποδεικνύει μεγαλύτερη πλαστιμότητα. Ωστόσο, μετά την αστοχία σημειώθηκε απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας στα 58 kN, χαρακτηριστικό έντονα ψαθυρής αστοχίας. Η απότομη αυτή πτώση, σε συνδυασμό με οπτικές ενδείξεις τοπικής αποκόλλησης, υποδηλώνει περιορισμένη συνάφεια μεταξύ του κονιάματος κονιάματος και της επιφάνειας του σκυροδέματος, γεγονός που δεν επέτρεψε την πλήρη αξιοποίηση της μηχανικής αντοχής του ινοπλέγματος.

Μετά την αστοχία της εξωτερικής ενίσχυσης (σε αμφότερες τις περιπτώσεις), παρατηρήθηκε σύγκλιση της συμπεριφοράς των ενισχυμένων δοκιμών προς εκείνη της μη ενισχυμένης δοκού αναφοράς, κάτι που υποδεικνύει την πλήρη απώλεια της συμβολής του IAM στο φέρον σύστημα.

Ο παραπάνω σχολιασμός προκύπτει από την εξέταση των διαγραμμάτων του σχήματος 4.14, καθώς και από την οπτική εξέταση των δοκιμών κατά τη διεξαγωγή του πειράματος που παρουσιάζονται στα σχήματα 4.8 και 4.10.



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς Γ_1 , Γ_3 , REF και φορτία αστοχίας

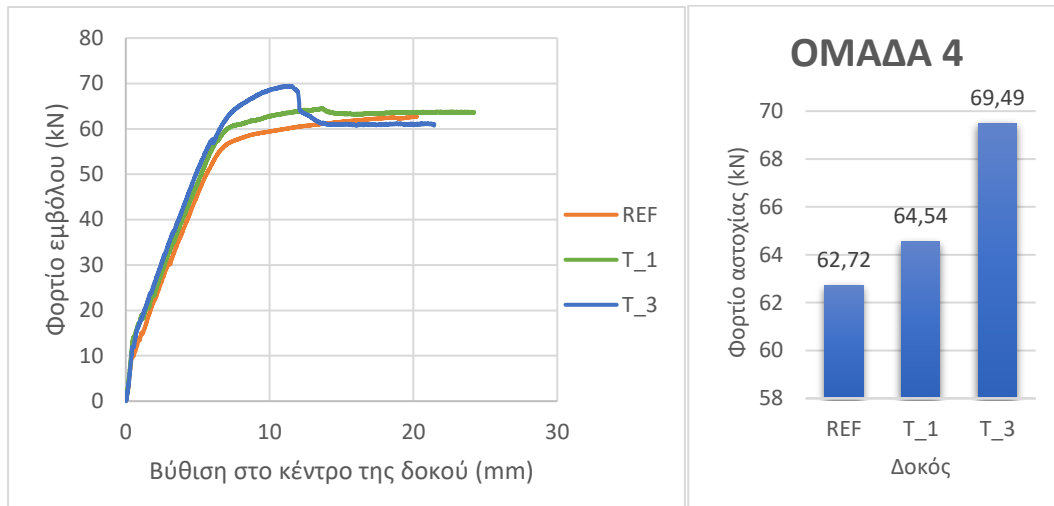
Το ακόλουθο διάγραμμα στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζει τη μηχανική απόκριση της τέταρτης ομάδας δοκιμών, τα οποία ενισχύθηκαν με τσιμεντοειδές κονίαμα, διαφοροποιούμενα ως προς τον αριθμό των στρώσεων του υφάσματος. Όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα, και τα δύο ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν αυξημένη φέρουσα ικανότητα συγκριτικά με τη δοκό αναφοράς (REF), επιβεβαιώνοντας τη θετική συμβολή της εξωτερικής ενίσχυσης στην αντοχή.

Ειδικότερα, το δοκίμιο T_1 (με μία στρώση IAM) ανέπτυξε μέγιστο φορτίο 64,5 kN, ελαφρώς υψηλότερο από εκείνο της μη ενισχυμένης δοκού. Η καμπύλη φορτίου-βύθισης του δοκιμίου παρουσίασε σταδιακή μείωση της φέρουσας ικανότητας μετά το μέγιστο σημείο, καταγράφοντας τελική βύθιση 14 mm. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ενεργό εμπλοκή του IAM έως την αστοχία.

Αντίθετα, το δοκίμιο T_3 (με τρεις στρώσεις IAM) κατέγραψε ανώτερη μέγιστη φέρουσα ικανότητα 69,5 kN. Ωστόσο, μετά την κορύφωση της καμπύλης, σημειώθηκε απότομη πτώση του φορτίου στα 60 kN, φαινόμενο που υποδηλώνει σχετικά απότομη αστοχία. Η μέγιστη βύθιση που καταγράφηκε ήταν 12 mm παρά την αυξημένη αντοχή.

Και στα δύο δοκίμια, παρατηρήθηκε περιορισμένη συνάφεια μεταξύ της τσιμεντοειδούς μήτρας και του IAM, γεγονός που εμπόδισε την πλήρη αξιοποίηση της φέρουσας ικανότητας του υφάσματος ενίσχυσης. Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από τη μορφή της καμπύλης μετά την αστοχία όσο και από την οπτική εξέταση κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Τέλος, μετά την αποκόλληση ή αστοχία της εξωτερικής ενίσχυσης, όλα τα ενισχυμένα δοκίμια συγκλίνουν σε φέρουσα ικανότητα με τη δοκό αναφοράς, ακολουθώντας παρόμοια μηχανική συμπεριφορά κατά την τελική φάση της φόρτισης. Ο παραπάνω σχολιασμός προκύπτει από την εξέταση των διαγραμμάτων στο Σχήμα 4.15, καθώς και από την οπτική εξέταση των δοκιμών κατά τη διεξαγωγή του πειράματος που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.4 και 4.6.



