

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΟΙΧΟΣΩΜΑΤΩΝ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΥΑΛΟΥ ΣΕ ΜΗΤΡΑ
ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ**

ΖΗΡΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

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

2022

© 2022 Ζήρας Αθανάσιος

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Κούτας Λάμπρος

(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος

(Συνεπιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Γουργιώτης Παναγιώτης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη ως προς το πρόσωπο μου, τον επιβλέποντα κ. Κούτα Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και τον συνεπιβλέποντα κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σε αυτό το σημείο, οφείλω να εκφράσω ιδιαίτερες τις ευχαριστίες μου στον Δρ. Cholostiakow Szymon, ο οποίος στάθηκε αρωγός με καταλυτική συμβολή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Από αυτόν τον κύκλο ευχαριστιών δε θα μπορούσα να παραλείψω τον Δρ. κ. Παπαθεοχάρη Χάρη, τον κ. Κουτσελίνη Αλέκο, μέλος ΕΤΕΠ, την υποψήφια διδάκτωρ Σκυριανού Ιωάννα για τη χρήσιμη βοήθεια με την παροχή των γνώσεων τους και της τεχνικής τους κατάρτισης αλλά και τη συμφοιτήτριά μου Τσολερίδου Έλενα για τη συνεργασία.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την εγκάρδια ευγνωμοσύνη μου στους οικείους μου και ιδιαίτερα στην οικογένεια μου για τη συνεχόμενη στήριξη τους μέχρι την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΟΙΧΟΣΩΜΑΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΥΑΛΟΥ ΣΕ ΜΗΤΡΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ

Ζήρας Αθανάσιος

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.
Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων τοιχοσωμάτων, ενισχυμένων με σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας, υποβαλλόμενων σε πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης και εκτός επιπέδου κάμψης. Τα αναφερόμενα σύνθετα υλικά είναι γνωστά ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Συγκεκριμένα, εννέα αντιπροσωπευτικά δοκίμια τοιχοπλήρωσης, διαστάσεων 700 x 700 x 70 mm υποβλήθηκαν σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης. Εκτός αυτών, δύο δοκίμια διαστάσεων 1085 x 390 x 70 mm υποβλήθηκαν σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης. Για την πρώτη σειρά δοκιμών παράμετρο διερεύνησης αποτέλεσε ο τρόπος ενίσχυσης (μονόπλευρη ή αμφίπλευρη ενίσχυση), που πραγματοποιήθηκε σε μήτρα ενίσχυσης γεωπολυμερούς, καθώς και η μήτρα ενίσχυσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας με παλαιότερα πειραματικά αποτελέσματα όπου χρησιμοποιήθηκε μήτρα τσιμεντοκονιάματος. Για τη δεύτερη σειρά δοκιμών παράμετρο διερεύνησης αποτέλεσε η μήτρα ενίσχυσης (γεωπολυμερές κονίαμα ή τσιμεντοκονίαμα). Και στις δύο σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις ινοπλέγματος υάλου. Οι αναφερθείσες πειραματικές δοκιμές προσομοιώνουν τη μηχανική καταπόνηση υφιστάμενων τοιχοπληρώσεων κατά τη σεισμική δράση. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης κατέδειξαν τη σημαντική συμβολή των IAM και θέτουν βάσεις για τη χρήση γεωπολυμερών κονιαμάτων στον τομέα των ενισχύσεων των τοιχοπληρώσεων.

Λέξεις κλειδιά: Τοιχοσώματα, ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, σύνθετα υλικά, γεωπολυμερές, διαγώνια θλίψη, εκτός επιπέδου κάμψη

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION TESTS OF WALLS REINFORCED WITH FIBERGLASS MESH IN GEOPOLYMER MATRIX

Ziras Athanasios

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervising Professors: Koutas Lambros, Assistant Professor

Papakonstantinou Christos, Associate Professor

Abstract

The main objective of the present study was the experimental investigation of the mechanical properties of masonry infill walls, reinforced with composite materials of inorganic matrix (known as textile-reinforced mortars or TRM), subjected to diagonal compression and out-of-plane bending. Nine wall specimens, measuring 700 x 700 x 70 mm, were subjected to diagonal compression. In addition, two wall specimens with dimensions of 1085 x 390 x 70 mm were subjected to out-of-plane bending tests. For the first series of tests, the investigation parameter included the strengthening configuration (single or double sided geopolymer based TRM) as well as the matrix of the composite material by comparing the results of this study with past results from similar specimens with cement mortar as matrix material of TRM. For the second series of tests, the parameter of investigation was the reinforcement matrix (geopolymer mortar or cement mortar). Two layers of glass-fiber textile mesh was used in both series of tests. The results of this study demonstrated the great potential of geopolymer based TRMs for strengthening of masonry infills.

Key words: *Masonry walls, textile reinforced mortars, composite materials, geopolymer, diagonal compression, out-of- plane bending*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	4
2.1	Συμπεριφορά εμφαντούμενων τοιχοπληρώσεων σε σεισμικές δράσεις	4
2.2	Τύποι αστοχίας εμφαντούμενων τοιχοπληρώσεων σε σεισμικές δράσεις	5
2.3	Ενισχύσεις τοιχοπληρώσεων	7
2.3.1	Γενικά	7
2.3.2	Συμβατικές μέθοδοι ενίσχυσης	7
2.3.3	Μέθοδοι ενίσχυσης με σύνθετα υλικά	9
2.4	Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM)	11
2.4.1	Γενικά	11
2.4.2	Ινοπλέγματα	12
2.4.3	Ανόργανη μήτρα	14
2.5	Εύρος εφαρμογών των IAM στο πεδίο των κατασκευών	15
2.5.1	Γενικά	15
2.5.2	Κατηγορίες ενίσχυσης	15
2.6	Συμπεριφορά τοιχίσκων ενισχυμένων με IAM σε διαγώνια θλίψη	24
2.6.1	Γενικά	24
2.6.2	Πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης	25
2.7	Συμπεριφορά τοιχίσκων ενισχυμένων με IAM σε εκτός επιπέδου κάμψη	29
2.7.1	Γενικά	29
2.7.2	Πειραματικές δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης	29
2.8	Συμπεράσματα πειραματικών δοκιμών	32
2.9	Χρήση κονιαμάτων γεωπολυμερών στον τομέα ενισχύσεων των κατασκευών	32
2.9.1	Γενικά	32
2.9.2	Πειραματικές εργασίες στην ενίσχυση δομικών στοιχείων με μήτρα γεωπολυμερούς	33
2.9.3	Συμπεράσματα από την ενίσχυση δομικών στοιχείων με μήτρα γεωπολυμερούς	36
Κεφάλαιο 3	Πειραματικό πρόγραμμα	37
3.1	Γενικά	37
3.2	Περιγραφή δοκιμών	37
3.2.1	Ονοματολογία δοκιμών	39
3.3	Ιδιότητες υλικών	40
3.3.1	Οπτόπλινθοι	40
3.3.2	Κονίαμα αρμών τοιχοποιίας	43
3.3.3	Πλέγμα ενίσχυσης	47
3.3.4	Μήτρες ενίσχυσης	48
3.4	Διαδικασία κατασκευής δοκιμών τοιχοπλήρωσης	51

3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμών τοιχοπλήρωσης	52
3.6 Πειραματική διάταξη	55
3.6.1 Πειραματική διάταξη διαγώνιας θλίψης	55
3.6.2 Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου κάμψης	58
Κεφάλαιο 4 Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμος	60
4.1 Γενικά	60
4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Α σειράς δοκιμών	62
4.2.1 Δοκίμια αναφοράς	62
4.2.2 Δοκίμια ενισχυμένα μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης	65
4.2.3 Δοκίμια ενισχυμένα αμφίπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης	69
4.2.4 Δοκίμια ενισχυμένα μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης	71
4.3 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων	74
4.4 Σχολιασμός διατμητικών τάσεων των δοκιμών	76
4.5 Σχολιασμός μέτρου διάτμησης των δοκιμών	79
4.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Β σειράς δοκιμών	83
4.6.1 Δοκίμιο αναφοράς	83
4.6.2 Δοκίμιο ενισχυμένο μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης	84
4.6.3 Δοκίμιο ενισχυμένο μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης	86
4.7 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων	88
4.8 Σχολιασμός φορτίσεων των δοκιμών	89
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα πειραματικής μελέτης και προτάσεις μελλοντικής έρευνας	92
5.1 Συμπεράσματα	92
5.1.1 Συμπεράσματα Α σειράς δοκιμών	92
5.1.2 Συμπεράσματα Β σειράς δοκιμών	84
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	95
Βιβλιογραφία	96

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμών.....	39
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης οπτόπλινθων κατά την κατακόρυφη διεύθυνσή	42
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης οπτόπλινθων κατά την οριζόντια διεύθυνση	43
Πίνακας 3.4: Σύνθεση μείγματος κονιάματος.....	43
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και κάμψης του κονιάματος των αρμών	46
Πίνακας 3.6: Ιδιότητες πλέγματος ινών υάλου	47
Πίνακας 3.7: Σύνθεση γεωπολυμερούς μήτρας.....	48
Πίνακας 3.8: Σύνθεση τσιμεντοειδούς μήτρας	49
Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και θλίψης γεωπολυμερούς κονιάματος.....	50
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και θλίψης τσιμεντοκονιάματος.....	50
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα και μορφές αστοχίας Ά Σειράς δοκιμών.....	60
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα και μορφές αστοχίας Β Σειράς δοκιμών	61
Πίνακας 4.3: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV διατμητικών τάσεων	79
Πίνακας 4.4: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV μέτρων διάτμησης.....	83

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Εικόνες από αστοχίες τοιχοπληρώσεων σε πλαίσιακές κατασκευές ΟΣ κατά τα σεισμικά γεγονότα: (α) Κεφαλλονιά-Ελλάδα 2014, Ms 5.9., (Κούτας, 2015) (β) L' Aquila-Ιταλία 2009, Ms 6.3 (Κούτας, 2015).....	2
Σχήμα 2.1: Τυπικές μορφές αστοχίας εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια ΟΣ (Wael El-Dakhakhni et al, 2016).....	6
Σχήμα 2.2: Ενίσχυση τοιχοπλήρωσης με μανδύες ΟΣ: (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση (Ihlogismiki, 2014), (β) τομή τοιχοπλήρωσης ενισχυμένη, εκατέρωθεν, με μανδύες ΟΣ (ΚΑΝΕΠΕ, 2013).....	8
Σχήμα 2.3: (α) Τοποθέτηση πλέγματος χαλύβδινου οπλισμού και βλήτρων χάλυβα στο φάτνωμα ΟΣ (β) εφαρμογή εκτοξευόμενου κονιάματος, οπλισμένο με πλαστικές ίνες (Koutromanos et al., 2013).....	8
Σχήμα 2.4: Εφαρμογή λωρίδων ΙΟΠ σε (α) μονώροφο τοιχοπληρωμένο πλαίσιο (Erol et al., 2008) (β) διώροφο τοιχοπληρωμένο πλαίσιο (Akin et al., 2009).....	10
Σχήμα 2.5: Εφαρμογή ΙΑΜ σε δοκίμιο τοιχοποιίας (α) επάλειψη πρώτης στρώσης ανόργανης μήτρας (β) εφαρμογή στρώσης ινοπλέγματος (Koutas et al., 2014).....	11
Σχήμα 2.6: Ινοπλέγματα (α) δύο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) τριών διαστάσεων. (Μπουρνάς, 2008), (Κούτας 2015).....	13
Σχήμα 2.7: Ινοπλέγματα με κλώνους ινών κάθετους μεταξύ τους σε δύο διευθύνσεις (α) πλέγμα ινών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, (β) πλέγμα ινών υάλου χωρίς επικάλυψη, (γ) πλέγμα ινών βασάλτη χωρίς επικάλυψη, (δ) πλέγμα ινών άνθρακα με επικάλυψη, (ε) πλέγμα ινών υάλου με επικάλυψη, (ζ) πλέγμα ινών βασάλτη με επικάλυψη. (Κούτας, 2015).....	14
Σχήμα 2.8: Δοκίμιο ΟΣ τύπου υποστυλώματος (α) κατά την ενίσχυση, (β) στην τελική του μορφή (Triantafyllou et al., 2006).....	16
Σχήμα 2.9: (α) Ενίσχυση κρίσιμης περιοχής στη βάση υποστυλώματος με μανδύες ΙΑΜ, (β) λυγισμός διαμήκους οπλισμού πάνω από την ενισχυμένη με ΙΟΠ κρίσιμη περιοχή, (γ) μορφή αστοχίας υποστυλώματος ενισχυμένο με ΙΑΜ (Bournas et al., 2009).....	17
Σχήμα 2.10: Μορφές αστοχίας (α) μη ενισχυμένου κόμβου, (β) ενισχυμένου κόμβου με ΙΑΜ (Al-Salloum et al., 2011).....	18
Σχήμα 2.11: (α) Μορφή αστοχίας ενισχυμένης δοκού με ΙΑΜ (D' Ambrisi and Foracci, 2011), (β) Γεωμετρία δοκιμίου πλάκας, (γ) πειραματική διάταξη (Paranico-laou et al., 2009). 19	19
Σχήμα 2.12: Μορφή αστοχίας ενισχυμένης ορθογωνικής δοκού σε τέμνουσα με ΙΑΜ (Paranico-laou et al., 2009).....	20
Σχήμα 2.13: (α) Πειραματική διάταξη εντός επιπέδου φόρτισης δοκιμίων τοιχοποιίας, (β) ρήξη μανδύα ΙΑΜ, (γ) σύνθλιψη οπτόπλινθου στη βάση του δοκιμίου (Paranico-laou et al., 2007).....	21
Σχήμα 2.14: Μορφές αστοχίας (α) μη ενισχυμένου δοκιμίου, (β) ενισχυμένου δοκιμίου με μία στρώση ΙΑΜ, (γ) μη ενισχυμένου δοκιμίου, (δ) ενισχυμένου δοκιμίου με δύο στρώσεις ΙΑΜ (Ombres, 2015).....	22
Σχήμα 2.15: Μορφές αστοχίας (α) ενισχυμένου δοκιμίου στην κάτω παρειά, (β) ενισχυμένου δοκιμίου στην άνω παρειά, (γ) αμφίπλευρα ενισχυμένου δοκιμίου (Leire Garmendia et al., 2014).....	22
Σχήμα 2.16: Σχηματική απεικόνιση (α) λεπτομερειών ενίσχυσης με ΙΑΜ τριώροφου τοιχοπληρωμένου πλαισίου, (β) πειραματικής διάταξης κυκλικής φόρτισης (Koutas, 2015).....	23
Σχήμα 2.17: (α) Μη ενισχυμένο δοκίμιο, (β) ενισχυμένο δοκίμιο, μετά το πέρας της κυκλικής φόρτισης (Koutas, 2015).....	24

Σχήμα 2.18: Ενδεικτική μορφή διατμητικής αστοχίας (Garcia-Ramonda et al, 2020).....	24
Σχήμα 2.19: Αστοχία τοιχοπλήρωσης εμφατνούμενης σε πλαίσιο ΟΣ (El-Dakhakhni et. al., 2004).....	25
Σχήμα 2.20: Τυπικές μορφές αστοχίας (α) δοκιμίου αναφοράς, (β) ενισχυμένου δοκιμίου με μία στρώση IAM (Parisi et al., 2013).....	26
Σχήμα 2.21: Τυπικές μορφές (α) αστοχίας δοκιμίου αναφοράς, (β) ρηγμάτωσης της στρώσης ενίσχυσης, (γ) εκτός επιπέδου παραμόρφωσης ενισχυμένου δοκιμίου (Koutas et al., 2015).....	27
Σχήμα 2.22: Τυπικές μορφές αστοχίας (a) URM, (b) BTRM, (c) GTRM, (d) λεπτομέρεια αστοχίας GTRM (Gulinelli et al, 2019).....	28
Σχήμα 2.23: Τυπικές μορφές αστοχίας τοιχοποιίας (α) παράλληλα, (β) κάθετα στους αρμούς, για εκτός επιπέδου καταπόνηση (Eurocode 6, EN 1996)	29
Σχήμα 2.24: (α) Πειραματική διάταξη δοκιμών εκτός επιπέδου κάμψης, (β) αστοχία λόγω βλάβης της τοιχοποιίας σε δοκίμιο ενισχυμένο με στρώσεις IAM άνθρακα (Papanicolaou et al., 2008)	30
Σχήμα 2.25: Τυπικές μορφές αστοχίας ενισχυμένων τοιχίσκων σε κάμψη (Harajli et al., 2010).....	31
Σχήμα 2.26: Τυπικές μορφές αστοχίας δοκιμίου (α) αναφοράς, (β) ενισχυμένου με μία στρώση IAM άνθρακα, (γ) ενισχυμένου με τέσσερις στρώσεις IAM άνθρακα (Babaeidarabad et al., 2014)	32
Σχήμα 2.27: Δοκίμιο δοκού (α) πριν, (β) μετά το πείραμα κάμψης (Menna et al., 2013).....	34
Σχήμα 2.28: Γεωμετρία και λεπτομέρειες πρισμάτων διαγώνιας θλίψης (Maras and Kose, 2020).....	35
Σχήμα 2.29: Μορφή αστοχίας δοκιμίων για (α) εντός επιπέδου φόρτιση όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα γεωπολυμερούς σύστασης, (β) εντός επιπέδου φόρτιση όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα ασβεστοειδούς σύστασης, (γ) εκτός επιπέδου φόρτιση όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα ασβεστοειδούς σύστασης (Gkournelos et al., 2021).....	36
Σχήμα 3.1: Γεωμετρία όψεων δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε δοκιμές (α) διαγώνιας θλίψης, (β) εκτός επιπέδου κάμψης.....	38
Σχήμα 3.2: Οπτόπλινθος με τις διαστάσεις του	40
Σχήμα 3.3: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μεμονωμένων οπτόπλινθων	41
Σχήμα 3.4: Τυπική μορφή αστοχίας οπτόπλινθου (α) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, (β) κατά την οριζόντια διεύθυνση.	41
Σχήμα 3.5: Τοποθέτηση κονιάματος στη μεταλλική μήτρα	44
Σχήμα 3.6: Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης τριών σημείων κονιάματος	45
Σχήμα 3.7: Πειραματική διάταξη δοκιμής θλίψης πρίσματος του κονιάματος.....	46
Σχήμα 3.8: Πλέγμα ινών υάλου (Koutas and Papakonstantinou, 2021)	47
Σχήμα 3.9: Δοκίμιο γεωπολυμερούς κονιάματος με τις διαστάσεις του	49
Σχήμα 3.10: Διαδικασία κατασκευής δοκιμίων τοιχοπλήρωσης.	51
Σχήμα 3.11: Διαμορφωμένο ινόπλεγμα υάλου.....	52
Σχήμα 3.12: Κονίαμα γεωπολυμερούς κατά τη φάση της ανάμειξης.....	53
Σχήμα 3.13: Τοποθέτηση ινοπλεγμάτων σε δοκίμια υποβαλλόμενα σε δοκιμές (α) εκτός επιπέδου κάμψης, (β) διαγώνιας θλίψης.....	54
Σχήμα 3.14: Ενισχυμένο δοκίμιο τοιχοπλήρωσης.	55
Σχήμα 3.15 Πειραματική διάταξη διαγώνιας θλίψης.....	57
Σχήμα 3.16: Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου κάμψης.....	59
Σχήμα 4.1: Μορφές αστοχίας δοκιμίων αναφοράς.....	64
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίων αναφοράς.	65
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων αναφοράς.....	65