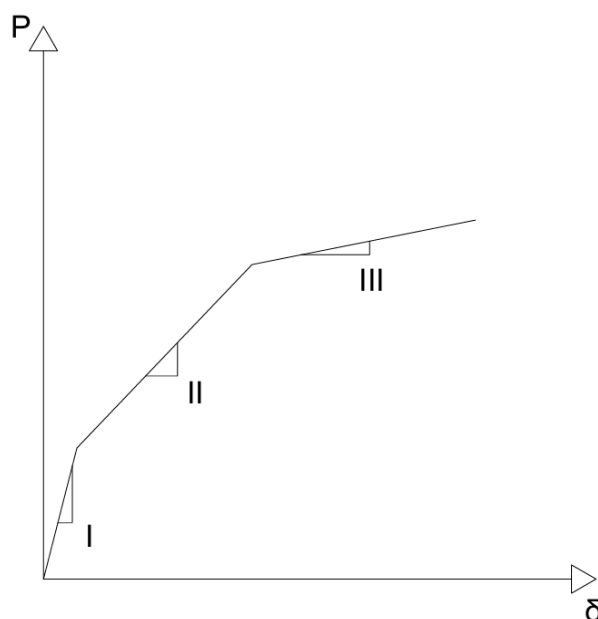
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο κέντρο για τις δοκούς T_1 , T_3 , REF και φορτία αστοχίας

4.5 Σχολιασμός και σύγκριση των δυσκαμψιών

Σε αυτή την ενότητα σχολιάζονται και συγκρίνονται οι δυσκαμψίες των δοκών. Η δυσκαμψία σε ένα διάγραμμα φορτίου- βύθισης υπολογίζεται εύκολα από την κλίση. Το διάγραμμα χωρίζεται σε τρεις διακριτούς κλάδους που φαίνονται στο Σχ. 4.16 και με την παραδοχή που έγινε ότι το διάγραμμα έχει γραμμική κατανομή, υπολογίστηκε η τιμή της δυσκαμψίας για κάθε στάδιο ξεχωριστά με τις τιμές που προέκυψαν να παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Το Στάδιο I εκφράζει τη δυσκαμψία μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ρηγμάτωσης. Το Στάδιο II λαμβάνεται μέχρι τη διαρροή του χάλυβα και στην καμπτική αντίσταση συνεισφέρουν τόσο ο χαλύβδινος οπλισμός του κάτω πέλματος όσο και το σύστημα ενίσχυσης. Τέλος, το Στάδιο III, λαμβάνεται μέχρι την αστοχία της ενίσχυσης και εφόσον έχει διαρρεύσει ο χάλυβας στο κάτω πέλμα, στην καμπτική αντίσταση συνεισφέρει κυρίως το σύστημα της ενίσχυσης.

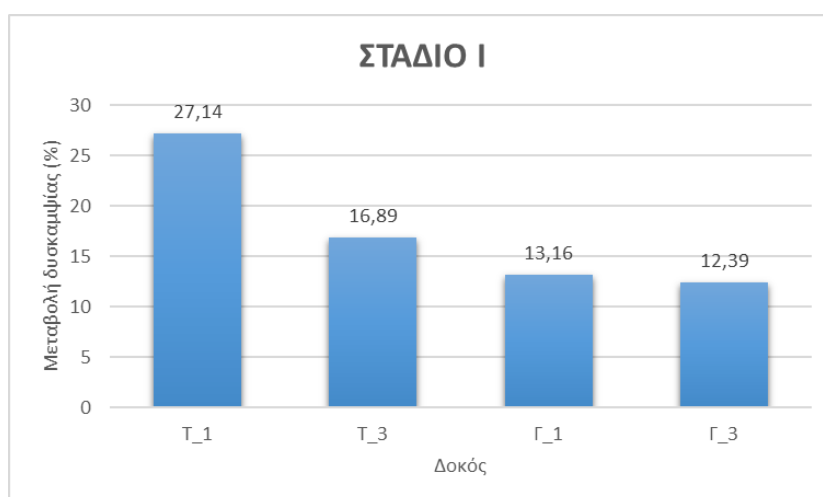
Πίνακας 4.1 Τιμές της δυσκαμψίας σε κάθε στάδιο

Δυσκαμψία (kN/mm)			
Δοκός	Στάδιο I	Στάδιο II	Στάδιο III
REF	21,96	7,69	0,38
T_1	27,92	7,7	0,74
T_3	25,67	8,25	1,46
Γ_1	24,85	8,08	1,32
Γ_3	24,68	8,32	1,22

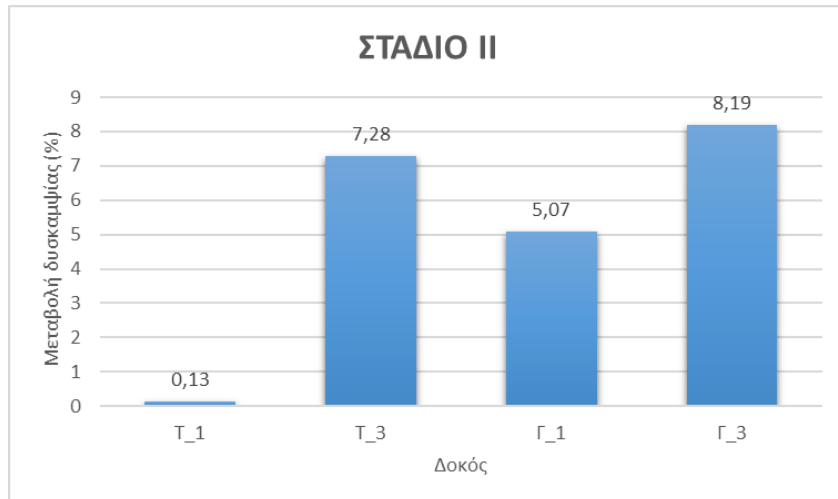


Σχήμα 4.16 Στάδια δυσκαμψίας σε 3-γραμμικό διάγραμμα φορτίου βύθισης

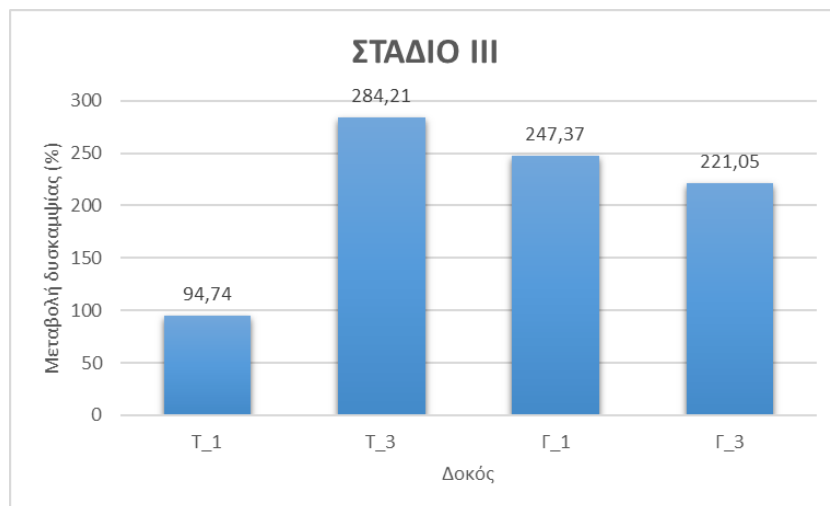
Παρακάτω σχολιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της δυσκαμψίας των δοκών σε σύγκριση με τη δοκό αναφοράς στα τρία στάδια μέσω συγκριτικών ραβδογραμμάτων. Τα ραβδογράμματα αυτά παρατίθενται παρακάτω στα Σχήματα 4.17, 4.18, 4.19.



Σχήμα 4.17 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας στο στάδιο Ι



Σχήμα 4.18 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας στο στάδιο II



Σχήμα 4.19 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας στο στάδιο III

4.5.1 Δυσκαμψία δοκού T_1

Η δοκός T_1 στο στάδιο II παρουσιάζει μόλις 0,13% αύξηση δυσκαμψίας σε σχέση με τη δοκό "REF" πράγμα αναμενόμενο αφού οι κλίσεις των δύο καμπυλών στο διάγραμμα φορτίου-βύθισης σχεδόν ταυτίζονται. Στο στάδιο III, η δυσκαμψία της ανέρχεται στο 94,74%, το οποίο είναι το μικρότερο ποσοστό από όλες τις εξεταζόμενες δοκούς. Παρόλη την αύξηση της δυσκαμψίας στο στάδιο III, το φορτίο αντοχής που έφτασε τα 64,54 kN, δεν ξεπέρασε ιδιαίτερα αυτό της δοκού REF στα

62,72 kN. Από την αποκόλληση της ενίσχυσης από το σκυρόδεμα καταλαβαίνουμε ότι η ενεργοποίηση του συστήματος της ενίσχυσης ήταν μικρή.

4.5.2 Δυσκαμψία δοκού T_3

Η δοκός T_3 στο στάδιο II παρουσιάζει 7,28% αύξηση δυσκαμψίας σε σχέση με τη δοκό REF, δείχνοντας πως η τοποθέτηση τριών πλεγμάτων ανθρακονήματων αυξάνει σημαντικά την δυσκαμψία σε σχέση με το ένα. Στο στάδιο III η αύξηση αγγίζει 284,21%, η οποία είναι και η μεγαλύτερη αύξηση που καταγράφεται σε όλες τις εξεταζόμενες δοκούς. Και σε αυτό το στάδιο φαίνεται πως η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πλέγματος είχε ευεργετική επίδραση στη δυσκαμψία.

4.5.3 Δυσκαμψία δοκού Γ_1

Η δοκός Γ_1 στο στάδιο II παρουσιάζει 5,07% αύξηση δυσκαμψίας σε σχέση με τη δοκό REF, ενώ στο στάδιο III 247,37%. Σε σύγκριση με την δοκό T_1 που είναι επίσης ενισχυμένη με μία στρώση πλέγματος, η Γ_1 παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές δυσκαμψίας και στα δύο στάδια. Από την θραύση των ινών ως μηχανισμό αστοχίας επιβεβαιώνεται η πλήρης ενεργοποίηση του συστήματος της ενίσχυσης.

4.5.4 Δυσκαμψία δοκού Γ_3

Η δοκός Γ_3 στο στάδιο II παρουσιάζει 8,19% αύξηση δυσκαμψίας σε σχέση με τη δοκό REF, ενώ στο στάδιο III 221,05%. Παρόλο που η προσθήκη τριών στρώσεων έναντι μίας δίνει μεγαλύτερη δυσκαμψία στο στάδιο II, δεν ισχύει το ίδιο και στο στάδιο III, όπου η τιμή της δοκού Γ_1, ενισχυμένης με μία στρώση είναι μεγαλύτερη. Σε σύγκριση με την επίσης ενισχυμένη με τρεις στρώσεις πλέγματος, δοκό T_3, η δυσκαμψία της Γ_3 στο στάδιο III είναι μικρότερη.

4.6 Ανάλυση διατομής

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των τιμών της παραμόρφωσης αστοχίας του σύνθετου υλικού (ϵ_f) και της ενεργού τάσης (σ_f). Έπειτα η ενεργός τάση συγκρίνεται με την τάση θραύσης ινών όπως δίνεται από τον κατασκευαστή και υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας του υλικού. Στους υπολογισμούς δεν λαμβάνονται υπόψιν αρχικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος. Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα Excel.