Σχήμα 4.4: Μορφές αστοχίας μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης	67
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης	68
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.....	68
Σχήμα 4.7: Μορφές αστοχίας αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης	70
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.	71
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.....	71
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης.....	72
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης.....	72
Σχήμα 4.12: Μορφές αστοχίας μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης.....	73
Σχήμα 4.13: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των δοκιμίων.	74
Σχήμα 4.14: Συγκριτικό διάγραμμα διατμητικής τάσης – παραμόρφωσης των δοκιμίων	75
Σχήμα 4.15: Γράφημα τάσης ρηγμάτωσης των δοκιμίων	76
Σχήμα 4.16: Γράφημα τάσης αστοχίας των δοκιμίων	78
Σχήμα 4.17: Γράφημα μέτρων διάτμησης Α τμήματος των δοκιμίων.....	80
Σχήμα 4.18: Γράφημα μέτρων διάτμησης Β τμήματος των δοκιμίων	81
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος.....	85
Σχήμα 4.20 Μορφή αστοχίας (α) άνω, (β) κάτω όψης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος.....	86
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος	87
Σχήμα 4.22: Μορφή αστοχίας (α) μπροστινής (β) άνω όψης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος.....	88
Σχήμα 4.23: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίων υποβαλλόμενων σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης	89
Σχήμα 4.24: Γράφημα φορτίου ρηγμάτωσης των δοκιμίων	90
Σχήμα 4.25: Γράφημα φορτίου αστοχίας των δοκιμίων	90

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι βλάβες που υφίστανται οι κατασκευές με την πάροδο του χρόνου, ανέκαθεν αποτελούσαν ένα ζήτημα το οποίο χρήζει λύσεων. Η ανάγκη για συντήρηση και επισκευή κτιρίων γίνεται όλο και μεγαλύτερη ώστε να ανταπεξέρχονται στις σύγχρονες προδιαγραφές που επιτάσσουν οι σύγχρονοι κανονισμοί με στόχο την ασφάλεια των πολιτών. Η Ελλάδα μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 είχε ανεπαρκή αντισεισμικό σχεδιασμό. Οι σεισμικές δράσεις ήταν και είναι ιδιαίτερα έντονες και έχουν οδηγήσει στην καταπόνηση των κτιρίων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την οικονομική κρίση που μάζωσε τη χώρα καθιστούν την ανάγκη για οικονομικότερες και πιο άμεσες λύσεις ενισχύσεων παρά κατεδαφίσεων και ανακατασκευών.

Οι μελέτες στατικής επάρκειας βάσει των οποίων σχεδιαζόταν τα κτίρια παλαιότερα λάμβαναν υπόψιν μόνο τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας, αγνοώντας σε μεγάλο βαθμό τις σεισμικές δράσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι ευάλωτα κτίρια μέχρι και σε μέτριας έντασης σεισμούς, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές αστοχίες ως συνέπεια της σεισμικής δράσης. Τέτοιου είδους αστοχίες συναντώνται και στις τοιχοπληρώσεις σε κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος (εμφατινόμενες σε πλαίσια), η επιρροή των οποίων δεν συνυπολογιζόταν κατά τη φάση σχεδιασμού (Koutas et al., 2019).

Οι Mehrabi et al. (1996) και Fardis and Panagiotakos (1997) ερεύνησαν την επιρροή των τοιχοπληρώσεων εμφατινόμενων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) και διαπίστωσαν ότι μπορούν να έχουν ευμενή δράση αν και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να δημιουργήσουν συνθήκες δυσμενείς για τα μέλη του φορέα με τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Ο παράγοντας που παίζει ρόλο στην απόκριση της κατασκευής είναι η διάταξη των τοιχοπληρώσεων σε κάτοψη και όψη.

Στο **Σχήμα 1.1** παρατηρούνται μορφές αστοχίας για τοιχοπληρώσεις εμφατινόμενες σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος που προέκυψαν ύστερα από σεισμικές δράσεις.



Σχήμα 1.1: Εικόνες από αστοχίες τοιχοπληρώσεων σε πλαισιακές κατασκευές ΟΣ κατά τα σεισμικά γεγονότα: (α), (β) Κεφαλονιά-Ελλάδα 2014, Ms 5.9., (Κούτας, 2015) (γ) L' Aquila-Ιταλία 2009, Ms 6.3 (Κούτας, 2015)

1.2 Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας αποτέλεσαν οι πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης και εκτός επιπέδου κάμψης αντιπροσωπευτικών δοκιμών τοιχοπλήρωσης, ενισχυμένων με ινοπλέγματα υάλου σε ανόργανη μήτρα. Πιο συγκεκριμένα σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης υποβλήθηκαν εννέα δοκίμια διαστάσεων 700 x 700 x 70 mm και σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης δύο δοκίμια διαστάσεων 1085 x 390 x 70 mm. Για τα πειράματα της διαγώνιας θλίψης, τρία δοκίμια δεν ενισχύθηκαν ενώ πραγματοποιήθηκε μονόπλευρη ενίσχυση με δύο στρώσεις πλέγματος ινών υάλου σε τρία από αυτά και αμφίπλευρη ενίσχυση με μία στρώση πλέγματος ινών υάλου, στην κάθε πλευρά της όψης των δοκιμών, στα υπόλοιπα τρία. Τη μήτρα ανόργανης σύστασης την αποτέλεσε κονίαμα γεωπολυμερούς σύστασης. Για τα πειράματα της εκτός επιπέδου κάμψης η ενίσχυση ήταν και για τα δύο δοκίμια μονόπλευρη με δύο στρώσεις πλέγματος ινών υάλου. Η μήτρα ενίσχυσης του ενός ήταν τσιμεντοειδούς ενώ του άλλου γεωπολυμερούς σύστασης.

Παράμετρο διερεύνησης για τη σειρά δοκιμών διαγώνιας θλίψης αποτέλεσε ο τρόπος ενίσχυσης των δοκιμών και η μήτρα ενίσχυσης, με τον αριθμό των στρώσεων ινοπλέγματος να είναι ο ίδιος. Παράμετρο διερεύνησης για τη σειρά δοκιμών εκτός επιπέδου κάμψης αποτέλεσε η μήτρα ενίσχυσης, με τον αριθμό των στρώσεων ινοπλέγματος να είναι ο ίδιος. Στόχος των πειραματικών δοκιμών ήταν η μελέτη της αποδοτικότητας των ΙΑΜ στην ενίσχυση των δοκιμών τοιχοπλήρωσης και η σύγκριση μεταξύ τους ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά τους κατά τις συγκεκριμένες καταστάσεις καταπόνησης.

Κεφάλαιο 2

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Συμπεριφορά εμφατούμενων τοιχοπληρώσεων σε σεισμικές δράσεις

Όπως προαναφέρθηκε, οι τοιχοπληρώσεις στο παρελθόν δεν θεωρούνταν από τους μηχανικούς της εποχής στοιχεία του φέροντα οργανισμού κατά τη φάση του σχεδιασμού (Koutas et al., 2019), γεγονός που συνεπάγεται της απουσίας τους από τους υπολογισμούς αντισεισμικού σχεδιασμού. Παρ' όλα αυτά η αντοχή τους δεν είναι αμελητέα καθώς συμβάλουν σε πλευρικές και σεισμικές φορτίσεις που καταπονούν τον φορέα. Ωστόσο η συμπεριφορά των τοιχοπληρώσεων στην σεισμική απόκριση ενός φορέα οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να είναι ευμενής ή δυσμενής. Γενικά, τοιχοπληρώσεις των οποίων η κατανομή έχει γίνει ομοιόμορφα τόσο περιμετρικά του κτιρίου, όσο και καθ' ύψος, με απουσία ασυνεχειών προσδίδουν θετικό αντίκτυπο στην αντίσταση του φέροντα οργανισμού σε σεισμικές καταπονήσεις. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται άμεσα με την αύξηση αντοχής των πλαισιακών φορέων σε πλευρικά φορτία και της πλευρικής τους δυσκαμψίας με αποτέλεσμα τη μείωση των μετακινήσεων λόγω σεισμού. Αυτή η μείωση μπορεί να ερμηνευτεί και σαν μείωση ροπών και τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται, οι οποίες ευθύνονται για την πιθανή κατάρρευση του φορέα σε περίπτωση πολύ έντονων σεισμικών φορτίσεων. Σημαντικό παράγοντα για τη διασφάλιση των παραπάνω αποτελούν οι κατάλληλες συνθήκες ενσφήνωσης της τοιχοποιίας στα μέλη του φέροντα οργανισμού που περιβάλλουν το πλαίσιο.

Στην πραγματικότητα όμως, η πλειοψηφία των κατασκευών χαρακτηρίζεται από ασυνέχεια και μη κανονικότητα στις τοιχοπληρώσεις, όπως και στη γεωμετρία του φορέα γενικότερα, για λόγους αρχιτεκτονικής αισθητικής, επιτακτικού σχεδιασμού κ.α. Αυτές οι διατάξεις συνήθως οδηγούν σε δυσμενή επιρροή της στατικής απόκρισης του φορέα.

Σύμφωνα με τον Fardis (2009) οι κυριότερες δυσμενείς επιρροές των τοιχοπληρώσεων είναι οι εξής:

- Διατμητική αστοχία υποστυλωμάτων που βρίσκονται σε επαφή με τοιχοπληρώσεις. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις που οι τοιχοπληρώσεις είναι αρκετά δύσκαμπτες και παρουσιάζουν μεγάλη διατμητική αντοχή, προκαλώντας διατμητικές βλάβες σε

αδύναμα υποστυλώματα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συνήθως στις περιοχές κάτω από τον κόμβο σύνδεσης δοκού – υποστυλώματος.

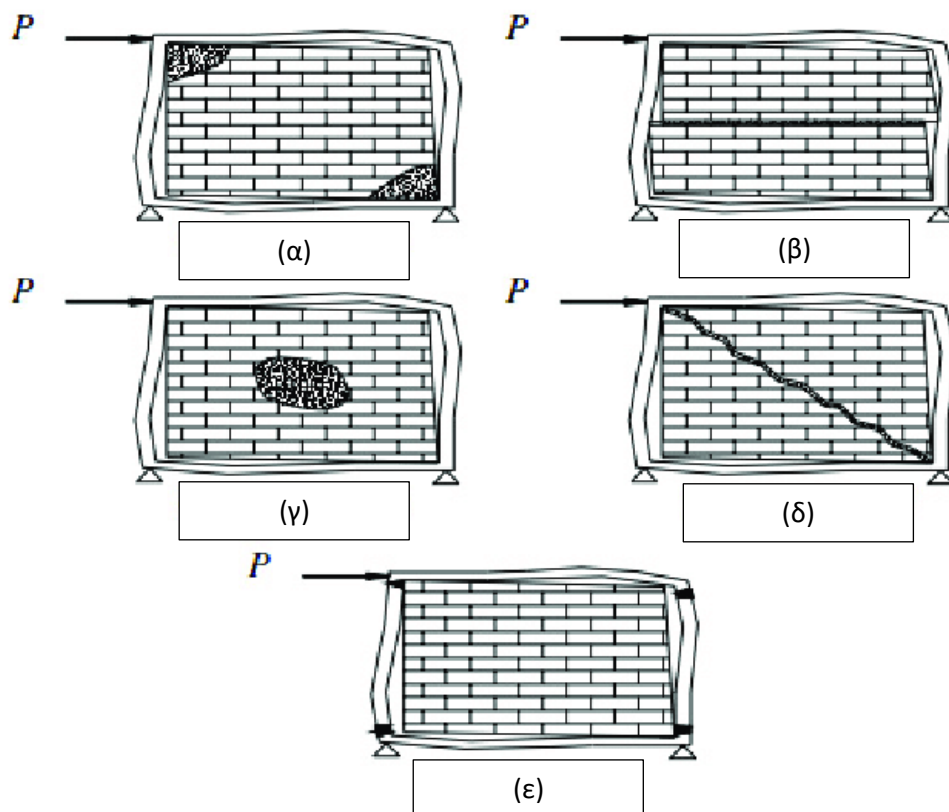
- Δημιουργία μαλακού ορόφου. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συνήθως στο ισόγειο πολυώροφων κτιρίων όπου ο συγκεκριμένος όροφος οδηγείται σε συγκέντρωση πλευρικών παραμορφώσεων. Σύμφωνα με τον Fardis (2000) στα πολυώροφα κτήρια υπάρχουν αρκετές πιθανότητες να παρουσιαστεί βλάβη στον πρώτο όροφο κάτι που συνεπάγεται με την αύξηση των σχετικών μετακινήσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μηχανισμό αστοχίας.
- Συγκέντρωση ανελαστικών παραμορφώσεων σε περιοχή του κτηρίου, σε κάτοψη. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου η τοιχοπλήρωση είναι μη συμμετρική σε κάτοψη, γεγονός που δημιουργεί εκκεντρότητα του κέντρου μάζας προς το κέντρο δυσκαμψίας. Εκτός αυτού έχει παρατηρηθεί και συγκέντρωση ανελαστικών παραμορφώσεων σε περιοχές του κτηρίου καθ' ύψος, σε περιπτώσεις μη συμμετρικής παρουσίας τοιχοπλήρωσης σε όψη, όπως για παράδειγμα σε μία πιλοτή ή απουσία τοιχοπλήρωσης σε ανώτερο επίπεδο του κτηρίου για αρχιτεκτονικούς λόγους.

2.2 Τύποι αστοχίας εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε σεισμικές δράσεις

Σύμφωνα με μελέτες και παρατηρήσεις εδώ και πέντε δεκαετίες οι τύποι αστοχίας των εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να χωριστούν σε πέντε κατηγορίες (Wael El-Dakhkhni et al, 2016):

- Σύνθλιψη γωνιών. Το φαινόμενο αυτό συνεπάγεται με τη σύνθλιψη της τοιχοπλήρωσης σε τουλάχιστον μία από τις γωνίες που είναι σημεία επιβολής φορτίου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1** (α). Αυτό συμβαίνει όταν η τοιχοπλήρωση αποτελείται από αδύναμους οπτόπλινθους και αρμούς ενώ το περιβάλλον πλαίσιο αποτελείται από ισχυρά μέλη.
- Διατμητική ολίσθηση. Η οριζόντια διατμητική ολίσθηση οδηγεί σε αστοχία μεταξύ της διεπιφάνειας των αρμών και των οπτόπλινθων της τοιχοπλήρωσης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1** (β). Αυτό συμβαίνει λόγω της μικρής αντοχής που αναπτύσσεται μεταξύ ενός αδύναμου κονιάματος αρμών και ενός δυνατού πλαισίου.

- Διαγώνια σύνθλιψη. Είναι η θλίψη της τοιχοπλήρωσης σε κεντρική της περιοχή, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1** (γ). Αυτό συμβαίνει όταν η τοιχοπλήρωση είναι σχετικά μικρής αντοχής, όπου η αστοχία προκύπτει από εκτός επιπέδου λυγισμό της τοιχοπλήρωσης.
- Εμφάνιση διαγώνιας ρωγμής. Η διαγώνια ρωγή εμφανίζεται μεταξύ των δύο σημείων επιβολής φόρτισης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1** (δ). Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν κάποιο πλαίσιο είναι αδύναμο ή έχει αδύναμες αρθρώσεις με ισχυρά μέλη και ισχυρή πλήρωση.
- Αστοχία πλαισίου. Προκύπτει από το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα ή στους κόμβους σύνδεσης των υποστυλωμάτων με τις δοκούς όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1** (ε). Αυτή η μορφή αστοχίας μπορεί να συμβεί στην περίπτωση ενός αδύναμου πλαισίου ή ενός πλαισίου με αδύναμες αρθρώσεις σε συνδυασμό με ισχυρά μέλη και ισχυρή πλήρωση.



Σχήμα 2.1: Τυπικές μορφές αστοχίας εμφανιζόμενων τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια ΟΣ (Wael El-Dakhkhni et al., 2016)

2.3 Ενισχύσεις τοιχοπληρώσεων

2.3.1 Γενικά

Με την πάροδο του χρόνου και μέσω διάφορων ερευνών έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ενίσχυσης τοιχοπληρωμένων πλαισίων οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- α) Τις συμβατικές μεθόδους όπου γίνεται χρήση συμβατικών υλικών
- β) Τις νέες μεθόδους ενίσχυσης όπου γίνεται χρήση σύνθετων υλικών

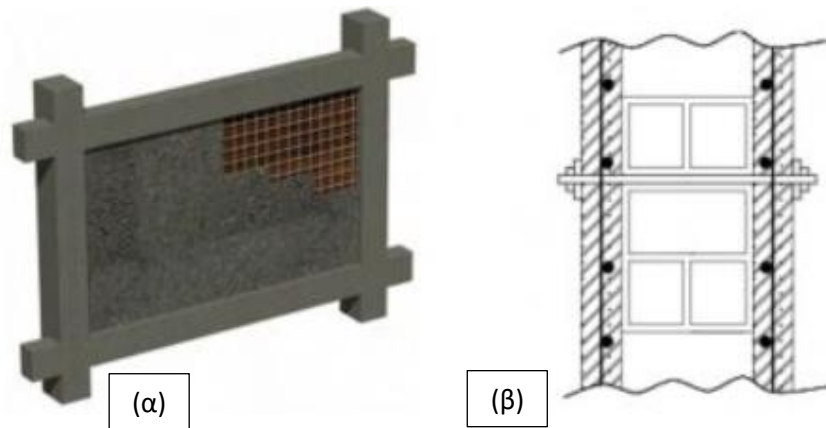
Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τεχνικές ευρέως διαδεδομένες στις ενισχύσεις των κατασκευών όπως η εφαρμογή μανδύων ΟΣ σε δομικά στοιχεία ή εφαρμογή μανδύων κονιάματος ενισχυμένων με πλέγμα χαλύβδινου οπλισμού. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τεχνικές που κάνουν χρήση ινών χάλυβα ή πολυβινυλίου ή γίνεται χρήση εξωτερικά επικολώμενων Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΟΠ) που αποτελούνται από ίνες υψηλής αντοχής. Τελευταία μάλιστα μια νέα τεχνική εδραιώνεται, αυτή της εφαρμογής των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (ΙΑΜ) όπου χρησιμοποιούνται πλέγματα ινών υψηλής αντοχής.

Παρακάτω γίνεται συνοπτική ανασκόπηση των μεθόδων ενίσχυσης τοιχοπληρώσεων.

2.3.2 Συμβατικές μέθοδοι ενίσχυσης

α) Μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος (Reinforced concrete jackets): Ο συγκεκριμένος τύπος ενίσχυσης πραγματοποιείται με εφαρμογή στρώσεων σκυροδέματος, οπλισμένου με οριζόντιες και κατακόρυφες ράβδους χαλύβδινου οπλισμού πάνω στις επιφάνειες των υπό ενίσχυση τοιχοπληρώσεων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2** (α).

Βάσει ΚΑΝΕΠΕ, ο μανδύας ΟΣ πρέπει να εφαρμόζεται και στις δύο πλευρές της τοιχοπλήρωσης και πρέπει να συνδέεται με αυτήν μέσω κοχλιωτών συνδέσμων που καταλήγουν σε πλάκες αγκύρωσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2** (β). Σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ, το ελάχιστο πάχος του μανδύα είναι 50 mm. Τέλος, απαραίτητη θεωρείται η σωστή αγκύρωση του οπλισμού χωρίς ωστόσο να κρίνεται αναγκαία η σύνδεση τους με τα μέλη του πλαισίου.



Σχήμα 2.2: Ενίσχυση τοιχοπλήρωσης με μανδύες ΟΣ: (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση (Ihlogismiki, 2014), (β) τομή τοιχοπλήρωσης ενισχυμένη, εκατέρωθεν, με μανδύες ΟΣ (ΚΑΝΕΠΕ, 2013)

β) Οπλισμένο επίχρισμα (Reinforced Plaster): Η εφαρμογή της εν λόγω τεχνικής μοιάζει αρκετά με την τεχνική ενίσχυσης μανδουλών ΟΣ. Χρησιμοποιούνται στρώσεις κάποιου κονιάματος που είναι οπλισμένο με πλέγμα χαλύβδινου οπλισμού ή με ίνες χάλυβα ή με συνδυασμό χαλύβδινου πλέγματος και πλαστικών ινών. Το κονίαμα, που δύναται να είναι και εκτοξευόμενο, μπορεί να είναι υψηλής αντοχής έχοντας βάση το τσιμέντο, είτε χαμηλότερης αντοχής έχοντας βάση το τσιμέντο με πρόσμιξη ασβέστη. Η χρήση κονιαμάτων, αντί σκυροδέματος που γίνεται στην περίπτωση της ενίσχυσης με μανδύες ΟΣ, επιτρέπει την επίτευξη μικρότερων παχών μανδούα.

Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται η συγκεκριμένη τεχνική ενίσχυσης, όπου γίνεται (α) χρήση πλέγματος οπλισμού και τοποθέτηση βλήτρων για τη σύνδεση της τοιχοπλήρωσης με τη δοκό και τη βάση και (β) εφαρμογή εκτοξευμένου κονιάματος με πλαστικές ίνες.



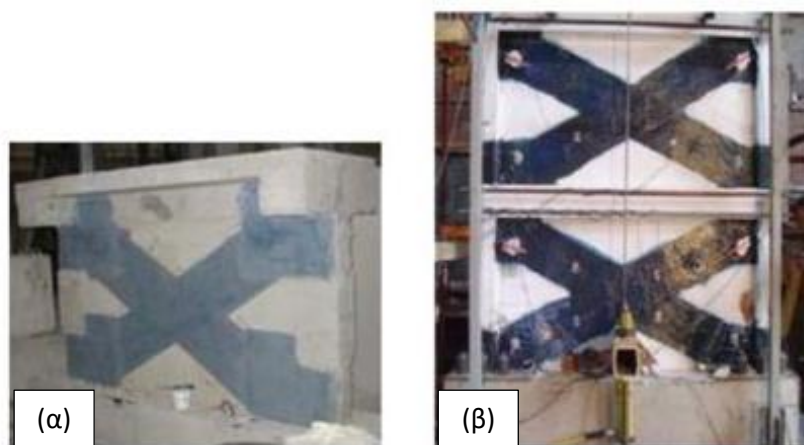
Σχήμα 2.3: (α) Τοποθέτηση πλέγματος χαλύβδινου οπλισμού και βλήτρων χάλυβα στο φάτνωμα ΟΣ (β) εφαρμογή εκτοξευμένου κονιάματος, οπλισμένο με πλαστικές ίνες (Koutromanos et al., 2013)

2.3.3 Μέθοδοι ενίσχυσης με σύνθετα υλικά

α) Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRPs): Η εν λόγω τεχνική ενίσχυσης χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια με πεδίο εφαρμογής που περιλαμβάνει όλα τα δομικά στοιχεία συμπεριλαμβανομένων των τοιχοποιιών. Στοχεύει στην αύξηση των αντοχών τους έναντι εφελκυστικών, θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων.

Στο **Σχήμα 2.4** παρουσιάζονται κάποιες φωτογραφίες από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου. Η διαδικασία εφαρμογής της είναι η εξής:

- Αφαίρεση του επιχρίσματος.
- Επιδιόρθωση των ενδεχόμενων βλαβών με χρήση της κατάλληλης μεθόδου.
- Προετοιμασία των επιφανειών του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση των επιφανειών, λάξευση των γωνιών, κτλ.)
- Επάλειψη των επιφανειών του δομικού στοιχείου με εποξική ρητίνη όπως γίνεται συνήθως, ή με κάποια άλλη συγκολλητική ουσία που μπορεί να προσδώσει κατάλληλη συνάφεια.
- Τοποθέτηση της στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Προτείνεται η πλήρης επαφή του σύνθετου υλικού με τις επιφάνειες εφαρμογής πάνω στο δομικό στοιχείο. Αν χρησιμοποιηθούν υλικά τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται μόνο μία στρώση.
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων, όπου είναι αναγκαίο.
- Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού αν κρίνεται αναγκαίο, σύμφωνα με τη μελέτη ενίσχυσης.
- Με την πάροδο του κατάλληλου χρονικού διαστήματος, περίπου 24 ωρών, επέρχεται η σκλήρυνση του συστήματος και πραγματοποιείται εφαρμογή επιχρίσματος και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου, αν υπάρχει απαίτηση βάσει αρχιτεκτονικών ή αισθητικών απαιτήσεων.

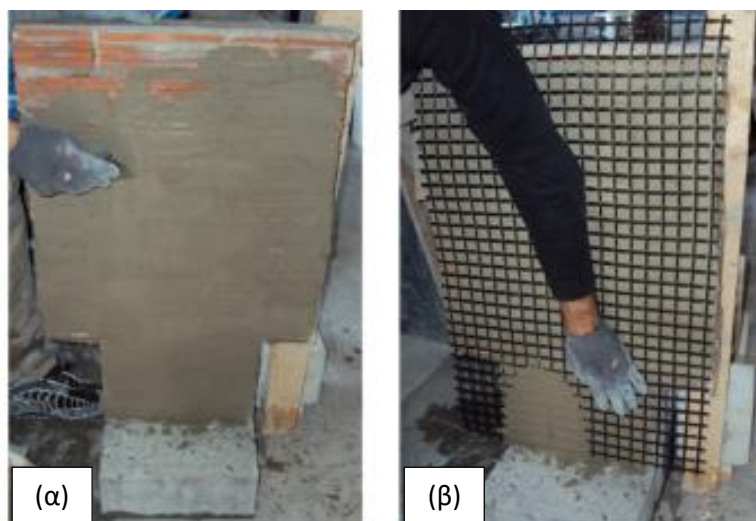


Σχήμα 2.4: Εφαρμογή λωρίδων ΙΟΠ σε (α) μονώροφο τοιχοπληρωμένο πλαίσιο (Erol et al., 2008) (β) δώροφο τοιχοπληρωμένο πλαίσιο (Akin et al., 2009)

β) Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (TRMs): Η εν λόγω τεχνική ενίσχυσης χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια και θεωρείται η εξέλιξη των ΙΟΠ, με πεδίο εφαρμογής που περιλαμβάνει όλα τα δομικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων των τοιχοπληρώσεων. Σαν τεχνική στοχεύει στη μετατροπή τοιχοπληρωμένων πλαισίων σε αξιόπιστα μέλη ανάληψης εντός και εκτός πεδίου φορτίων και στην αύξηση της πλευρικής τους δυσκαμψίας μέσω της αύξησης των αντοχών τους έναντι εφελκυστικών, θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων. Επίσης, σημαντική είναι η συμβολή της στη μείωση της πιθανότητας δημιουργίας μαλακού ορόφου και της πιθανότητας κατάρρευσης των τοιχοπληρώσεων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση μιας κτιριακής κατασκευής (Κούτας, 2015).

Στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζονται κάποιες φωτογραφίες από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου. Η συνηθισμένη διαδικασία ενίσχυσης που ακολουθείται είναι η εξής:

- Προετοιμασία των επιφανειών του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση των επιφανειών, λάξευση των γωνιών, κτλ.).
- Επάλειψη στρώσης κονιάματος πάνω στις ελαφρώς διαβρεγμένες επιφάνειες των δομικών στοιχείων.
- Τοποθέτηση στρώσης ινοπλέγματος (συνίσταται ο πλήρης εμποτισμός των ινοπλεγμάτων στο κονίαμα). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να τοποθετηθούν όλες οι απαραίτητες στρώσεις ινοπλεγμάτων και επικαλυφθούν από το κονίαμα.
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων, αν και όπου κριθεί αναγκαίο.
- Επικάλυψη (εφαρμογή της τελευταίας στρώσης κονιάματος).



Σχήμα 2.5: Εφαρμογή IAM σε δοκίμιο τοιχοποιίας (α) επάλειψη πρώτης στρώσης ανόργανης μήτρας (β) εφαρμογή στρώσης ινοπλέγματος (Koutas et al., 2014)

2.4 Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM)

2.4.1 Γενικά

Τα σύνθετα υλικά έκαναν την εμφάνιση τους στον τομέα των κατασκευών από την αρχαιότητα σε τομείς της οικοδομικής και της οδοποιίας με τη μορφή πλίνθων και ρητινόμορφων συγκολλητικών υλικών. Αργότερα, στα μέσα του 20^{ου} αιώνα έκαναν την εμφάνιση τους, με τη μορφή που έχουν σήμερα, κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, όπου κατασκευάστηκαν θόλοι για radar από σύνθετα υλικά, συνήθως από ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες υάλου. Με το πέρας του πολέμου τα σύνθετα υλικά έγιναν διαθέσιμα στο εμπόριο και ξεκίνησαν να αποκτούν έντονη δημοτικότητα στον τομέα των δομικών έργων. Στις αρχές του 1990 χρονολογούνται οι πρώτες εφαρμογές αυτών στην Ελλάδα.

Η τεχνική ενίσχυσης που αναπτύχθηκε στη σύγχρονη εποχή είναι αυτή των Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΟΠ), διεθνώς γνωστά ως Fiber Reinforced Polymers (FRP). Από διάφορες μελέτες έχει παρατηρηθεί πως η συγκεκριμένη τεχνική ενίσχυσης προσδίδει μεγάλη αύξηση αντοχής, αρχικής δυσκαμψίας αλλά και απορρόφηση επιβαλλόμενης ενέργειας των τοιχοπληρωμένων πλαισίων (π.χ. Saatcioglu et al., 2005, Almusallam and Al-Salloum, 2007, Altin et al., 2008).

Στην περίπτωση των ΙΟΠ, η μήτρα ενίσχυσης είναι οργανική και την αποτελούν εποξειδικές ρητίνες ενώ υλικό ενίσχυσης αποτελούν υφάσματα - μανδύες ινών υάλου,

άνθρακα ή αραμιδίου. Στην επιλογή των συγκεκριμένων ινών οδηγούν το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, η χαμηλή τους πυκνότητα, η υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό, και η ανθεκτικότητα τους στο χρόνο. Επιπρόσθετα, το σχετικά χαμηλό τους βάρος σε συνδυασμό με τον μικρό τους όγκο τα καθιστούν ακόμα πιο προσιτά καθώς δεν αλλάζουν τη γεωμετρία του δομικού στοιχείου και δεν προσθέτουν φορτία λόγω βάρους. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου διαπιστώθηκε πως οι ρητίνες παρουσιάζουν αδυναμία απόδοσης σε υψηλές θερμοκρασίες και υγρές επιφάνειες ενώ παράλληλα ελλοχεύουν κίνδυνοι εργατικών ατυχημάτων σε περιπτώσεις αναθυμιάσεων ή επαφής τους με το δέρμα. Επιπλέον, οι ρητίνες από οικονομικής άποψης θεωρούνται αρκετά υψηλού κόστος.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα των ΙΟΠ οδήγησαν στην εκ νέου αναζήτηση σύνθετων υλικών τα οποία θα δίνουν άμεσες λύσεις στα προαναφερθέντα προβλήματα. Οι λύσεις βρέθηκαν στα λεγόμενα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη μήτρα (IAM), γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία ως Textile Reinforced Mortars (TRM). Από διάφορες μελέτες έχει παρατηρηθεί πως η συγκεκριμένη τεχνική ενίσχυσης προσδίδει εξίσου θετικά αποτελέσματα στον τομέα των ενισχύσεων δομικών στοιχείων (π.χ. Triantafillou and Papanicolaou, 2006, Triantafillou, 2007, Papanicolaou et al., 2007a, 2007b).

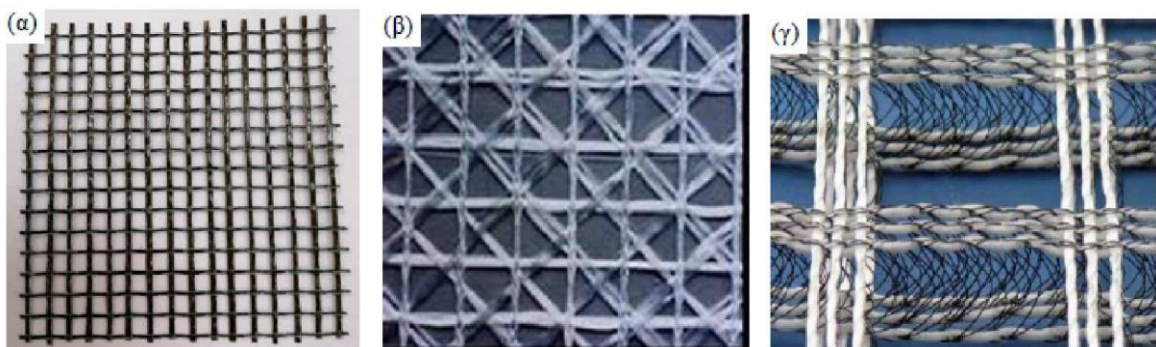
Τα IAM υπερτερούν των ΙΟΠ όντας απαλλαγμένα των μειονεκτημάτων τους ενώ ταυτόχρονα διατηρούν τα κύρια πλεονεκτήματά τους. Συνήθως η μήτρα ανόργανης φύσης είναι κάποιο κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης και είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον σε αντίθεση με τις οργανικές μήτρες. Ωστόσο μια νέα σύσταση κονιάματος, αυτή του γεωπολυμερούς, έχει αρχίσει τελευταία να αποκτά δημοτικότητα. Ο λόγος είναι ότι όχι μόνο θεωρείται πιο φιλικό προς το περιβάλλον αλλά παρουσιάζει ανταγωνιστικές μηχανικές ιδιότητες με κονιάματα τσιμεντοειδούς σύστασης και οδηγεί στη μείωση θερμικής αγωγιμότητας (Longo et al., 2021). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάταξη των ινών του υλικού ενίσχυσης καθώς οι ίνες μορφώνονται σε ινοπλέγματα, των οποίων οι κλώνοι ισαπέχουν ανά διεύθυνση και η συνάφεια μεταξύ ινών και μήτρας ενίσχυσης παρουσιάζεται σαφώς βελτιωμένη συγκριτικά με τα ΙΟΠ.

2.4.2 Ινοπλέγματα

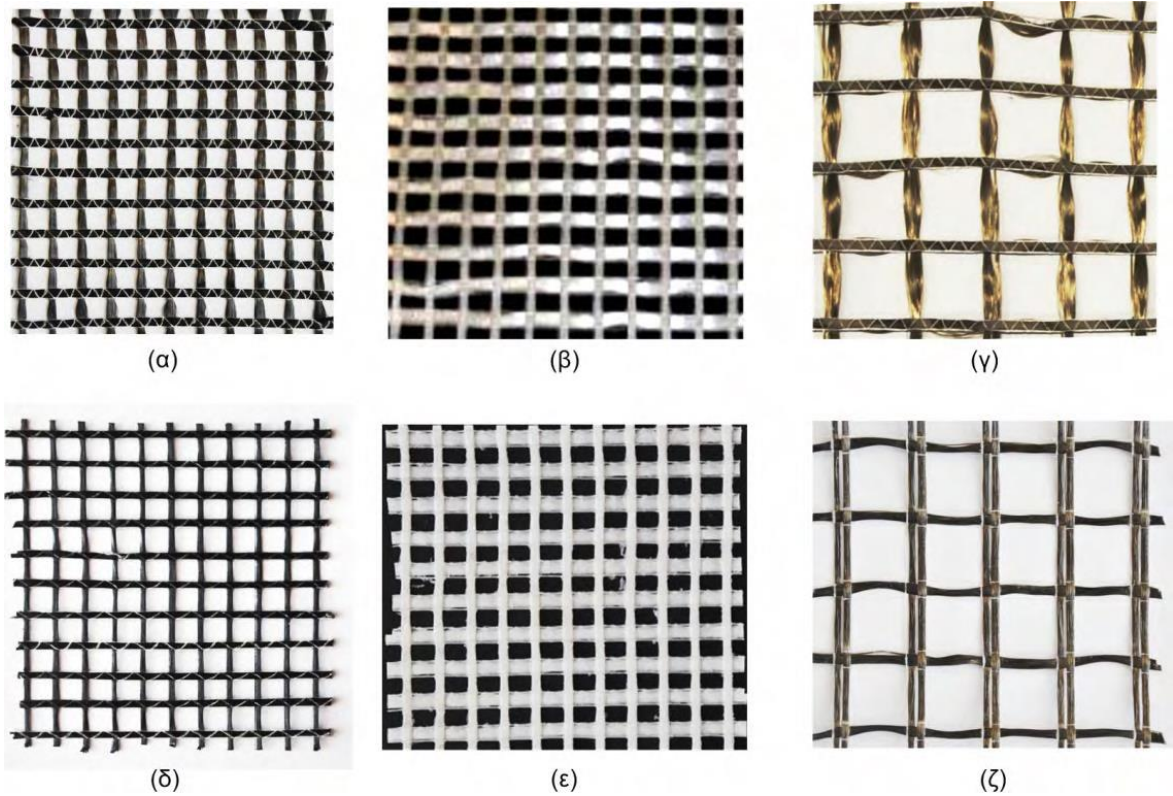
Τα λεγόμενα ινοπλέγματα είναι πλέγματα ινών που μορφώνονται σε κλώνους. Τα συνήθη υλικά ινών είναι άνθρακας, γυαλί, βασάλτης και αραμίδιο. Οι αποστάσεις των κλώνων

πρέπει να είναι σταθερές μεταξύ τους ανά διεύθυνση. Οι κλώνοι είναι διατεταγμένοι σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις δημιουργώντας έτσι βροχίδες, δηλαδή κενά μεταξύ τους. Τα κενά αυτά αποσκοπούν στο να εισχωρήσει κατάλληλα το πλέγμα, που λειτουργεί σαν οπλισμός, στη μήτρα ενίσχυσης, αναπτύσσοντας την απαραίτητη συνάφεια η οποία θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα παραλαβής φορτίων από το σύνθετο υλικό. Η διεύθυνση που θα τοποθετηθούν οι ίνες πρέπει να είναι παράλληλη στη διεύθυνση που πρόκειται να αναπτυχθούν τάσεις ώστε να γίνει κατάλληλη παραλαβή των αναπτυσσόμενων φορτίων. Οι τρόποι κατασκευής των πλεγμάτων είναι διάφοροι και εξαρτώνται από το πεδίο εφαρμογής τους, ενώ παράγονται σε μια μεγάλη ποικιλία σχεδίων και μεγεθών. Αναφορικά, κάποιες τεχνικές κατασκευής τους είναι η ύφανση κλώνων, η συγκράτηση των κλώνων με πρόσθετα νήματα, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις πραγματοποιείται εμποτισμός του πλέγματος με ρητίνες με σκοπό την καλύτερη δομική ακεραιότητα του πλέγματος (Koutas et al, 2019). Επιπρόσθετα, πρέπει να αναφερθεί πως σε περιπτώσεις που γίνεται χρήση πλεγμάτων από ίνες υάλου θα πρέπει να γίνεται είτε χρήση υάλου τύπου AR (alkali-resistant) είτε εμποτισμός των δεσμών των ινών πριν τη χρήση τους με κάποιο πολυμερές, με στόχο την αποφυγή μιας πρώιμης φθοράς των ινών λόγω της σύστασης υψηλής αλκαλικότητας των κονιαμάτων που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν ως μήτρα του σύνθετου υλικού.

Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζονται κάποια ινοπλέγματα με διαφορετικό αριθμό διευθύνσεων και στο **Σχήμα 2.7** παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι ινοπλεγμάτων εμποτισμένων και μη με ρητίνες.



Σχήμα 2.6: Ινοπλέγματα (α) δύο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) τριών διαστάσεων. (Μπουρνάς, 2008), (Κούτας 2015)



Σχήμα 2.7: Ινοπλέγματα με κλώνους ινών κάθετους μεταξύ τους σε δύο διευθύνσεις (α) πλέγμα ινών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, (β) πλέγμα ινών υάλου χωρίς επικάλυψη, (γ) πλέγμα ινών βασάλτη χωρίς επικάλυψη, (δ) πλέγμα ινών άνθρακα με επικάλυψη, (ε) πλέγμα ινών υάλου με επικάλυψη, (ζ) πλέγμα ινών βασάλτη με επικάλυψη. (Κούτας, 2015)

2.4.3 Ανόργανη μήτρα

Η ανόργανη μήτρα λειτουργεί ως συγκολλητικό υλικό του ινοπλέγματος πάνω στο δομικό στοιχείο ενώ καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα του συστήματος IAM να παραλαμβάνει φορτία και ταυτόχρονα την ανθεκτικότητα του συστήματος. Επομένως το συγκεκριμένο υλικό πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις που είναι οι εξής:

- Το υλικό κατασκευής της χρειάζεται να είναι λεπτόκοκκο. Αυτό θα προσδώσει τη δυνατότητα διείσδυσης του ινοπλέγματος στη μήτρα προσδίδοντας την καλύτερη δυνατή συνάφεια με το δομικό στοιχείο.
- Εξασφάλιση καλής εργασιμότητας. Χρειάζεται ένας κατάλληλος χρόνος επεξεργασίας ώστε να πραγματοποιηθεί η τοποθέτηση όλων των στρώσεων του πλέγματος χωρίς να υπάρξει το φαινόμενο συστολής ξήρανσης του κονιάματος.
- Παρουσία υψηλού ιξώδους. Αυτό θα αποτρέψει τη ροή του αρχικά ρευστού υλικού σε κεκλιμένες και κατακόρυφες επιφάνειες.

- Χημική δομή συμβατή με αυτή του ινοπλέγματος. Έτσι προφυλάσσεται το ινόπλεγμα από επιβλαβείς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία.
- Επάρκεια διατμητικής αντοχής. Με αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθεί η αποκόλληση του IAM από το δομικό στοιχείο.

Ευρέως διαδομένα, ως μήτρα ενίσχυσης των IAM, είναι κονιάματα τσιμεντοειδούς σύστασης, τύπου Portland. Σε αρκετές περιπτώσεις αξιοποιούνται ιδιότητες διαφόρων πολυμερών που μπορούν να εισχωρήσουν εντός των ινών που απαρτίζουν τους κλώνους. Αυτό συνίσταται όταν επιδιώκεται η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος και βελτίωση της συνάφειας του IAM με το δομικό στοιχείο, πραγματοποιώντας προσθήκη κλάσματος πολυμερών (Koutas et al, 2019).

2.5 Εύρος εφαρμογών των IAM στο πεδίο των κατασκευών

2.5.1 Γενικά

Η εκμετάλλευση ιδιοτήτων των IAM όπως ο χρόνος επεξεργασίας και εφαρμογής τους, η εργασιμότητα τους, η ικανότητα να μην αλλάζουν τη γεωμετρία των δομικών στοιχείων στα οποία εφαρμόζονται καθώς και η υψηλή τους αποδοτικότητα έχουν συμβάλει στο να προτιμάται η χρήση τους σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι δύο κύριες κατηγορίες ενίσχυσης που διακρίνονται στον τομέα των κατασκευών είναι αυτής της ενίσχυσης στοιχείων ΟΣ και αυτής της ενίσχυσης στοιχείων τοιχοποιίας.

2.5.2 Κατηγορίες ενίσχυσης

α) Ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος

Βάσει μελετών που έχουν διεξαχθεί γύρω από τις εν λόγω ενισχύσεις των στοιχείων ΟΣ, διακρίνονται οι εξής υποκατηγορίες:

- Περίσφιγξη στοιχείων ΟΣ, με σκοπό την αύξηση αντοχής και της παραμορφωσιμότητας των εξεταζόμενων στοιχείων (Triantafillou et al., 2006, Bournas et al., 2007, Ortlepp et al., 2009, Ombres, 2014).
- Περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές, με σκοπό την αύξηση της παραμορφωσιμότητας τους η οποία παρουσιάζεται μειωμένη λόγω λυγισμού των

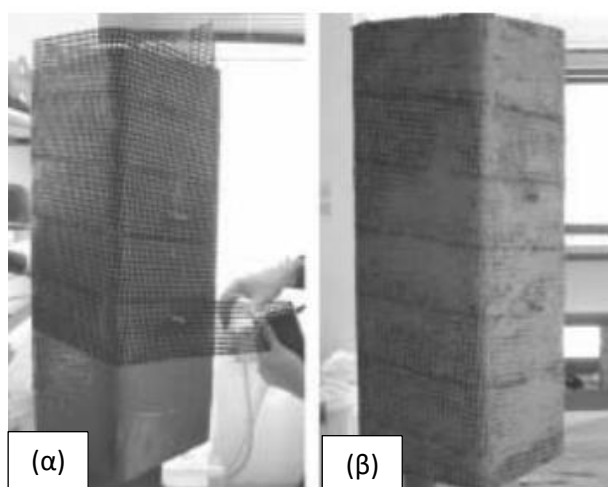
ράβδων του διαμήκους οπλισμού ή λόγω ανεπαρκούς μήκους μάτισης τους (Bournas et al., 2009).

- Ενίσχυση κόμβων δοκών – υποστυλωμάτων ΟΣ (Al-Salloum et al., 2011)
- Ενίσχυση δοκών και πλακών ΟΣ έναντι κάμψης (Triantafillou et al., 2005, Bruckner et al., 2006, Papanicolaou et al., 2009, Ambrisi and Foracci, 2011, Elsanadedy et al., 2013)
- Ενίσχυση δοκών έναντι διάτμησης (Triantafillou and Papanicolaou, 2006, Bruckner et al., 2006, Al-Salloum et al., 2012, Azam and Soudki, 2014, Tzoura and Triantafillou, 2014).

Ενδεικτικά, αναλύονται κάποιες από τις παραπάνω μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες κατηγορίες.

- Περίσφιξη στοιχείων ΟΣ: Οι Triantafillou et al. (2006) και οι Bournas et al. (2007) ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο αντικείμενο, μέσω πειραματικών δοκιμών κεντρικής θλίψης. Από τις δοκιμές προέκυψε πως η θλιπτική αντοχή των στοιχείων ΟΣ διπλασιάστηκε και η υφιστάμενη παραμόρφωση τους τετραπλασιάστηκε, λόγω παρουσίας των ΙΑΜ. Μάλιστα παρουσιάστηκαν πιο αποτελεσματικά από τη μέθοδο ενίσχυσης των ΙΟΠ κατά 80% όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή και κατά 50% σε όρους παραμορφωσιμότητας. Τέλος, παρατηρήθηκε παράταση του φαινομένου του λυγισμού του διαμήκους οπλισμού με παρουσία μικρής συμβολής του εγκάρσιου οπλισμού στη θλιπτική αντοχή των στοιχείων.

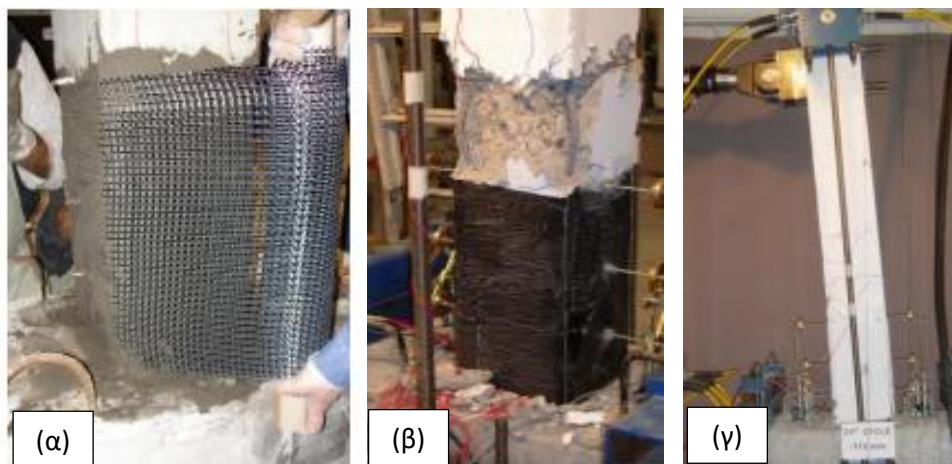
Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζεται ένα δοκίμιο τετραγωνικής διατομής κατά τη φάση της ενίσχυσης του.



Σχήμα 2.8: Δοκίμιο ΟΣ τύπου υποστυλώματος (α) κατά την ενίσχυση, (β) στην τελική του μορφή (Triantafillou et al., 2006)

- Περίσφιξη υποστρωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές: Οι Bournas et al. (2009) ασχολήθηκαν με δοκιμές κυκλικής πλευρικής φόρτισης σε στοιχεία υποστρωμάτων με σκοπό τη μελέτη της απόδοσης των ΙΑΜ και ταυτόχρονα της σύγκρισης τους με την τεχνική ενίσχυσης των ΙΟΠ. Για την περίπτωση των ΙΑΜ σημειώθηκε πως η ικανότητα παραλαβής παραμορφώσεων των ενισχυμένων στοιχείων αυξήθηκε κατά δύομιση φορές και παρουσιάστηκε μια βελτιωμένη συμπεριφορά του φαινομένου εμφάνισης πλαστικής άρθρωσης στη βάση του υποστρώματος. Το συμπέρασμα της συγκεκριμένης μελέτης ήταν πως τα ΙΑΜ αποτελούν λύση έναντι ανεπάρκειας λόγω μάτισης ή λυγισμού του διαμήκους οπλισμού και εξίσου αποτελεσματική τεχνική όπως τα ΙΟΠ.

Στο **Σχήμα 2.9** παρουσιάζονται τρία στιγμιότυπα (α) κατά τη φάση της ενίσχυσης της κρίσιμης περιοχής ενός υποστρώματος στη βάση του με ΙΑΜ (β) από τη στιγμή του λυγισμού του διαμήκους οπλισμού υποστρώματος ενισχυμένο με ΙΟΠ, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στην κρίσιμη και ενισχυμένη περιοχή της βάσης, (γ) υποστρώματος ενισχυμένο με ΙΑΜ άνθρακα, στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, που όπως φαίνεται δεν έχει υποστεί λυγισμό του διαμήκους οπλισμού.

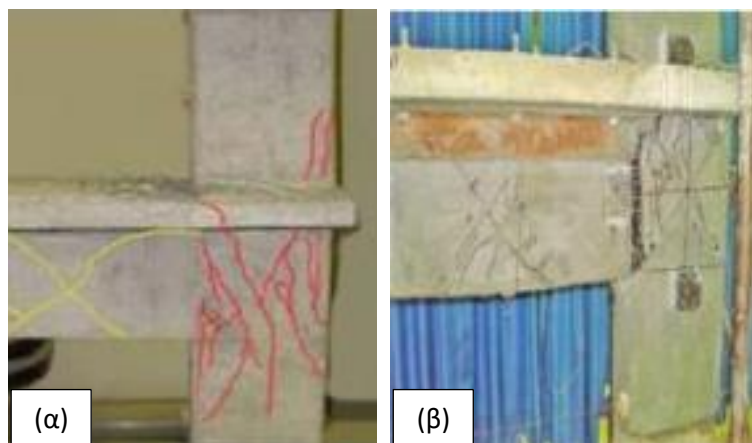


Σχήμα 2.9: (α) Ενίσχυση κρίσιμης περιοχής στη βάση υποστρώματος με μανδύες ΙΑΜ, (β) λυγισμός διαμήκους οπλισμού πάνω από την ενισχυμένη με ΙΟΠ κρίσιμη περιοχή, (γ) μορφή αστοχίας υποστρώματος ενισχυμένο με ΙΑΜ (Bournas et al., 2009)

- Ενίσχυση κόμβων δοκών – υποστρωμάτων ΟΣ: Με αυτή την έρευνα ασχολήθηκαν οι Al-Salloum et al. (2011) υποβάλλοντας κόμβους δοκού - υποστρώματος σε δοκιμές κυκλικής φόρτισης. Η αύξηση της αντοχής που προσέφεραν οι ενισχύσεις των ΙΑΜ έφτασαν σε ένα ποσοστό κοντά στο 15% με την αύξηση της παραμόρφωσης να

σημειώνεται στο 50%. Επίσης, από τη σύγκριση μεταξύ ενισχύσεων ΙΟΠ – ΙΑΜ προέκυψε ότι η ενίσχυση με ΙΟΠ (υάλου, άνθρακα) προσδίδει μεγαλύτερη αύξηση αντοχής κατά περίπου 50%, ενώ σε όρους πλευρικής παραμορφωσιμότητας οι δύο τύποι ενισχύσεων έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά.

Στο **Σχήμα 2.10** παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη στιγμή αστοχίας (α) μη ενισχυμένου κόμβου (β) ενισχυμένου κόμβου.



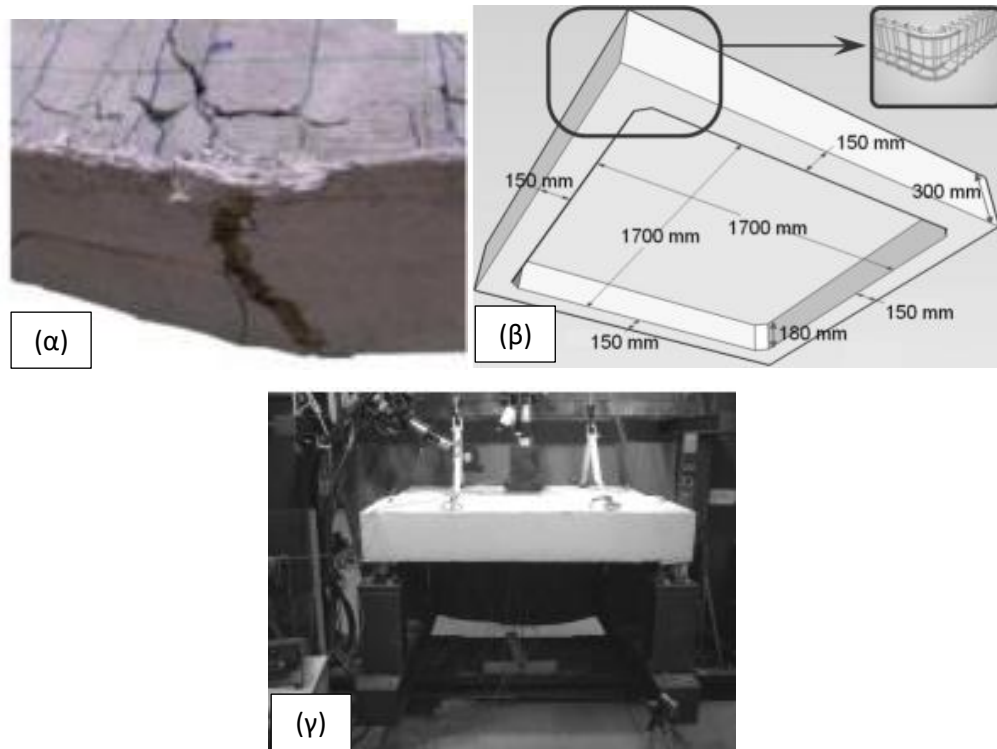
Σχήμα 2.10: Μορφές αστοχίας (α) μη ενισχυμένου κόμβου, (β) ενισχυμένου κόμβου με ΙΑΜ (Al-Salloum et al., 2011)

- Ενίσχυση δοκών και πλακών ΟΣ έναντι κάμψης: Οι Triantafillou et al. (2005), D'Ambrisi and Foracci (2011), Elsanadedy et al. (2013) διεξήγαγαν δοκιμές καμπτικής ενίσχυσης σε στοιχεία τύπου δοκού με ΙΑΜ. Η αύξηση της καμπτικής αντοχής των στοιχείων παρουσιάστηκε ανάλογη του ποσοστού οπλισμού ενίσχυσης.

Στο **Σχήμα 2.11** (α) παρουσιάζεται μία μορφή καμπτικής αστοχίας που προέκυψε κατά τη διάρκεια πειραματικών δοκιμών κάμψης με θραύση και ολίσθηση ινών του πλέγματος από το κονίαμα.

Οι Bruckner et al. (2006), Papanicolaou et al. (2009) και Loreto et al. (2014) διεξήγαγαν δοκιμές καμπτικής ενίσχυσης σε στοιχεία τύπου πλάκας με ΙΑΜ. Οι Papanicolaou et al. (2009) παρατήρησαν πως για ενισχυμένες πλάκες δύο διευθύνσεων παρουσιάστηκε αύξηση της δυσκαμψίας τους και αύξηση του φορτίου αστοχίας τους κατά 20-53%, αναλόγως τον αριθμό των στρώσεων ενίσχυσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις υπόλοιπες δοκιμές των ερευνητών που αναφέρθηκαν φάνηκαν παρεμφερή με αυτά των δοκιμών έναντι κάμψης στοιχείων δοκού, για αυτό και ομαδοποιήθηκαν οι δύο υποκατηγορίες δοκιμών.