Πρώτο βήμα των υπολογισμών αποτέλεσε η εισαγωγή των τιμών των απαραίτητων δεδομένων που αφορούσαν :

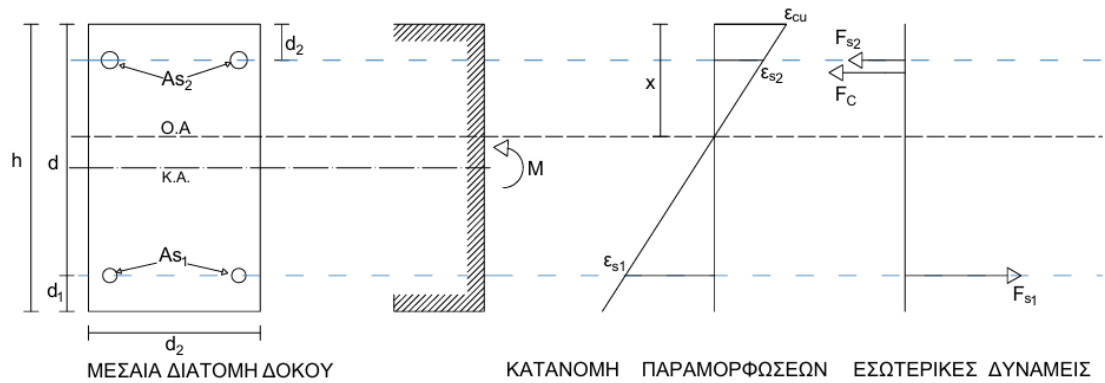
1. Την γεωμετρία της διατομής:
 - Στατικό ύψος (d)
 - Συνολικό ύψος (h)
 - Πλάτος (b)
 - Απόσταση κέντρου βάρους διατομής εφελκυσμένου χάλυβα από την ακραία εφελκυσόμενη ίνα (d_1).
 - Απόσταση κέντρου βάρους διατομής θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα (d_2).
2. Τις ιδιότητες των υλικών:
 - Τάση διαρροής χάλυβα οπλισμού (f_y)
 - Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα οπλισμού (E_s)
 - Θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (f_c)
 - Συνολικό εμβαδόν του σύνθετου υλικού (A_f)
 - Μέτρο ελαστικότητας των ινών του πλέγματος του σύνθετου υλικού (E_f)
3. Τα εμβαδά των άνω και κάτω διαμήκων οπλισμών (A_{s1}, A_{s2})
4. Η τιμή της πειραματικής ροπής αστοχίας ($M_{πειρ}$)

Η πρώτη δοκός προς ανάλυση είναι η δοκός αναφοράς, μία μη ενισχυμένη δοκός. Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται η γεωμετρία της διατομής, καθώς και οι κατανομές των παραμορφώσεων και εσωτερικών τάσεων, μεγέθη μέσα από τα οποία με απλούς υπολογισμούς εξάγονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για τον υπολογισμό των ζητούμενων τιμών. Η αστοχία που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση είναι η σύνθλιψη του σκυροδέματος με την παραμόρφωση αστοχίας να λαμβάνεται ίση με την οριακή δηλαδή $\varepsilon_c=0,0035$. Με την τιμή αυτή γνωστή υπολογίζονται εύκολα οι παραμορφώσεις του θλιβόμενου αλλά και εφελκυσμένου χάλυβα, ε_{s2} και ε_{s1} αντίστοιχα (Εξ. 4.1), καθιστώντας εφικτή την εύρεση των τάσεων του χάλυβα f_{s1} και f_{s2} με δεδομένο τα μέτρο ελαστικότητας E_s και εν συνεχεία των εσωτερικών δυνάμεων του χάλυβα και του σκυροδέματος F_{s1} , F_{s2} , F_c .

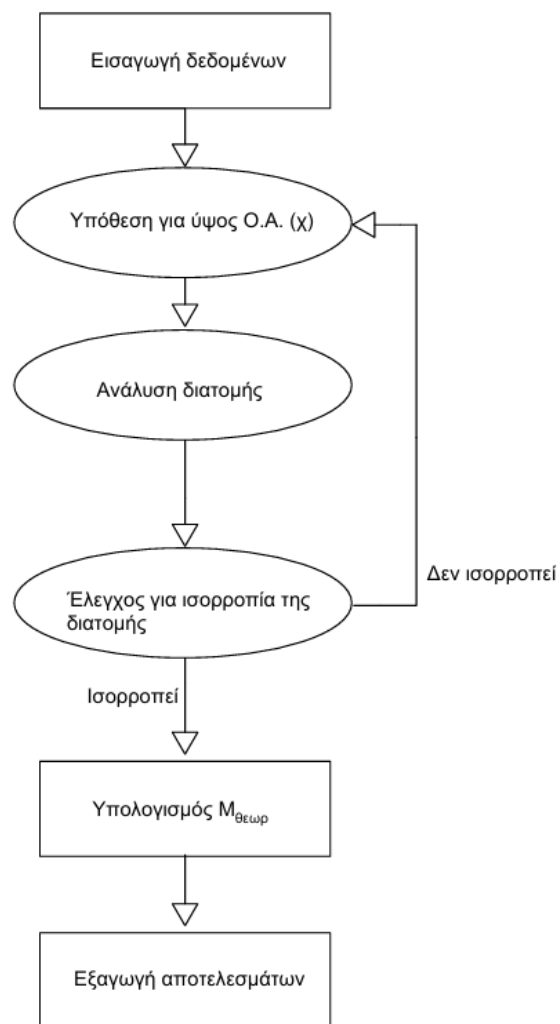
$$\begin{aligned} \bullet \quad \varepsilon_{s1} &= \varepsilon_c (d - x)/x \\ & \text{(Εξ. 4.1)} \\ \bullet \quad \varepsilon_{s2} &= \varepsilon_c (x - d_2)/x \end{aligned}$$

Από την εξίσωση ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων (Εξ. 4.2) εντοπίζεται το ύψος x (mm) του ουδέτερου άξονα. Με τον υπολογισμό των παραπάνω δεδομένων, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της ροπής αντοχής $M_{\theta\epsilon\omega\rho}$ από την εξίσωση 4.3. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας δημιουργήθηκε διάγραμμα ροής δείχνοντας αναλυτικά τη σειρά των υπολογισμών (Σχ. 4.21).

$$\begin{aligned} \bullet \quad 0,8 \times f_c \times b \times x + A_{s2} \times f_{s2} &= A_{s1} \times f_{s1}, x > d_2 \\ & \text{(Εξ. 4.2)} \\ \bullet \quad 0,8 \times f_c \times b \times x &= A_{s1} \times f_{s1} + A_{s2} \times f_{s2}, x < d_2 \\ \bullet \quad M_{\theta\epsilon\omega\rho} &= A_{s1} \times f_{s1} \times (d - \delta_G x) + A_{s2} \times f_{s2} \times (\delta_G x - d_2), \delta_G = 0,4 \\ & \text{(Εξ. 4.3)} \end{aligned}$$