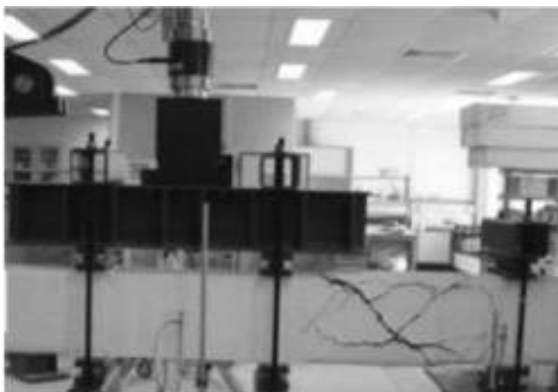
Στο **Σχήμα 2.11** παρουσιάζονται επίσης (β) οι ακριβείς διαστάσεις δοκιμίου πλάκας, δύο διευθύνσεων, που χρησιμοποιήθηκε και (γ) η πειραματική διάταξη.



Σχήμα 2.11: (α) Μορφή αστοχίας ενισχυμένης δοκού με IAM (D' Ambrisi and Foracci, 2011), (β) Γεωμετρία δοκιμίου πλάκας, (γ) πειραματική διάταξη (Paranicolaou et al., 2009)

- Ενίσχυση δοκών έναντι διάτμησης: Οι Triantafillou and Paranicolaou (2006) υπέβαλαν δοκούς ορθογωνικής διατομής σε δοκιμές κυκλικής φόρτισης. Τα δοκίμια ενισχύθηκαν σε τέμνουσα με κλειστούς μανδύες IAM με σκοπό τη σύγκριση τους με αντίστοιχη ενίσχυση μανδυνών ΙΟΠ. Παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής τους έναντι τέμνουσας σε ποσοστό 100% όσον αφορά τα IAM και κατά 145% όσον αφορά τα ΙΟΠ.

Στο **Σχήμα 2.12** παρουσιάζεται μια ενισχυμένη δοκός με μανδύα IAM κατά την αστοχία της.



Σχήμα 2.12: Μορφή αστοχίας ενισχυμένης ορθογωνικής δοκού σε τέμνουσα με ΙΑΜ (Paranicolau et al., 2009)

β) Ενίσχυση στοιχείων τοιχοποιίας

Βάσει μελετών που έχουν διεξαχθεί γύρω από τις εν λόγω ενισχύσεις των στοιχείων τοιχοποιίας, διακρίνονται οι εξής υποκατηγορίες.

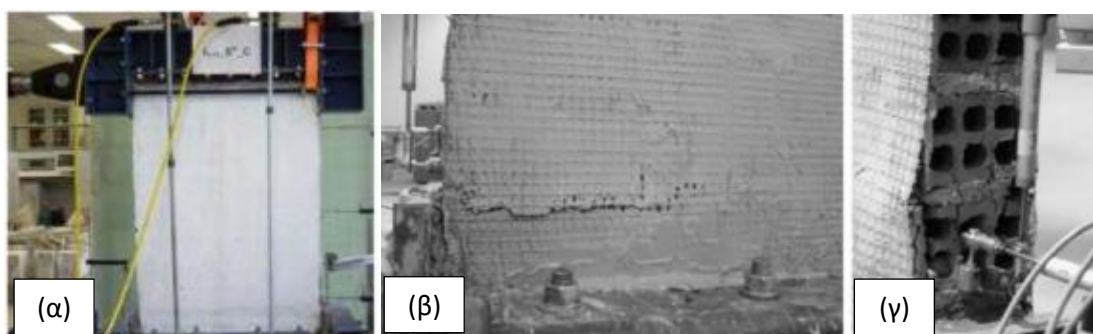
- Ενίσχυση για εντός επιπέδου ανάληψη τέμνουσας (Paranicolau et al., 2007, 2011)
- Περίσφιξη στοιχείων τοιχοποιίας τύπου υποστυλώματος (Ombres, 2015)
- Ενίσχυση τοξοτών κατασκευών από τοιχοποιία (Leire Garmendia et al., 2014)
- Ενίσχυση έναντι διαγώνιας θλίψης (Prota et al., 2006, Parisi et al., 2013, Koutas et al., 2015, Gulinelli et al., 2019, 2020)
- Ενίσχυση έναντι εκτός επιπέδου κάμψης (Paranicolau et al., 2008, Harajli et al., 2010 Paranicolau et al., 2011, Babaeidarabad et al., 2014)
- Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ (Koutas et al., 2015, Gkournelos et al., 2019, Pohoryles and Bournas, 2020)

Ενδεικτικά, αναλύονται κάποιες από τις παραπάνω μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες κατηγορίες. Για τις υποκατηγορίες της ενίσχυσης έναντι διαγώνιας θλίψης και εκτός επιπέδου κάμψης πραγματοποιείται εκτενέστερη ανάλυση σε επόμενες ενότητες, καθώς αποτελούνε αντικείμενο έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- Ενίσχυση για εντός επιπέδου ανάληψη τέμνουσας: Οι Paranicolau et al. (2007) υπέβαλαν σε αξονικό φορτίο δοκίμια τοιχοποιίας, αμφίπλευρα ενισχυμένα με στρώσεις ΙΑΜ. Παρατηρήθηκε αύξηση αντοχής των ενισχυμένων τοιχοσωμάτων κατά

έξι έως εικοσιπέντε φορές συγκριτικά με την αντοχή των μη ενισχυμένων τοιχοσωμάτων, διακύμανση που οφείλεται στο ασκούμενο αξονικό φορτίο και στον αριθμό των στρώσεων ενίσχυσης. Επίσης, ανεξαρτήτως των αριθμών των στρώσεων ενίσχυσης, παρατηρήθηκε αύξηση των πλευρικών παραμορφώσεων κατά δεκατρείς φορές. Συγκριτικά με όσα ενισχύθηκαν με ΙΟΠ παρατηρήθηκε αύξηση ικανότητας παραμόρφωσης, κάτι που δεν ίσχυε και για ικανότητα παραλαβής φορτίου.

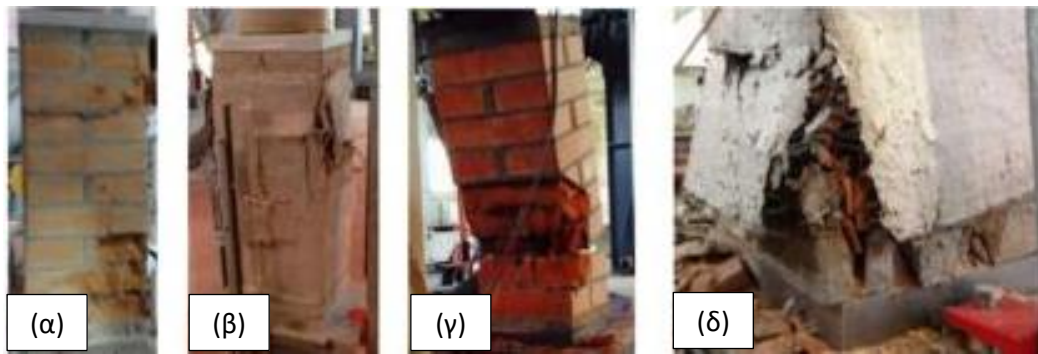
Στο **Σχήμα 2.13** παρουσιάζεται (α) η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και (β), (γ) μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν σε κάποιο δοκίμιο της συγκεκριμένης σειράς πειραμάτων.



Σχήμα 2.13: (α) Πειραματική διάταξη εντός επιπέδου φόρτισης δοκιμίων τοιχοποιίας, (β) ρήξη μανδύα ΙΑΜ, (γ) σύνθλιψη οπτόπλινθου στη βάση του δοκιμίου (Papanicolaou et al., 2007)

- Περίσφιγξη στοιχείων τοιχοποιίας τύπου υποστυλώματος: Ο Ombres (2015) ασχολήθηκε με τη συγκεκριμένη έρευνα υποβάλλοντας ενισχυμένα δοκίμια τοιχοπλήρωσης, τύπου υποστυλώματος, σε δοκιμές κεντρικής θλίψης. Σημειώθηκε αύξηση της θλιπτικής τους αντοχής σχεδόν διπλάσια και αύξηση θλιπτικής παραμόρφωσης τετραπλάσια από αυτές των μη ενισχυμένων δοκιμίων. Σε δοκίμια που ενισχύθηκαν με ΙΟΠ η αύξηση θλιπτικής αντοχής ήταν παρόμοιας τάξης, αλλά η αύξηση παραμόρφωσης των ενισχυμένων δοκιμίων με ΙΑΜ ήταν αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που προσέφεραν τα ΙΟΠ.

Στο **Σχήμα 2.14** παρουσιάζονται διάφορες μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν κατά τις δοκιμές κεντρικής θλίψης σε ενισχυμένα και μη δοκίμια.



Σχήμα 2.14: Μορφές αστοχίας (α) μη ενισχυμένου δοκιμίου, (β) ενισχυμένου δοκιμίου με μία στρώση IAM, (γ) μη ενισχυμένου δοκιμίου, (δ) ενισχυμένου δοκιμίου με δύο στρώσεις IAM (Ombres, 2015)

- Ενίσχυση τοξοτών κατασκευών από τοιχοποιία: Οι Leire Garmendia et al. (2014) συνέβαλαν στην εν λόγω έρευνα με μονοτονική καταπόνηση τόξων από τοιχοποιία ενισχυμένων με IAM. Τρία εξ αυτών ενισχύθηκαν στην εσωτερική-κάτω παρειά, τρία στην εξωτερική-άνω παρειά και τρία ενισχύθηκαν αμφίπλευρα. Η αύξηση της αντοχής τους συγκριτικά με τα μη ενισχυμένα δοκίμια ήταν μεγαλύτερη οκτώ, δέκα, δεκαεννέα φορές αντίστοιχα. Επίσης αυξήθηκε η ικανότητα παραμόρφωσης των τόξων.

Στο **Σχήμα 2.15** παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν, ανάλογα με τον τρόπο ενίσχυσης των δοκιμίων.

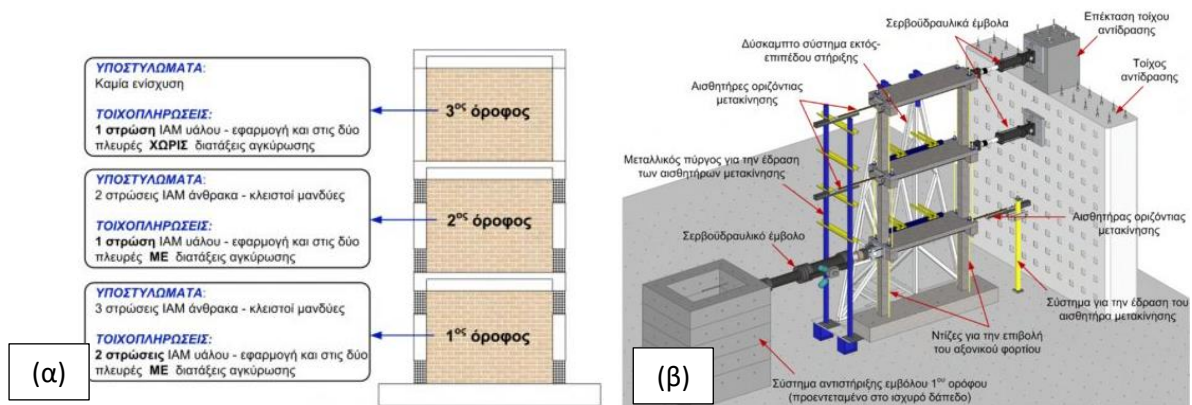


Σχήμα 2.15: Μορφές αστοχίας (α) ενισχυμένου δοκιμίου στην κάτω παρειά, (β) ενισχυμένου δοκιμίου στην άνω παρειά, (γ) αμφίπλευρα ενισχυμένου δοκιμίου (Leire Garmendia et al., 2014)

- Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ: Ο Koutas (2015) ασχολήθηκε με τη συγκεκριμένη έρευνα υποβάλλοντας τριώροφα τοιχοπληρωμένα πλαίσια, κλίμακας 2/3, σε δοκιμές εντός επιπέδου κυκλικής φόρτισης και ελεύθερης ταλάντωσης, με τη δεύτερη δοκιμή να αποσκοπεί στον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών

των δύο δοκιμών. Ένα δοκίμιο αποτέλεσε το δοκίμιο αναφοράς (μη ενισχυμένο δοκίμιο) και ένα δοκίμιο ενισχύθηκε με μανδύα IAM. Γενικά ενισχύθηκαν περιοχές των υποστυλωμάτων, οι τοιχοπληρώσεις και από τις δύο πλευρές, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και αγκύρια για την αγκύρωση του μανδύα IAM περιμετρικά της τοιχοπλήρωσης.

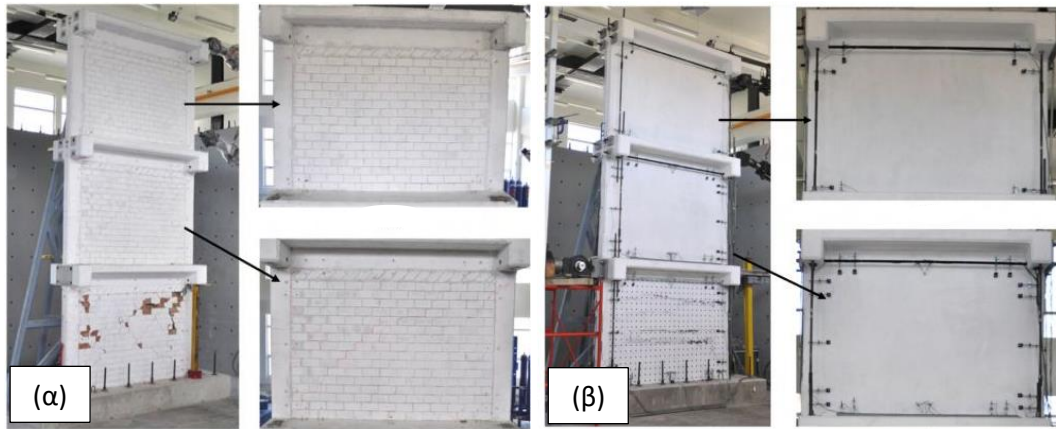
Στο **Σχήμα 2.16** παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση (α) του ενισχυμένου πλαισίου με λεπτομέρειες περί της ενίσχυσης του και (β) της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 2.16: Σχηματική απεικόνιση (α) λεπτομερειών ενίσχυσης με IAM τριώροφου τοιχοπληρωμένου πλαισίου, (β) πειραματικής διάταξης κυκλικής φόρτισης (Koutas, 2015)

Στόχος της συγκεκριμένης τεχνικής ενίσχυσης ήταν η αύξηση πλευρικής αντοχής και δυσκαμψίας των μελών των πλαισίων και η μετατροπή τους σε πιο ικανά μέλη παραλαβής εντός επιπέδου φορτίσεων. Παρατηρήθηκε αύξηση της ικανότητας της πλευρικής αντίστασης των πλαισίων και της ικανότητας τους να παραμορφώνονται. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε αύξηση της τέμνουσας βάσης και της μετακίνησης του τελευταίου ορόφου σε ποσοστά κοντά στο 55% και 56% αντίστοιχα. Μάλιστα, για τη συγκριμένη περίπτωση φόρτισης το ενισχυμένο δοκίμιο κατανάλωσε 22,5% περισσότερη ενέργεια από αυτή που κατανάλωσε το μη ενισχυμένο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως οι μανδύες IAM λειτούργησαν υπέρ της ανάπτυξης μεγαλύτερων διατμητικών παραμορφώσεων και οδήγησαν στην αποφυγή διατμητικών βλαβών – αστοχιών.

Στο **Σχήμα 2.17** παρουσιάζονται στιγμιότυπα των δύο τοιχοπληρωμένων πλαισίων στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας.

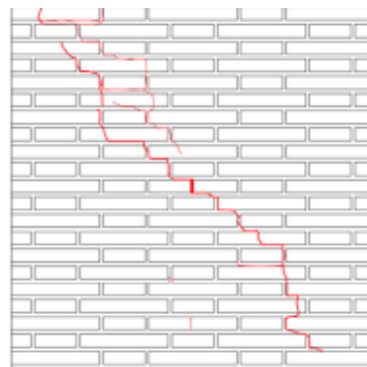


Σχήμα 2.17: (α) Μη ενισχυμένο δοκίμιο, (β) ενισχυμένο δοκίμιο, μετά το πέρας της κυκλικής φόρτισης (Koutas, 2015)

2.6 Συμπεριφορά τοιχίσκων ενισχυμένων με IAM σε διαγώνια θλίψη

2.6.1 Γενικά

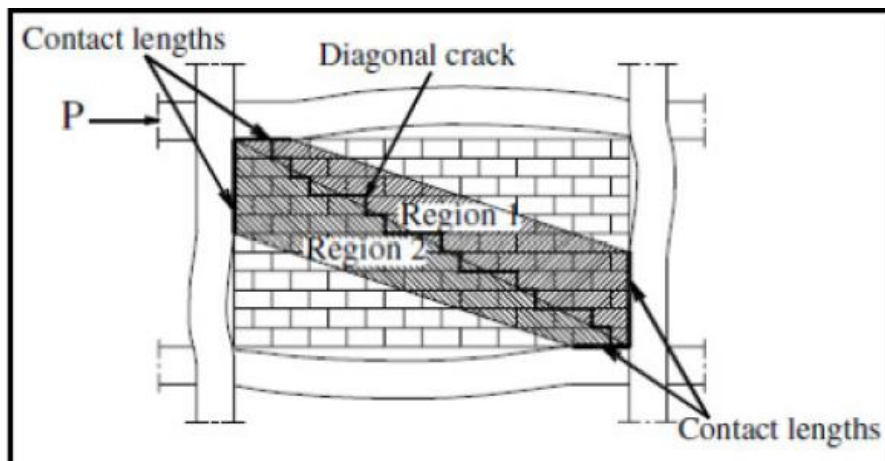
Μια από τις επικρατέστερες μορφές αστοχίας τοιχοποιιών είναι αυτή της διατμητικής αστοχίας, δηλαδή η εμφάνιση μια διαγώνιας ρωγμής 45° μεταξύ δύο γωνιών της, στη διεύθυνση επιβολής φορτίου. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει σε περιπτώσεις που το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο είναι μεγάλο και ο λόγος πλευρών και η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας είναι μικρές. Το **Σχήμα 2.18** αποτυπώνει μια τυπική μορφή διατμητικής αστοχίας. Όπως φαίνεται οι ρωγμές ακολουθούν κυρίως τη διάταξη των αρμών, ενώ μπορούν να εμφανιστούν και σε οπτόπλινθους σε περίπτωση που είναι πιο αδύναμοι και το κονίαμα πιο ισχυρό.