Σχήμα 4.20 Λεπτομέρειες διατομής δοκού, κατανομή παραμορφώσεων, εσωτερικές δυνάμεις στη δοκό αναφοράς



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα ροής των πράξεων για τον υπολογισμό της ενεργού τάσης στη δοκό αναφοράς

Για τις υπόλοιπες ενισχυμένες δοκούς, η διαδικασία ανάλυσης διατομής και υπολογισμού της καμπτικής ροπής είναι πιο πολύπλοκη. Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται η γεωμετρία της διατομής, καθώς και οι κατανομές των παραμορφώσεων και εσωτερικών τάσεων, μεγέθη μέσα από τα οποία με απλούς υπολογισμούς εξάγονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για τον υπολογισμό των ζητούμενων τιμών. Με πλέον άγνωστη την παραμόρφωση του σκυροδέματος (ε_c), εισάγεται στους υπολογισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω, μία ακόμα επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση της παραμόρφωσης (ε_f) του σύνθετου υλικού της ενίσχυσης. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων, δίνεται μία τιμή στην παραμόρφωση του σύνθετου υλικού (ε_f) και από την Εξ. 4.4 βρίσκεται η παραμόρφωση του σκυροδέματος (ε_c). Οι συντελεστές ψ και δ_G βρίσκονται από τις Εξ. 4.7 και 4.8 αντίστοιχα, για την τιμή της παραμόρφωσης του σκυροδέματος που προέκυψε προηγουμένως. Στη συνέχεια, με τη ίδια διαδικασία και τις Εξ. 4.1, 4.4, υπολογίζεται μία τιμή για τη θέση του ουδέτερου άξονα για την οποία η διατομή με βάση την Εξ. 4.5 ισορροπεί. Ακολουθεί υπολογισμός της $M_{\theta\omega\rho}$ (Εξ.4.6) και πραγματοποιείται έλεγχος ισότητας με την $M_{\pi\epsilon\iota\rho}$. Αν ο έλεγχος ικανοποιείται τότε η τιμή της παραμόρφωσης του σύνθετου υλικού που τέθηκε στην αρχή της διαδικασίας ήταν η πραγματική. Σε περίπτωση μη επαλήθευσης του ελέγχου οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται με διαφορετική τιμή ε_f , μέχρι να βρεθεί η τιμή για την οποία θα ισχύει $M_{\theta\omega\rho}=M_{\pi\epsilon\iota\rho}$. Και σε αυτήν την περίπτωση για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας δημιουργήθηκε διάγραμμα ροής, δείχνοντας αναλυτικά τη σειρά των υπολογισμών (Σχ. 4.23).

$$\bullet \quad \varepsilon_f = \varepsilon_c(h - x)/x \quad (\text{Εξ.4.4})$$

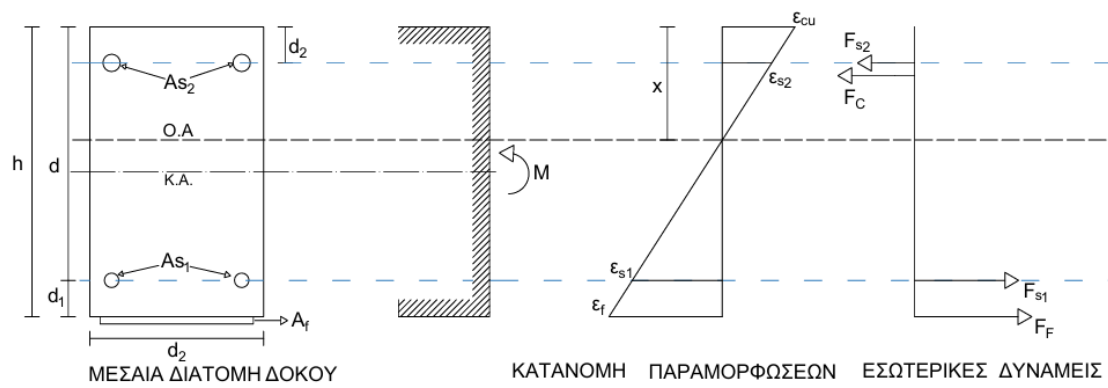
$$\bullet \quad \psi \times f_c \times b \times x + A_{s2} \times f_{s2} = A_{s1} \times f_{s1} + A_f \times \sigma_f, x > d_2 \quad (\text{Εξ. 4.5})$$

$$\bullet \quad \psi \times f_c \times b \times x = A_{s1} \times f_{s1} + A_{s2} \times f_{s2} + A_f \times \sigma_f, x < d_2$$