Σχήμα 2.18: Ενδεικτική μορφή διατμητικής αστοχίας (Garcia-Ramonda et al, 2020)

Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται συχνά σε περιπτώσεις τοιχοπληρωμένων πλαισίων που υπόκεινται σε σεισμικές δράσεις. Οι Wael El-Dakhkhni et. al. (2004)

ερευνώντας το φαινόμενο διαπίστωσαν πως κατά τη μεταφορά σεισμικών φορτίων σε κάποιο πλαίσιο, προκαλείται απώλεια επαφής ορισμένων περιοχών των μελών του με την τοιχοποιία. Ωστόσο, μεταξύ των επιφανειών που συνεχίζουν να βρίσκονται σε επαφή με το πλαίσιο, σχηματίζονται ρωγμές σε διαγώνια διεύθυνση. Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται ως “Contact Lengths” και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.19** χωρίζεται σε δύο περιοχές (Region 1, Region 2) μεταξύ των οποίων σχηματίζονται ρωγμές που επεκτείνονται μέχρι να επέλθει η αστοχία της τοιχοπλήρωσης.



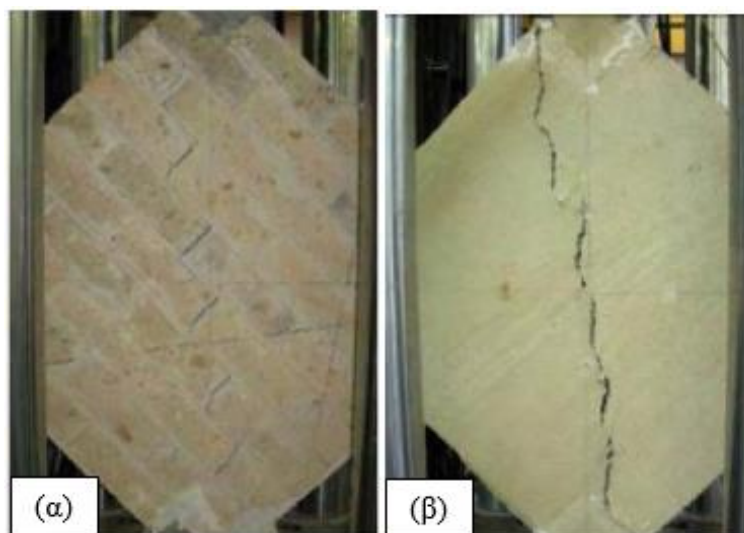
Σχήμα 2.19: Αστοχία τοιχοπλήρωσης εμφανιζόμενη σε πλαίσιο ΟΣ (El-Dakhkhni et. al., 2004)

2.6.2 Πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης

Σε μία σειρά δοκιμών διαγώνια θλίψης τοιχοσωμάτων προχώρησαν οι Prota et al. (2006) και οι Parisi et al. (2013). Τα δοκίμια ήταν διαστάσεων 1200 x 1200 mm κατασκευασμένα από αργιλικούς οπτόπλινθους. Στόχος της έρευνας ήταν η μελέτη της αποδοτικότητας των ενισχύσεων με IAM υάλου. Τα δοκίμια ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με τον τρόπο ενίσχυσης (μονόπλευρη ή αμφίπλευρη) και ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων τους (μία ή δύο στρώσεις ινών υάλου) σε τέσσερις τριάδες. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε για τις δοκιμές μονόπλευρης ενίσχυσης αύξηση διατμητικής αντοχής κατά 100% και κατά 180% για μία και δύο στρώσεις IAM υάλου αντίστοιχα. Όσον αφορά τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια η αποτελεσματικότητά τους αναλογικά με το ποσοστό οπλισμού παρουσιάστηκε μικρότερη σε σχέση με τις περιπτώσεις της μονόπλευρης ενίσχυσης. Η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση αυξήθηκε σε ποσοστό ίσο με 100% συγκριτικά με τα

δοκίμια αναφοράς, ενώ παρατηρήθηκε και αξιοσημείωτη αύξηση του μέτρου διάτμησης των ενισχυμένων δοκιμίων σε σχέση με τα μη ενισχυμένα.

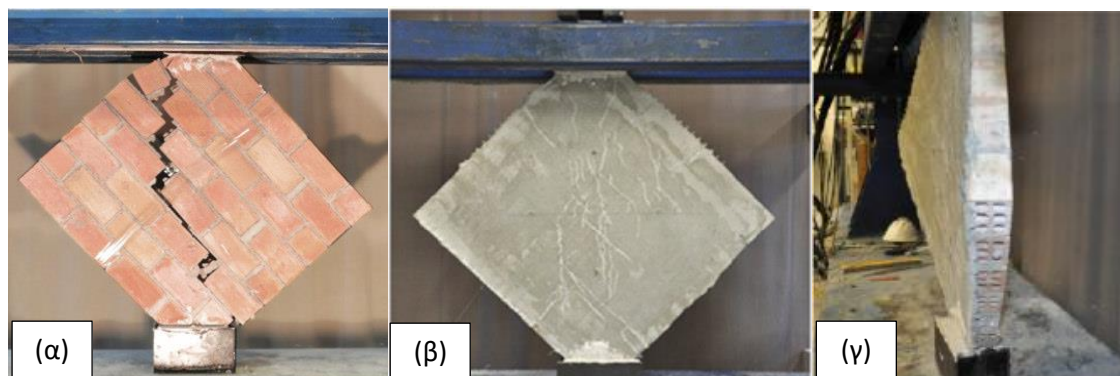
Στο **Σχήμα 2.20** παρουσιάζονται τυπικές μορφές αστοχίας κάποιων δοκιμίων που υποβλήθηκαν στις δοκιμές διαγώνιας θλίψης.



Σχήμα 2.20: Τυπικές μορφές αστοχίας (α) δοκιμίου αναφοράς, (β) ενισχυμένου δοκιμίου με μία στρώση IAM (Parisi et al., 2013)

Οι Koutas et al. (2015) υπέβαλαν σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης δεκατρία δοκίμια διαστάσεων 800 x 800 x 55 mm. Η εν λόγω έρευνα σχετίστηκε με την επίδραση του αριθμού των στρώσεων IAM στην αύξηση του μέτρου διάτμησης και της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης. Πιο συγκεκριμένα επτά δοκίμια δεν ενισχύθηκαν αποτελώντας δοκίμια αναφοράς, τρία ενισχύθηκαν μονόπλευρα με μία στρώση IAM και τρία ενισχύθηκαν μονόπλευρα με δύο στρώσεις IAM. Και στις δύο περιπτώσεις ενίσχυσης το πλέγμα αποτελούνταν από ίνες υάλου, τύπου E, με επικάλυψη πολυμερούς και διαστάσεις βροχίδας 25 x 25 mm². Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε αύξηση του μέτρου διάτμησης κατά 38% και 92%, για τις περιπτώσεις της μιας στρώσης και των δύο στρώσεων ενίσχυσης αντίστοιχα, σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δοκίμια. Επίσης η αύξηση της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης υπολογίστηκε στο 54% για την περίπτωση της μιας στρώσης ενίσχυσης και στο 118% για την περίπτωση των δύο στρώσεων ενίσχυσης.

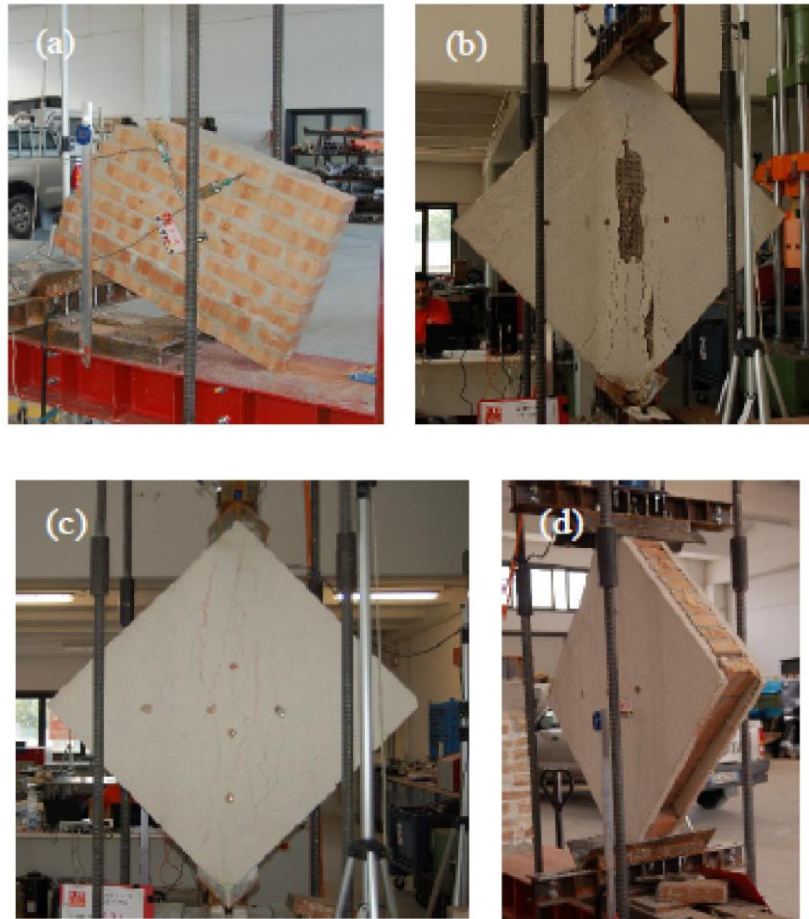
Στο **Σχήμα 2.21** παρουσιάζονται τυπικές μορφές κάποιων δοκιμίων που υποβλήθηκαν στις δοκιμές διαγώνιας θλίψης κατά τη φάση αστοχίας τους.



Σχήμα 2.21: Τυπικές μορφές (α) αστοχίας δοκιμίου αναφοράς, (β) ρηγμάτωσης της στρώσης ενίσχυσης, (γ) εκτός επιπέδου παραμόρφωσης ενισχυμένου δοκιμίου (Koutas et al., 2015)

Σε πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης επτά τοιχοσωμάτων διαστάσεων 1030 x 1000 x 120 mm προέβησαν και οι Gulinelli et al. (2019). Οι διαστάσεις των οπτόπλινθων ήταν 250 x 120 x 55 mm ενώ πάχος των κατακόρυφων και οριζοντίων αρμών ήταν ίσο με 10 mm και 17 mm αντίστοιχα. Το ένα από τα δοκίμια δεν ενισχύθηκε καθόλου (URM), τρία ενισχύθηκαν με μία στρώση πλέγματος ινών υάλου (GTRM) και τα υπόλοιπα τρία με μία στρώση πλέγματος ινών βασάλτη (BTRM). Και στις δύο περιπτώσεις η μήτρα ενίσχυσης ήταν κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης. Για την περίπτωση των GTRM το πάχος της στρώσης ήταν 3 mm , οι διαστάσεις της κάθε βροχίδας 33 x 33 mm² , και το πάχος της ενίσχυσης σε κάθε πλευρά ήταν ίσο με 30 mm. Για την περίπτωση των BTRM το πάχος της στρώσης ήταν 0,064 mm , οι διαστάσεις της κάθε βροχίδας 8 x 8 mm² , και το πάχος της ενίσχυσης σε κάθε πλευρά ήταν ίσο με 10 mm. Από τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών προέκυψε αύξηση της διατμητικής αντοχής, συγκριτικά με την περίπτωση του δοκιμίου αναφοράς, κατά δύο φορές για την περίπτωση των GTRM και κατά δυόμισι φορές για την περίπτωση των BTRM. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής των ενισχυμένων δοκιμίων υπολογίστηκε μεγαλύτερη σε ποσοστό 113% για την περίπτωση των GTRM και 143% για την περίπτωση των BTRM. Τέλος το ποσοστό αύξησης της παραμορφωσιμότητας σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς για την περίπτωση των GTRM υπολογίστηκε στο 80%.

Στο **Σχήμα 2.22** παρουσιάζονται οι τυπικές μορφές αστοχίας κάποιων δοκιμίων από τη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων.



Σχήμα 2.22: Τυπικές μορφές αστοχίας (a) URM, (b) BTRM, (c) GTRM, (d) λεπτομέρεια αστοχίας GTRM (Gulinelli et al, 2019)

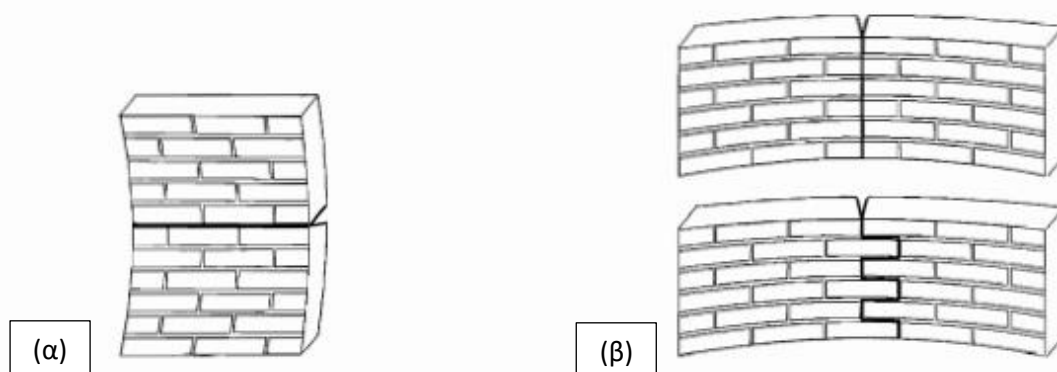
Οι Gulinelli et al. (2020) επεκτείνοντας την έρευνα τους διενέργησαν και άλλες δοκιμές διαγώνια θλίψης, σε δοκίμια ίδιων διαστάσεων και με ίδιο τρόπο ενίσχυσης με τις προηγούμενες δοκιμές σε πέντε δοκίμια τοιχοπλήρωσης. Το ένα αποτέλεσε δοκίμιο αναφοράς (URM) δύο ενισχύθηκαν με πλέγμα ινών υάλου (GTRM) και δύο με πλέγμα ινών βασάλτη (BTRM). Τα αποτελέσματα των δοκιμών προσέγγισαν σε καλό βαθμό τα αποτελέσματα των προηγούμενων δοκιμών με αύξηση θλιπτικής αντοχής κατά 117% για την περίπτωση των GTRM και κατά 153% για την περίπτωση των BTRM, σε σχέση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο. Τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης παραμορφωσιμότητας υπολογίστηκαν σε 157% για τα GTRM και σε 18% για τα BTRM.

2.7 Συμπεριφορά τοιχίσκων ενισχυμένων με IAM σε εκτός επιπέδου κάμψη

2.7.1 Γενικά

Ένα εξίσου διαδεδομένο φαινόμενο που προκαλεί σοβαρές βλάβες μέχρι και αστοχία των τοιχοπληρώσεων είναι αυτό της εκτός επιπέδου κάμψης. Φαινόμενο που προκαλείται κυρίως από σεισμικές φορτίσεις εκτός επιπέδου, δηλαδή επιβαλλόμενες φορτίσεις πάνω στις επιφάνειες των τοιχοπληρώσεων. Οι άοπλες τοιχοποιίες αδυνατούν να προβάλλουν αντίσταση σε τέτοια φαινόμενα κάτι που μπορεί να οδηγήσει στην άμεση κατάρρευση τους. Αν και ο τύπος αστοχίας τους μπορεί να εξαρτάται από τη γεωμετρία της τοιχοπλήρωσης ή από τις συνθήκες στήριξης της, ο συνήθης μηχανισμός αστοχίας που αναπτύσσεται σε αυτή την περίπτωση είναι αυτός της αποκόλλησης των αρμών και των οπτόπλινθων λόγω της πρακτικά μηδενικής αντοχής της διεπιφάνειας αρμών – οπτόπλινθων.

Στο **Σχήμα 2.23** παρουσιάζονται οι κύριοι τρόποι αστοχίας τοιχοποιιών σε εκτός επιπέδου κάμψη.



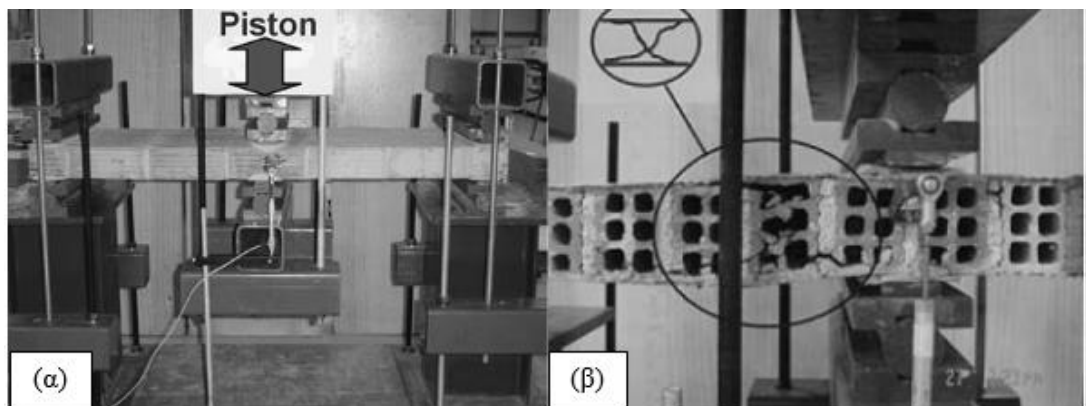
Σχήμα 2.23: Τυπικές μορφές αστοχίας τοιχοποιίας (α) παράλληλα, (β) κάθετα στους αρμούς, για εκτός επιπέδου καταπόνηση (Eurocode 6, EN 1996)

2.7.2 Πειραματικές δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης

Οι Papanicolaou et al. (2008) ερεύνησαν την εκτός επιπέδου συμπεριφορά δώδεκα τοιχίσκων διαστάσεων 1300 x 400 x 85 mm, κατασκευασμένων από οπτόπλινθους, μέσω δοκιμών κάμψης τριών σημείων, κυκλικής φόρτισης. Παράμετροι διερεύνησης υπήρξαν η επιρροή του αριθμού των στρώσεων IAM (άνθρακα – μια και δύο στρώσεις) αλλά και η σύγκριση της αποδοτικότητας της ενίσχυσης μεταξύ IAM και ΙΟΠ. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν

παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της καμπτικής αντοχής, σε σχέση με την πρακτικά μηδενική αντοχή του μη ενισχυμένου δοκιμίου για οποιαδήποτε περίπτωση ενίσχυσης. Η παραμορφωσιμότητα των τοιχοσωμάτων επίσης αυξήθηκε. Ο αριθμός των στρώσεων φάνηκε επίσης να έχει αντίκτυπο καθώς αύξηση του συνοδεύτηκε με μικρή αύξηση της αντοχής των τοιχοσωμάτων. Η αποδοτικότητα των ΙΑΜ φάνηκε βελτιωμένη έναντι των ΙΟΠ όταν η αστοχία ελεγχόταν από τις βλάβες του δοκιμίου ενώ το αντίθετο ίσχυε για περιπτώσεις που η αστοχία προήλθε από θραύση των ινών του μανδύα.

Στο **Σχήμα 2.24** παρουσιάζονται (α) η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και (β) μια μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη έρευνα.

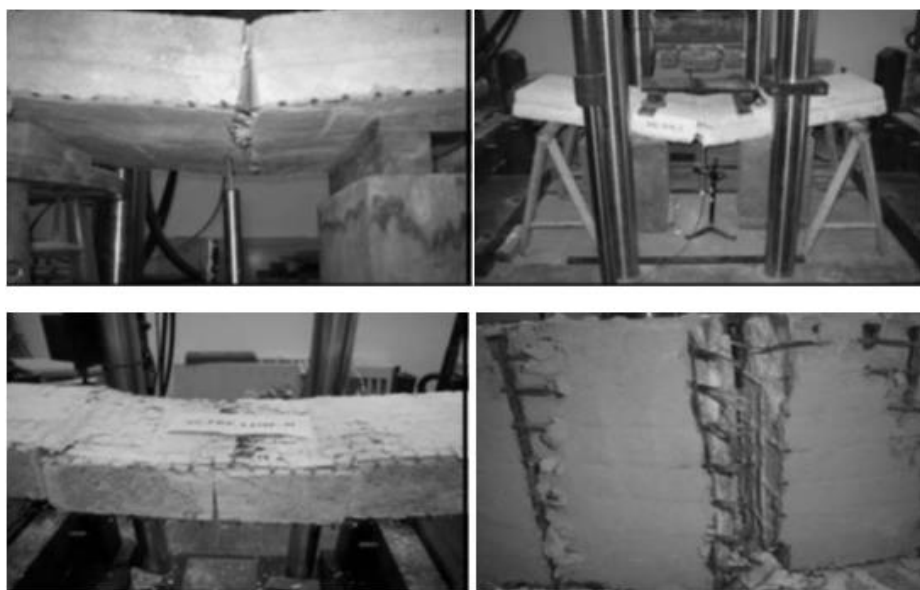


Σχήμα 2.24: (α) Πειραματική διάταξη δοκιμών εκτός επιπέδου κάμψης, (β) αστοχία λόγω βλάβης της τοιχοποιίας σε δοκίμιο ενισχυμένο με στρώσεις ΙΑΜ άνθρακα (Papanicolaou et al., 2008)

Οι Harajli et al. (2010) μελέτησαν τη συμπεριφορά δοκιμίων τοιχοπλήρωσης σε μονοτονική και κυκλική κάμψη τεσσάρων σημείων. Παράμετροι διερεύνησης αποτέλεσαν το είδος της τοιχοποιίας (αποτελούμενη από τσιμεντόλιθους ή οπτόπλινθους ή αμμόλιθους), το είδος του κονιάματος (κονίαμα με βάση ασβέστη ή τσιμέντο) και το είδος ινοπλεγμάτων (επικαλυμμένο πλέγμα ινών υάλου ή μη επικαλυμμένο πλέγμα ινών βασάλτη) που χρησιμοποιήθηκε. Σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας των ενισχυμένων δοκιμίων, με τις υπόλοιπες παραμέτρους διερεύνησης να διαφοροποιούν ελαφρώς τα αποτελέσματα. Όσον αφορά τα ινοπλέγματα, στα δοκίμια όπου χρησιμοποιήθηκε επικαλυμμένο πλέγμα ινών υάλου όπου η ικανότητα παραλαβής φορτίου φάνηκε αυξημένη λόγω ομοιόμορφης κατανομής έντασης. Αντιθέτως στα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκε μη επικαλυμμένο πλέγμα

ινών βασάλτη για μικρότερες τιμές φορτίου σχηματίστηκε μια κυρίαρχη ρωγμή που οδήγησε σε ρήξη του πλέγματος. Γεγονός που καταδεικνύει την βελτίωση της αποδοτικότητας των επικαλυμμένων πλεγμάτων έναντι των μη επικαλυμμένων.

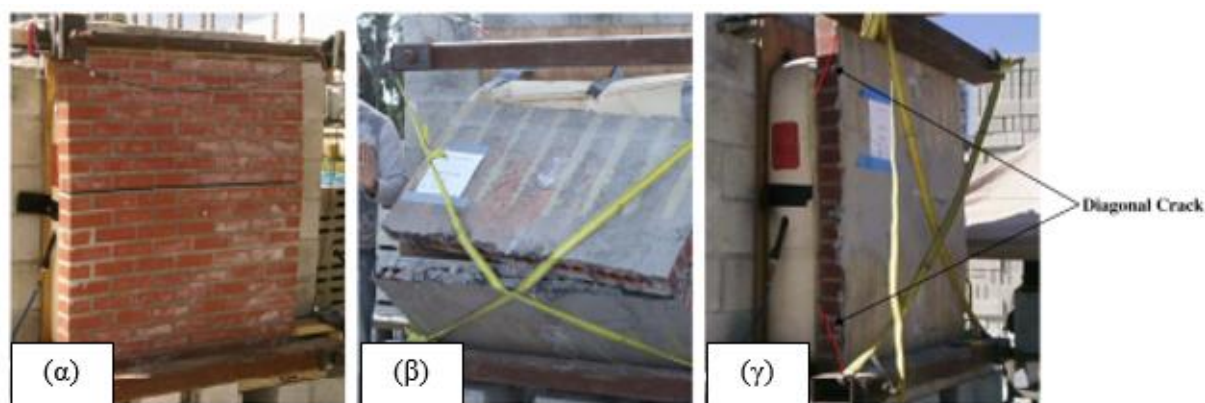
Στο **Σχήμα 2.25** παρουσιάζονται τυπικές μορφές αστοχίας ορισμένων δοκιμών που έλαβαν μέρος στις εν λόγω δοκιμές.



Σχήμα 2.25: Τυπικές μορφές αστοχίας ενισχυμένων τοιχίσκων σε κάμψη (Harajli et al., 2010)

Οι Babaeidarabad et al. (2014) ερεύνησαν την εκτός επιπέδου καταπόνηση εννέα δοκιμών τοιχοπλήρωσης, διαστάσεων 1400 x 1200 mm. Τρία από αυτά αποτελέσαν δοκίμια αναφοράς, τρία ενισχύθηκαν με μία στρώση IAM άνθρακα και τα υπόλοιπα τρία με τέσσερις στρώσεις IAM άνθρακα. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, παρατηρήθηκε αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά 2,8 φορές για μία στρώση IAM άνθρακα και κατά 7,5 φορές για τέσσερις στρώσεις IAM άνθρακα. Μάλιστα υπήρξε αύξηση σε όρους δυσκαμψίας και παραμόρφωσης των ενισχυμένων δοκιμών, όπου η ικανότητα παραμόρφωσης για τα δοκίμια των τεσσάρων στρώσεων IAM φάνηκε μειωμένη λόγω της διατμητικής αντί καμπτικής αστοχίας που παρουσιάστηκε.

Στο **Σχήμα 2.26** παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μορφές αστοχίας κάποιων δοκιμών που παρατηρήθηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα.



Σχήμα 2.26: Τυπικές μορφές αστοχίας δοκιμίου (α) αναφοράς, (β) ενισχυμένου με μία στρώση IAM άνθρακα, (γ) ενισχυμένου με τέσσερις στρώσεις IAM άνθρακα (Babaeidarabad et al., 2014)

2.8 Συμπεράσματα πειραματικών δοκιμών

Από τις έρευνες που έχουν διεξαχθεί γενικά γύρω από την ενίσχυση τοιχίσκων με IAM προκύπτει η θετική επίδραση τους στην αύξηση της διατμητικής ή καμπτικής τους αντοχής και στην ικανότητα τους να παραμορφώνονται. Επίσης, η αύξηση των στρώσεων των IAM συνεπάγεται με περεταίρω αύξηση των αντίστοιχων αντοχών. Όσον αφορά τις μορφές αστοχίας εμφανίστηκαν πιο ελεγχόμενες για τις περιπτώσεις των ενισχυμένων δοκιμών. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος εφαρμογών τους, καταδεικνύουν τα IAM ως μία ανταγωνιστική τεχνική ενίσχυσης έναντι των ΙΟΠ που όπως φάνηκε και από συγκρίσεις τους εμφανίζουν εξίσου ανταγωνίστηκες ιδιότητες. Ωστόσο χρειάζεται να αναπτυχθούν εκτενέστερες έρευνες πάνω σε όλα τα εύρη εφαρμογών τους ώστε να γίνει καλύτερη κατανόηση γύρω από τους μηχανισμούς ανάληψης φορτίσεων των IAM.

2.9 Χρήση κονιαμάτων γεωπολυμερών στο πεδίο ενισχύσεων των κατασκευών

2.9.1 Γενικά

Το 1979 ο Γάλλος καθηγητής J. Davidovits πραγματοποιεί για πρώτη φορά αναφορά του όρου 'γεωπολυμερές' ώστε να περιγράψει μια κατηγορία υλικών αργιλοπυριτικής σύστασης. Τα υλικά αυτά προκύπτουν μέσω χημικής αντίδρασης αργιλοπυριτικών πρώτων υλών, γεωλογικής προέλευσης ή παραπροϊόντα όπως ιπτάμενη τέφρα, σε συνδυασμό με κάποιο αλκαλικό διάλυμα (Provis and van Deventer, 2009). Γενικώς, τα πολυμερή χωρίζονται σε

οργανικά και ανόργανα πολυμερή. Τα γεωπολυμερή, που μεταξύ άλλων αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ανήκουν στην κατηγορία των ανόργανων πολυμερών.

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια η επιτακτική εύρεση φιλικών υλικών προς το περιβάλλον έχουν στρέψει διάφορους τομείς της καθημερινότητας προς αυτή την κατεύθυνση, μαζί και τον κατασκευαστικό τομέα. Σύμφωνα με έρευνες η αντικατάσταση συμβατικών κονιαμάτων στον τομέα των κατασκευών από κονιάματα γεωπολυμερών είναι ικανή να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά 80% με 90%. Επιπλέον, παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή σε χημικά οξέα, πυραντοχή, και σχετικά χαμηλό κόστος αποτελώντας έναν σημαντικό ανταγωνιστή των συμβατικών δομικών υλικών.

2.9.2 Πειραματικές εργασίες στην ενίσχυση δομικών στοιχείων με μήτρα γεωπολυμερούς

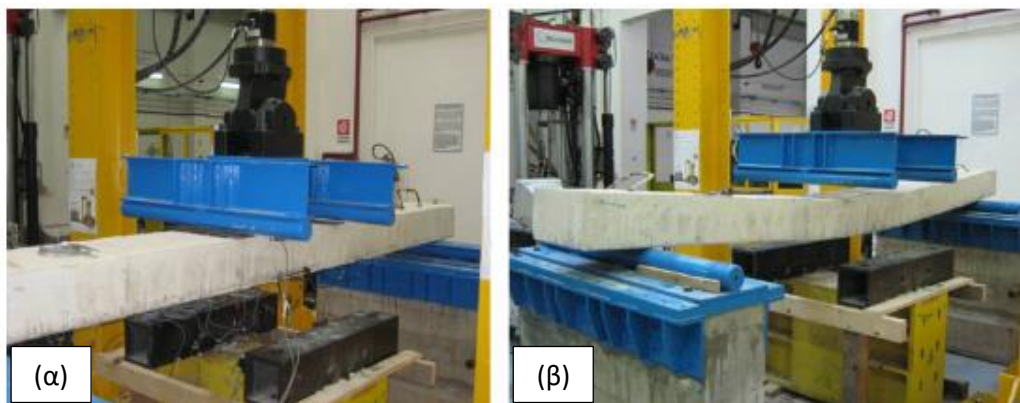
Τα γεωπολυμερή κονιάματα πλέον αποτελούν αντικείμενο μελέτης από αρκετούς ερευνητές με σκοπό την περαιτέρω έρευνα της συμπεριφοράς τους σαν υλικό ενίσχυσης στον τομέα των κατασκευών. Κατηγορίες που βρίσκουν εφαρμογή είναι αυτή της ενίσχυσης στοιχείων τύπου δοκού ΟΣ και στοιχείων τοιχοποιίας. Εν συνεχεία παρατίθενται κάποιες έρευνες πάνω στις συγκεκριμένες κατηγορίες.

α) Καμπτική ενίσχυση στοιχείων τύπου δοκού ΟΣ

Οι Papakonstantinou και Katakalos (2009) πραγματοποίησαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε πέντε δοκούς ΟΣ, διαστάσεων 1220 x 100 x 150 mm. Δύο από αυτές δεν ενισχύθηκαν αποτελώντας δοκούς αναφοράς. Οι υπόλοιπες τρεις ενισχύθηκαν με ανόργανα πολυμερή και πλέγματα χάλυβα. Για την μία δοκό χρησιμοποιήθηκαν 90 ίνες χάλυβα ενώ για τις υπόλοιπες δύο 35 ίνες χάλυβα, με τη διαφορά των δύο τελευταίων να έγκειται στο πάχος της μήτρας. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε το βασικό συμπέρασμα πως τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υλικό ενίσχυσης σε συνδυασμό με χαλύβδινες ίνες υψηλής αντοχής, ενώ η καμπτική αντοχή των δοκών βελτιώνεται σε σημαντικό βαθμό συγκριτικά με τις μη ενισχυμένες δοκούς και τις ενισχυμένες δοκούς με οργανικά πολυμερή. Τέλος δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση της μήτρας ενίσχυσης με τα στοιχεία σκυροδέματος ενώ ο τύπος αστοχίας ακολούθησε την ολίσθηση των χαλύβδινων ινών που χρησιμοποιήθηκαν.

Σε παρόμοιο κλίμα ερευνών κινήθηκαν οι Menna et al. (2013) υποβάλλοντας σε κάμψη τεσσάρων σημείων πέντε δοκούς ΟΣ, διαστάσεων 3800 x 400 x 200 mm. Μία από αυτές αποτέλεσε δοκίμιο αναφοράς ενώ δύο ενισχύθηκαν με μανδύες ινών άνθρακα (CFRG), και δύο με χορδές ινών χάλυβα (SRG), σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος. Από την έρευνα προέκυψαν τα συμπεράσματα πως η συνάφεια μεταξύ γεωπολυμερούς-σκυροδέματος και γεωπολυμερούς - χορδών χάλυβα φάνηκε εξαιρετικά καλή, καθώς δεν παρατηρήθηκαν μηχανισμοί αποκόλλησης - αστοχίας. Κάτι τέτοιο δεν ίσχυε στην περίπτωση των μανδύων ινών άνθρακα πιθανώς λόγω του ότι παρουσιάζουν γενικά καλύτερη συνάφεια με εποξειδική ρητίνη, σαν υλικό μήτρας ενίσχυσης. Τέλος, η αύξηση καμπτικής αντοχής φάνηκε αρκετά αυξημένη στην περίπτωση του SRG συστήματος, ενώ στην περίπτωση του CFRG συστήματος οι αυξήσεις θεωρήθηκαν αμελητέες.

Στο **Σχήμα 2.27** παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τις συγκεκριμένες δοκιμές κάμψης.

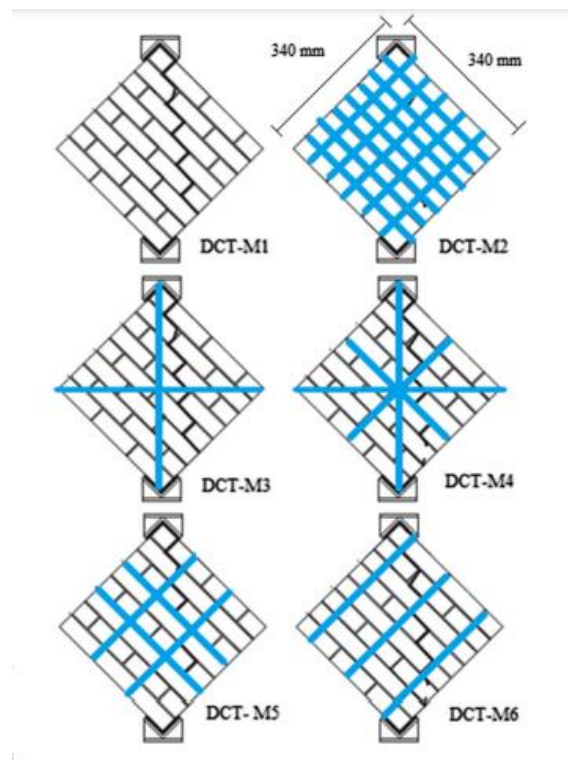


Σχήμα 2.27: Δοκίμιο δοκού (α) πριν, (β) μετά το πείραμα κάμψης (Menna et al., 2013)

Οι Shen et al. (2021) συνεχίζοντας τις έρευνες καμπτικής ενίσχυσης δοκών ΟΣ προχώρησαν επίσης σε δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων επτά δοκών, διαστάσεων 2400 x 150 x 250 mm, εκ των οποίων η μία αποτέλεσε δοκό αναφοράς. Οι ενισχύσεις των υπόλοιπων δοκών πραγματοποιήθηκαν με πλέγμα ινών άνθρακα και ράβδους ΙΟΠ άνθρακα σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος. Από τα αποτελέσματα προέκυψε αύξηση των φορτίων διαρροής και αστοχίας των δοκών κατά 22,2% και 26,4% αντίστοιχα. Τέλος, παρατηρήθηκε πως το γεωπολυμερές κονίαμα σε αντίθεση με τα κονιάματα τσιμεντοειδούς σύστασης άλλαξε τη μορφή αστοχίας των δοκιμών από αποκόλληση των στρώσεων ενίσχυσης σε τοπική ολίσθησή και ρήξη του υφάσματος ενίσχυσης.

α) Ενίσχυση στοιχείων τοιχοποιίας

Οι Maras and Kose (2020) υπέβαλαν σε δοκιμές διαγώνιας και κατακόρυφης θλίψης έξι τοιχοσωμάτων διαστάσεων 340 x 340 x 180 mm. Σε όσα ενισχύθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τμήματα γεωπλέγματος με διαφορετικούς τρόπους διάταξης, σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.28**. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν πως τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν αυξημένη ικανότητα ανάληψης φορτίου, παραμορφωσιμότητας και κατανάλωσης ενέργειας ενώ η διατμητική τους αντοχή αυξήθηκε αισθητά.