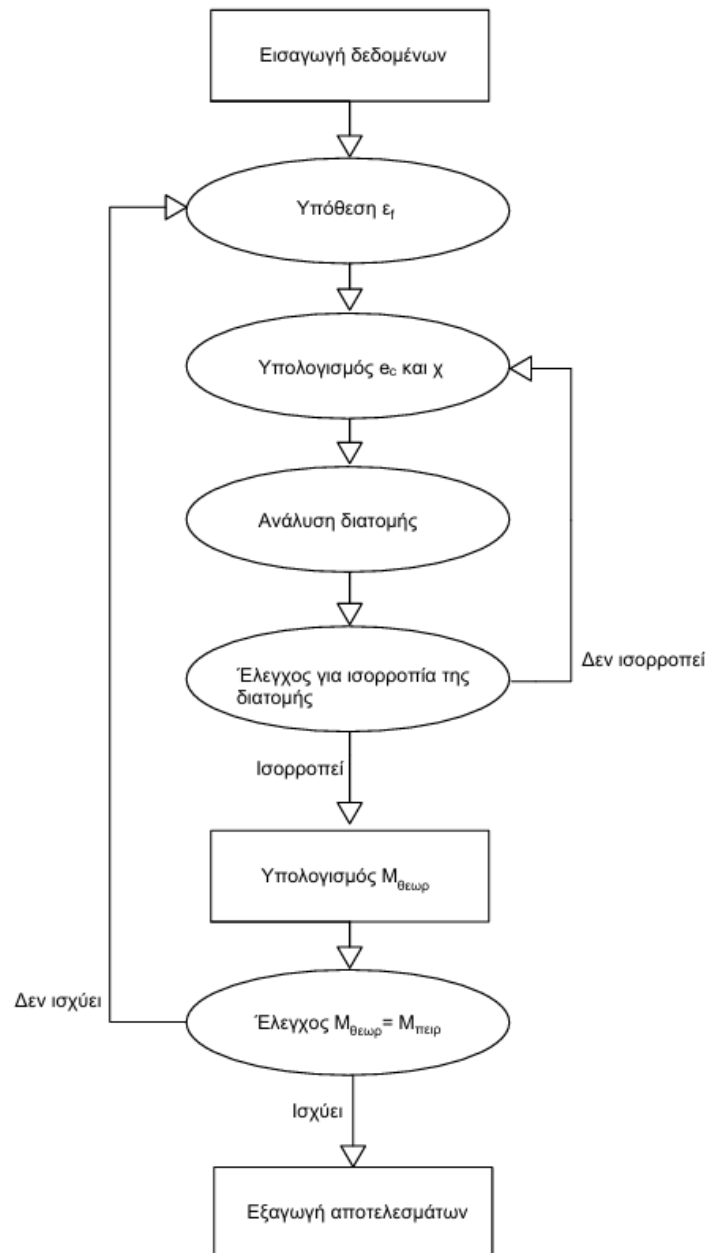
$$\bullet \quad M_{\theta\omega\rho} = A_{s1} \times f_{s1} \times (d - \delta_G x) + A_{s2} \times f_{s2} \times (\delta_G x - d_2) + A_f \times \sigma_f \times (h - \delta_G x) \quad (\text{Εξ. 4.6})$$

$$\bullet \quad \psi = \begin{cases} 1000 \times \varepsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12} * \varepsilon_c \right), & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c}, & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

$$\bullet \quad \delta_G = \begin{cases} 8 - \frac{1000\varepsilon_c}{4(6-1000\varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-4)+2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-2)}, & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 4.8})$$



Σχήμα 4.22 Λεπτομέρειες διατομής δοκού, κατανομή παραμορφώσεων, εσωτερικές δυνάμεις στις ενισχυμένες δοκούς



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα ροής των πράξεων για τον υπολογισμό της ενεργού τάσης στις ενισχυμένες δοκούς

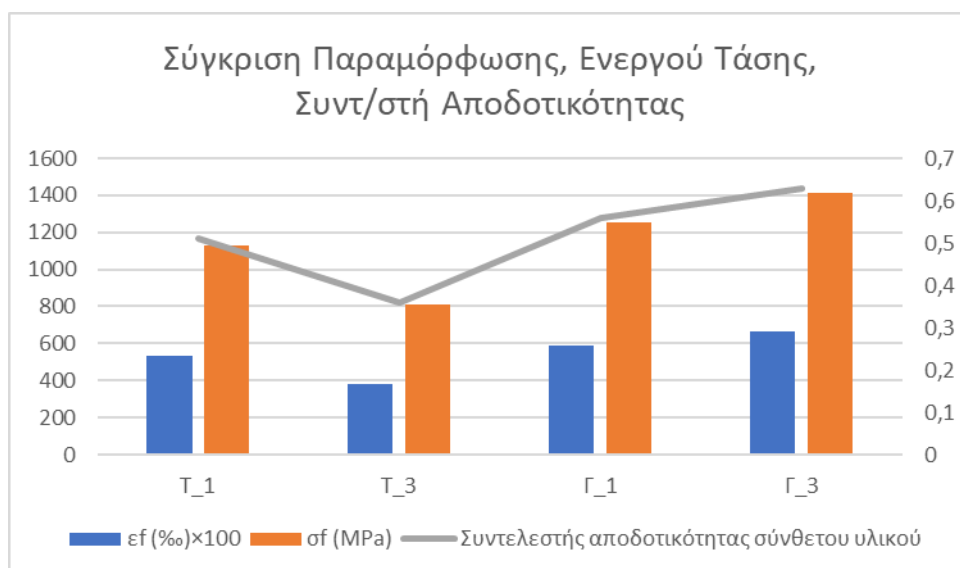
Στον παρακάτω Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης διατομών για τις τέσσερις ενισχυμένες δοκούς. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που υπολογίστηκαν και αναγράφονται είναι η παραμόρφωση του σκυροδέματος ϵ_c , η παραμόρφωση του σύνθετου υλικού ϵ_f , η ενεργός τάση σ_f της διατομής στο μέσο κάθε δοκού καθώς και ο συντελεστής αποδοτικότητας του

σύνθετου υλικού. Η ενεργός τάση σ_f υπολογίζεται από την Εξ. 4.7, ενώ ως συντελεστής αποδοτικότητας του σύνθετου υλικού λαμβάνεται η ενεργός τάση του υλικού τη στιγμή της αστοχίας ως προς ενεργό τάση αστοχίας που αναγράφεται στην βιβλιογραφία. Οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας E_f καθώς και η ενεργός τάση αστοχίας $\sigma_{f, \theta_{\epsilon\omega\rho}}$ ανακτήθηκαν από έρευνα των Kapsalis et al. (2021), που πραγματοποίησαν εργαστηριακές δοκιμές σε κουπόνια σύνθετου υλικού.

$$\bullet \quad \sigma_f = E_f \times \varepsilon_f \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης διατομής

Αποτελέσματα ανάλυσης των διατομών				
Δοκίμιο	ε_c (‰)	ε_f (‰)	σ_f (MPa)	Συντελεστής αποδοτικότητας σύνθετου υλικού
T_1	1,42	5,3	1128,9	0,51
T_3	1,24	3,8	809,4	0,36
Γ_1	1,51	5,87	1250,31	0,56
Γ_3	1,79	6,62	1410,06	0,63



Σχήμα 4.24 Συγκριτικό διάγραμμα παραμόρφωσης, ενεργού τάσης, συντελεστή αποδοτικότητας

Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 4.3 εξάγονται συμπεράσματα για τις διαφορές μεταξύ δοκών όσον αναφορά τη μηχανική τους συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανάλογα με τύπο του κονιάματος τσιμεντοειδές είτε γεωπολυμερές και τον αριθμό των στρώσεων πλέγματος άνθρακα, είτε μία είτε τρεις. Για την καλύτερη κατανόηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε το διάγραμμα του Σχ. 4.24.

Οι δοκοί ενισχυμένες με γεωπολυμερές κονίαμα έδειξαν ξεκάθαρη υπεροχή σε σχέση με τις δοκούς ενισχυμένες με τσιμεντοειδές κονίαμα. Η δοκός Γ_1 παρουσίασε ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από την Τ_1 με παραμόρφωση αστοχίας 5,87 ‰ και ενεργό τάση 1250,31 MPa, σε σχέση με τα 5,3 ‰ και 1128,9 MPa της δεύτερης. Η δοκός Γ_3 σημείωσε την μεγαλύτερη παραμόρφωση αστοχίας και ενεργό τάση από όλες τις εξεταζόμενες δοκούς, με τιμές 6,62 ‰ και 1410,96 MPa αντίστοιχα. Σε αντίθεση με την Γ_3, οι τιμές που αντιστοιχούν στη Τ_3 είναι αξιοσημείωτα μικρότερες, με την παραμόρφωση αστοχίας να φτάνει μόλις τα 3,8 ‰ και την ενεργό τάση τα 809,4 MPa.

Όσον αναφορά τον αριθμό των στρώσεων πλέγματος ανθρακονήματος παρατηρούνται διαφορετικές επιπτώσεις για τα δύο είδη κονιάματος. Στις δοκούς με το τσιμεντοειδές κονίαμα η αύξηση των στρώσεων πλέγματος οδήγησε σε υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος ενίσχυσης με την παραμόρφωση αστοχίας να μειώνεται από τα 5,30 ‰ στα 3,80 ‰ και την ενεργό τάση από τα 1128,9 MPa στα 809,4 MPa. Παράγοντα που ενδέχεται να ευθύνεται για αυτή την συμπεριφορά αποτελεί η κακή συνάφεια μεταξύ των στρώσεων του σύνθετου υλικού, κάτι που αποδεικνύεται και από τον μηχανισμό αστοχίας της εν λόγω δοκού που ήταν η διαστρωματική αποκόλληση. Άλλος πιθανός παράγοντας είναι η μεγάλη δυσκαμψία δοκού, με το σύστημα της ενίσχυσης να μην αναπτύσσεται και να αστοχεί πρώιμα. Από την άλλη πλευρά στις δοκούς με το γεωπολυμερές κονίαμα η επίδραση της αύξησης των στρώσεων ενίσχυσε την απόδοση του συστήματος ενίσχυσης με την παραμόρφωση αστοχίας να αυξάνεται από τα 5,87 ‰ στα 6,62 ‰ και την ενεργό τάση από τα 1250,31 MPa στα 1410,06 MPa. Συνεπώς το γεωπολυμερές κονίαμα ενδείκνυται για χρήση πολλαπλών στρώσεων επίτευξη καλής συνάφειας.

Τέλος οι τιμές που υπολογίστηκαν για τον συντελεστή αποδοτικότητας φαίνονται να επαληθεύουν τις παραπάνω παρατηρήσεις. Για τις δοκούς T_1 και T_3 υπολογίστηκε 0,51 και 0,36, ενώ για τις δοκούς Γ_1 και Γ_3 , υπολογίστηκε 0,56 και 0,63 αντίστοιχα. Οι μεγαλύτερες τιμές των Γ_1 και Γ_3 επιβεβαιώνουν την καλύτερη απόδοση του υλικού, με την προσθήκη τριών στρώσεων πλέγματος να ενισχύει ακόμα παραπάνω το σύστημα. Αντιθέτως η πολύ χαμηλή τιμή της T_3 δηλώνει μη επαρκή ενεργοποίηση του συστήματος ενίσχυσης παρόλη την αύξηση των στρώσεων του πλέγματος.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η πειραματική αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός νέου γεωπολυμερούς κονιάματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως ανόργανη μήτρα για την καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με πλέγματα ινών άνθρακα (IAM). Στο πλαίσιο της μελέτης, κατασκευάστηκαν και εξεταστήκαν πέντε δοκίμια σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η πειραματική διερεύνηση επικεντρώθηκε στην επιρροή των εξής παραμέτρων. Αρχικά των δύο διαφορετικών μιγμάτων ανόργανης μήτρας, μιας τσιμεντοειδούς και μιας γεωπολυμερούς και δεύτερον, τον αριθμό των στρώσεων των πλεγμάτων άνθρακα για την ενίσχυση των δοκών.

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων και τη συστηματική ανάλυση που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα εξής:

- Η καμπτική αντοχή όλων των ενισχυμένων δοκιμίων βελτιώθηκε. Το ποσοστό αύξησης του μέγιστου καταγραφόμενου φορτίου για τα ενισχυμένα δοκίμια κυμαίνεται από 6.56% έως 31.15% ως προς το δοκίμιο αναφοράς.
- Στις περιπτώσεις αύξησης των στρώσεων πλέγματος, η αύξηση του μέγιστου καταγραφόμενου φορτίου δεν πραγματοποιήθηκε αναλογικά με την αύξηση των στρώσεων.
- Το δοκίμιο που κατέγραψε την μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση του μέγιστου καταγραφόμενου φορτίου σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς, αντιστοιχεί στο δοκίμιο που ενισχύθηκε με τρεις στρώσεις ινών άνθρακα και μήτρα γεωπολυμερούς, για φορτίο 78.93kN και ισούται με 31.15%.
- Όλα τα δοκίμια αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού είτε από τη διεπιφάνεια, είτε μεταξύ των στρώσεων, δείγμα μη ικανοποιητικής συνάφειας και συνεργασίας των υλικών. Εξαίρεση

αποτέλεσε η Γ_1, που αστόχησε λόγω θραύσης των ινών, δείχνοντας πλήρη ενεργοποίηση του συστήματος ενίσχυσης και καλή συνάφεια μεταξύ των υλικών.

- Η δυσκαμψία όλων των δοκών σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς αυξήθηκε και στα δύο στάδια. Στο στάδιο II παρατηρήθηκε μεταβολή από 0,13-8,19%, ενώ στο στάδιο III από 94,74-284,21%.
- Το κονίαμα γεωπολυμερούς, παρουσίασε καλύτερη συνάφεια τόσο με το σκυρόδεμα, όσο και μεταξύ των στρώσεων του πλέγματος ενίσχυσης IAM σε σχέση με το τσιμεντοειδές κονίαμα.
- Τα συστήματα ενίσχυσης με κονίαμα γεωπολυμερούς εξασφάλισαν μεγαλύτερες τιμές αστοχίας σύνθετου υλικού, ενεργού τάσης και συντελεστή αποδοτικότητας, έναντι των συστημάτων με τσιμεντοειδές κονίαμα. Έτσι φαίνεται η ανώτερη μηχανική συμπεριφορά του γεωπολυμερούς κονιάματος σε σχέση με το τσιμεντοειδές. Αυτό συνέβη κατά βάση στην περίπτωση της δοκού Γ_3, διότι οι τιμές των δοκών Γ_1 και Τ_1 είναι παρόμοιες μεταξύ τους.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τέλος, ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Περαιτέρω διερεύνηση της σύστασης της γεωπολυμερούς μήτρας, με διάφορες συνθέσεις ή και προσθήκες για να επιτευχθούν ακόμα καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και συνάφεια.
- Μελέτη διαφορετικών γεωμετρικών δοκών, για να ερευνηθούν παράγοντες όπως το μήκος της δοκού.
- Διερεύνηση διαφορετικών μεθόδων προετοιμασίας της επιφάνειας της δοκού στην οποία θα τοποθετηθεί η ενίσχυση, για την επίτευξη της καλύτερης συνάφειας.
- Περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού των στρώσεων πλέγματος και προσδιορισμός ενός βέλτιστου αριθμού στρώσεων για βέλτιστη αποδοτικότητα.

Βιβλιογραφία

- Almutairi A. L., Tayeh B. A., Adesina A., Haytham F. I., Zeyad A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- Brückner, A., Ortlepp, R., & Curbach, M. (2006). Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. *Materials and structures*, 39(8), 741-748.
- D'Antino, T., and C. Papanicolaou. 2017. "Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites." *Compos. Part B: Eng.* 127 (15), 78–91.
- D'Antino, T., and C. Papanicolaou. 2018. "Comparison between different tensile test set-ups for the mechanical characterization of inorganic matrix composites." *Constr. Build. Mater.* 171 ,140–151.
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar–Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40-55.
- De Santis, S., Carozzi, F. G., G. De Felice, and Poggi, C., 2017. "Test methods for textile reinforced mortar systems." *Compos. Part B: Eng.* 127, 121–132.
- Giese, A., Giese, D., Dutra, V. & Filho, L. (2021). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced mortar. *Journal of Building Engineering*, 33, 101873.
- Kapsalis, P., Triantafyllou, T., M.ASCE, Korda, E., Van Hemelrijck, D., Tysmans, T. 2002. Tensile Performance of Textile-Reinforced Concrete after Fire Exposure: Experimental Investigation and Analytical Approach. *Journal of Composites for Construction*, 26(1), 04021067.

Koutas, L. N. & Papakonstantinou. C. G. (2021). Flexural strengthening of RC beams with textile-reinforced mortar composites focusing on the influence of the mortar type. *Engineering Structures*, 246, 113060.

Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.

Liu, J., Yan, F. (2022). Study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with geopolymer adhesive bonded CFRP. *International Journal of Structural Integrity*, 13, 3, 448-468.

Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., Cioffi, R. & Manfredi, G. (2013). Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1667-1676.

Nagavally, R. R. (2016). COMPOSITE MATERIALS - HISTORY, TYPES, FABRICATION TECHNIQUES, ADVANTAGES, AND APPLICATIONS. *Proceedings of 29th IRF International Conference*, Bengaluru, India.

Ombres, L. (2011). Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material. *Composite Structures*, 94 (1), 143-155.

Papakonstantinou, C. G., & Katakalos, K. (2009). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with a hybrid inorganic matrix-steel fiber retrofit system. *Structural Engineering and Mechanics*, 31(5), 567-585.

Prashanth, S., Subbaya, K.M., Nithin, K. & Sachhidananda, S. (2017). Fiber Reinforced Composites - A Review. *Journal of Material Sciences & Engineering*, 6, 341.

Raoof, S. M., & Bournas, D. A. (2017). TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures. *Construction and building materials*, 154, 424-437.

Raoof, S. M., Koutas, L. N. and Bournas, D. A. 2017. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and building materials*, 151, 279-291.

Raoof, S. M., Koutas, L. N., and Bournas, D. A. 2016. "Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation." *Compos. Part B: Eng.* 98, 350–361.

Triantafillou, T. (2016). *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, U.K.

Yan, K., Yu, X., Ren, P., Zhang, R., Oh E., Zhang, Y., Zhang, X. (2025). Experimental research on fire resistance of concrete beams strengthened with CFRP sheets pasted by magnesium phosphate inorganic adhesive. *Engineering Structures*, 330, 119946.

Zhang, B. (2024). Durability of low- carbon geopolymer concrete: A critical review. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00882.

Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B*, 152, 79-95.

Μπουρνάς, Δ. (2008). Ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών (Doctoral dissertation).

Τριανταφύλλου, Α. (2004). Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή). (2η έκδοση εκδ.). Πάτρα.