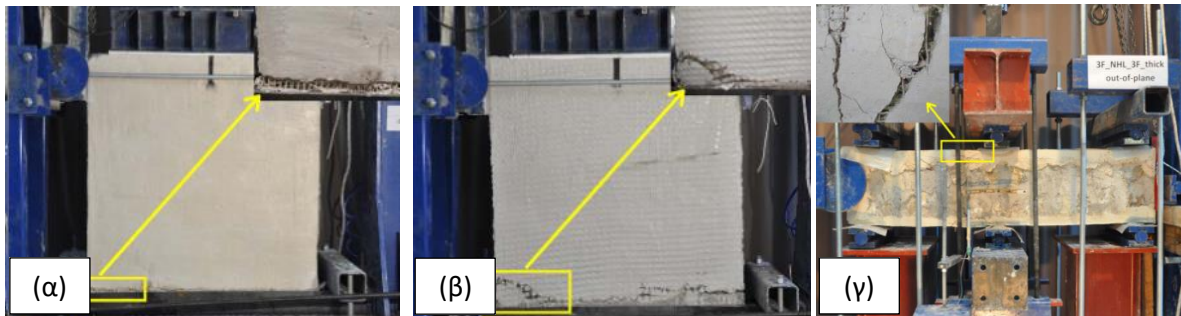


Σχήμα 2.28: Γεωμετρία και λεπτομέρειες πρισμάτων διαγώνιας θλίψης (Maras and Kose, 2020)

Οι Gkournelos et al. (2021) προχώρησαν σε δοκιμές κυκλικής, εντός και εκτός επιπέδου φόρτισης. Πέντε δοκίμια διαστάσεων 1200 x 400 x 150 mm υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων εντός επιπέδου, πέντε δοκίμια διαστάσεων 1200 x 400 x 220 mm σε κάμψη τριών σημείων εκτός επιπέδου και τέσσερα δοκίμια διαστάσεων 1100 x 1000 x 150 mm σε δοκιμές εντός επιπέδου δάτμησης. Όλα ενισχύθηκαν με στρώσεις ινοπλεγμάτων λινού σε κονίαμα ασβεστοειδούς σύστασης ή με στρώσεις ινοπλεγμάτων βασάλτη σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε αύξηση της

ικανότητας παραλαβής φορτίου και για τους δύο τύπους ενίσχυσης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70%, για τις πειραματικές δοκιμές εντός αλλά και εκτός επιπέδου φόρτισης. Μάλιστα η δυσκαμψία και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δοκιμών παρουσιάστηκαν επίσης βελτιωμένες.

Στο **Σχήμα 2.29** παρουσιάζονται κάποιες μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν κατά τις πειραματικές διαδικασίες των εντός (α, β) και εκτός επιπέδου φορτίσεων (γ).



Σχήμα 2.29: Μορφή αστοχίας δοκιμών για (α) εντός επιπέδου φόρτιση όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα γεωπολυμερούς σύστασης, (β) εντός επιπέδου φόρτιση όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα ασβεστοειδούς σύστασης, (γ) εκτός επιπέδου φόρτιση όπου χρησιμοποιήθηκε κονίαμα ασβεστοειδούς σύστασης (Gkournelos et al., 2021)

2.9.3 Συμπεράσματα από την ενίσχυση δομικών στοιχείων με μήτρα γεωπολυμερούς

Τα γεωπολυμερή κονιάματα σαν υλικό ενίσχυσης, εκτός των όσον προαναφέρθηκαν, φαίνεται πως έχουν εξίσου καλές ιδιότητες με κονιάματα τσιμεντοειδούς σύστασης. Η ικανότητα να αναπτύσσουν συνάφεια με τα δομικά στοιχεία αλλά και με τα πλέγματα ινών, τα καθιστούν πολλά υποσχόμενα υλικά ενίσχυσης. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν φάνηκε να υπήρξε αξιοσημείωτη βελτίωση της ικανότητας παραλαβής φορτίου και παραμορφωσιμότητας των δομικών στοιχείων. Όντας φιλικότερά προς το περιβάλλον σαν υλικά τα κάνουν μία ακόμα πιο προσιτή λύση στον τομέα των κατασκευών. Ωστόσο, πρέπει να αναπτυχθεί περαιτέρω έρευνα γύρω από τις μηχανικές ιδιότητες τους ώστε να υπάρξει καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

Κεφάλαιο 3

3. Πειραματικό πρόγραμμα

3.1 Γενικά

Το πειραματικό πρόγραμμα περιλάμβανε δύο σειρές δοκιμών. Η πρώτη σειρά αφορούσε την κατασκευή και την ενίσχυση εννέα δοκιμών - τοιχοσωμάτων ίδιων διαστάσεων και την υποβολή αυτών σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης. Η δεύτερη σειρά αφορούσε την κατασκευή και την ενίσχυση δύο δοκιμών - τοιχοσωμάτων και την υποβολή αυτών σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης τριών σημείων. Για τις δοκιμές της διαγώνιας θλίψης όσα δοκίμια ενισχύθηκαν, ενισχύθηκαν με τη χρήση ινοπλεγμάτων υάλου σε ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης. Τρία από αυτά δεν ενισχύθηκαν καθόλου ενώ από τα υπόλοιπα έξι, τρία ενισχύθηκαν μονόπλευρα με δύο στρώσεις ιών υάλου και τρία αμφίπλευρα με μία στρώση ιών υάλου στην κάθε πλευρά. Για τις δοκιμές της εκτός επιπέδου κάμψης η ενίσχυση πραγματοποιήθηκε μονόπλευρα με δύο στρώσεις υάλου και η μήτρα ενίσχυσης ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης για το ένα δοκίμιο και γεωπολυμερούς σύστασης για το άλλο. Στόχος των πειραματικών σειρών ήταν η παρατήρηση και η αποτίμηση του τρόπου συμπεριφοράς και απόδοσης των τοιχοσωμάτων που ενισχύθηκαν σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς (δοκίμια δίχως ενίσχυση) και η μελέτη των μηχανικών τους χαρακτηριστικών που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές.

3.2 Περιγραφή δοκιμών

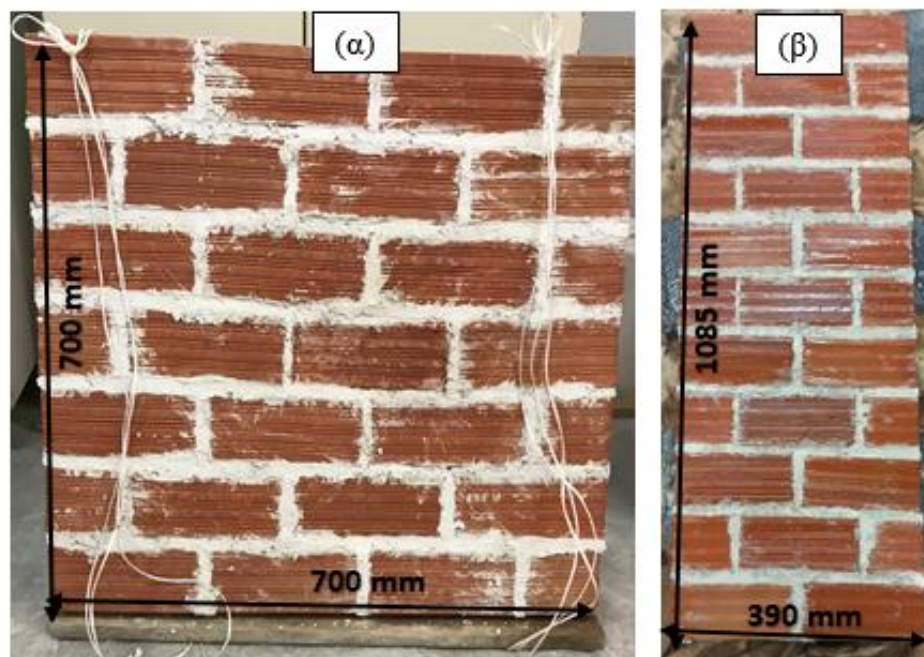
Όπως ήδη αναφέρθηκε, εννέα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης και δύο σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης. Όλα κατασκευάστηκαν από διάτρητους αργιλικούς οπτόπλινθους όπου μεταξύ των αρμών τους εφαρμόστηκε τσιμεντοκονίαμα, ώστε να συνενωθούν οι επιφάνειες τους.

Για τις δοκιμές διαγώνιας θλίψης τα δοκίμια τοιχοποιίας είχαν διαστάσεις περίπου 700 x 700 mm, σε μήκος και πλάτος αντίστοιχα, ενώ το πάχος τους ήταν 70 mm. Τρία εξ αυτών δεν ενισχύθηκαν, τρία ενισχύθηκαν μονόπλευρα με δύο στρώσεις ιών υάλου, ενώ η ενίσχυση των τριών τελευταίων έγινε αμφίπλευρα με μία στρώση ιών υάλου στην κάθε πλευρά των δοκιμών. Όλες οι ενισχύσεις πραγματοποιήθηκαν σε ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς. Τα ινοπλέγματα υάλου για να εφαρμοστούν επάνω στα δοκίμια απέκτησαν

διαστάσεις 695 x 695 mm περίπου. Το πάχος της συνολικής ενίσχυσης την περίπτωση της μονόπλευρης υπολογίστηκε στα 10 mm ενώ για την περίπτωση της αμφίπλευρης στα 5 mm για την κάθε πλευρά. Όσον αφορά τα πρωτόκολλα κατασκευής και φόρτισης τηρήθηκαν κατά τα δέοντα ανά τριάδα δοκιμών με σκοπό την εξαγωγή αξιόπιστων πειραματικών αποτελεσμάτων.

Για τις δοκιμές της εκτός επιπέδου κάμψης τριών σημείων τα δοκίμια τοιχοποιίας είχαν διαστάσεις 1085 x 390 mm, σε μήκος και πλάτος αντίστοιχα, ενώ το πάχος αυτών ήταν 70 mm. Δοκίμιο αναφοράς δεν υπήρξε λόγω της πρακτικά μηδενικής του αντοχής σε κάμψη, κάτι που σημαίνει ότι θα μπορούσε να αστοχήσει μέχρι και λόγω του ίδιου του βάρους. Έτσι θεωρήθηκε ένα ιδεατό δοκίμιο του οποίου η αντοχή υπολογίστηκε μέσω ανάλυσης της διατομής. Και τα δύο δοκίμια που κατασκευάστηκαν, ενισχύθηκαν μονόπλευρα με δύο στρώσεις ινών υάλου, με την ανόργανη μήτρα ενίσχυσης του ενός να είναι τσιμεντοειδούς σύστασης και του αλλουνού γεωπολυμερούς σύστασης. Το πάχος ενίσχυσης και για τις δύο περιπτώσεις υπολογίστηκε στα 10 mm.

Στο **Σχήμα 3.1** (α) παρουσιάζεται ο τύπος δοκιμών που υποβλήθηκαν σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης και στο **Σχήμα 3.1** (β) ο τύπος δοκιμών που υποβλήθηκαν σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης, με τις αντίστοιχες διαστάσεις τους σε μήκος και πλάτος.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία όψεων δοκιμών που υποβλήθηκαν σε δοκιμές (α) διαγώνιας θλίψης, (β) εκτός επιπέδου κάμψης

3.2.1 Ονοματολογία δοκιμών

Στα εξεταζόμενα δοκίμια δόθηκαν οι αντίστοιχες ονομασίες βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους όπως το είδος της δοκιμής, η μήτρα ενίσχυσης, το ινόπλεγμα ενίσχυσης και ο αριθμός των στρώσεων του.

Έτσι, στις πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης στα δοκίμια αναφοράς δόθηκε η ονοματολογία DT_WALL_CON. Στα ενισχυμένα δοκίμια οι ονοματολογίες ήταν της μορφής DT_WALL_GEO_Y-ΑΣ_ΑΔ. Έτσι, το πρώτο μέρος της ονομασίας τους το απάρτιζε το DT_WALL το οποίο αναφέρεται στο πείραμα διαγώνιας θλίψης που υποβλήθηκαν τα δοκίμια (Diagonal Test). Εν συνεχεία αυτής της ονομασίας ακολουθούσε το GEO που αναφέρεται στην μήτρα γεωπολυμερούς, το Y-ΑΣ που αναφέρεται στο υλικό της ενίσχυσης (G για ίνες υάλου) και στον αριθμό στρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος το ΑΔ αναφερόμενο στην αρίθμηση του δοκιμίου.

Για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε εκτός επιπέδου κάμψη δόθηκαν ονομασίες της μορφής OOPB_M_Y-ΑΣ. Το πρώτο μέρος της ονομασίας τους το απάρτιζε το OOPB το οποίο αναφέρεται στο πείραμα εκτός επιπέδου κάμψης που υποβλήθηκαν τα δοκίμια (Out-Of-Plane-Bending). Εν συνεχεία αυτής της ονομασίας ακολουθούσε το M που αναφέρεται στην μήτρα ενίσχυσης γεωπολυμερούς (GEO) ή τσιμεντοειδούς σύστασης (SIKA) και το Y-ΑΣ που αναφέρεται στο υλικό της ενίσχυσης (G για ίνες υάλου) και στον αριθμό στρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας με τις ονομασίες των δοκιμών.

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμών

Ονοματολογία	Αριθμός στρώσεων	Μονόπλευρη ενίσχυση	Αμφίπλευρη ενίσχυση
DT_WALL_CON_1	-	-	-
DT_WALL_CON_2	-	-	-
DT_WALL_CON_3	-	-	-
DT_WALL_GEO_G2_1	2	✓	-
DT_WALL_GEO_G2_2	2	✓	-
DT_WALL_GEO_G2_3	2	✓	-
DT_WALL_GEO_G1-1_1	2	-	✓
DT_WALL_GEO_G1-1_2	2	-	✓
DT_WALL_GEO_G1-1_3	2	-	✓
OOPB_GEO_G2	2	✓	-
OOPB_SIKA_G2	2	✓	-

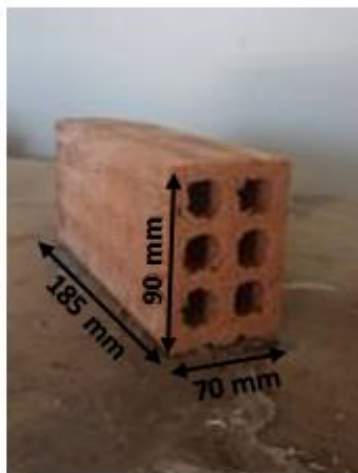
3.3 Ιδιότητες υλικών

3.3.1 Οπτόπλινθοι

Κατά την κατασκευή του κάθε τοιχοσώματος, διαστάσεων 700 x 700 mm, έγινε χρήση 28 διάτρητων αργιλικών οπτόπλινθων συνολικά, η τοποθέτηση των οποίων έγινε σε οριζόντια διάταξη. Οι 21 από αυτούς είχαν διαστάσεις 185 mm σε μήκος, 90 mm σε ύψος και 70 mm σε πλάτος. Οι υπόλοιποι 7, όντας κομμένοι στη μέση, είχαν μήκος 92,5 mm και ύψος, πλάτος ίδιο με τους προηγούμενους.

Για την κατασκευή των τοιχοσωμάτων διαστάσεων 1085 x 390 x 70 mm έγινε χρήση 27 διάτρητων αργιλικών οπτόπλινθων, με την τοποθέτηση τους να γίνεται σε οριζόντια διάταξη. Οι 17 από αυτούς είχαν διαστάσεις 185 mm σε μήκος, 90 mm σε ύψος και 70 mm σε πλάτος. Οι υπόλοιποι 10, όντας κομμένοι στη μέση, είχαν μήκος 92,5 mm και ύψος, πλάτος ίδιο με τους προηγούμενους.

Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζεται ένας οπτόπλινθος, από αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν, με τις αντίστοιχες διαστάσεις του.



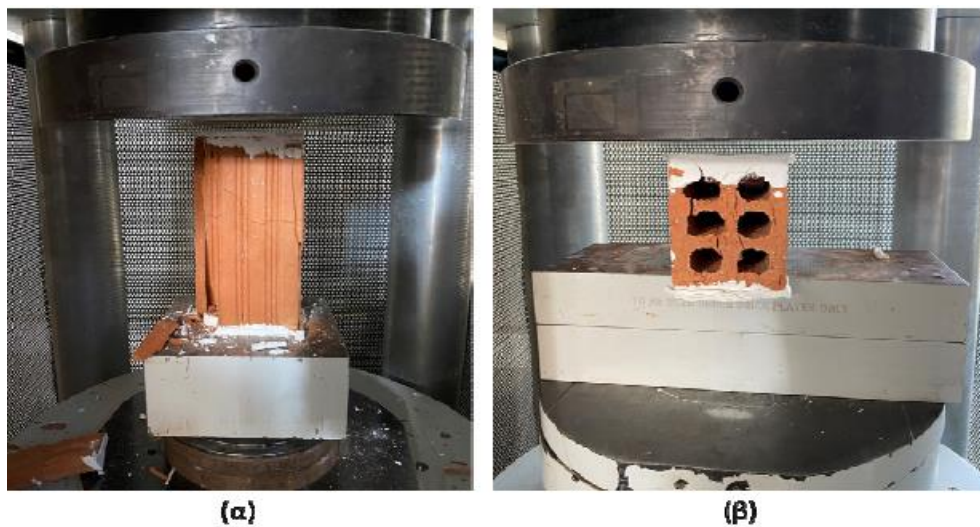
Σχήμα 3.2: Οπτόπλινθος με τις διαστάσεις του

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των οπτόπλινθων υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης έξι οπτόπλινθοι κατά την οριζόντια διεύθυνση και έξι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Προς αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, λόγω ανομοιόμορφης επιφάνειας των οπτόπλινθων, εφαρμόστηκε μία στρώση γύψου στις επιφάνειες επιβολής φορτίου αυτών.

Στο **Σχήμα 3.3** παρατίθεται φωτογραφικό υλικό από τη διεξαγωγή των πειραμάτων θλίψης των οπτόπλινθων κατά την κατακόρυφη και κατά την οριζόντια διεύθυνση και στο **Σχήμα 3.4** φαίνεται η τυπική μορφή αστοχίας τους. Ο ρυθμός επιβολής μετακινήσεων της πρέσας ήταν 15 mm/sec.



Σχήμα 3.3: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μεμονωμένων οπτόπλινθων



Σχήμα 3.4: Τυπική μορφή αστοχίας οπτόπλινθου (α) κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, (β) κατά την οριζόντια διεύθυνση

Η μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε σε κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε μέσω της **Εξ.(3.1)**.

$$\sigma = 1000 \frac{F}{A_n} \quad (3.1)$$

Όπου

F: Το φορτίο αστοχίας του δοκιμίου, σε kN

A_n: Το εμβαδόν της επιφάνειας εφαρμογής του φορτίου του δοκιμίου (για την περίπτωση θλίψης των οπτόπλινθων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση νοείται το εμβαδόν της επιφάνειας μαζί με τις οπές), σε mm²

Στους **Πίνακες 3.2** και **3.3** παρουσιάζονται τα φορτία και οι τάσεις αστοχίας των οπτόπλινθων που υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης για την κατακόρυφη και για την οριζόντια διεύθυνση.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης οπτόπλινθων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση

Κατακόρυφη διεύθυνση					
Φορτία					
Μέσος όρος (kN)	Τυπική απόκλιση (kN)	COV (%)			
83,68	13,02	15,55			
Φορτίο αστοχίας 1 (kN)	Φορτίο αστοχίας 2 (kN)	Φορτίο αστοχίας 3 (kN)	Φορτίο αστοχίας 4 (kN)	Φορτίο αστοχίας 5 (kN)	Φορτίο αστοχίας 6 (kN)
93,2	90,2	86,9	57,6	87	87,2
Τάσεις					
Μέσος όρος (MPa)	Τυπική απόκλιση (MPa)	COV (%)			
15,50	2,41	15,55			
Τάση αστοχίας 1 (MPa)	Τάση αστοχίας 2 (MPa)	Τάση αστοχίας 3 (MPa)	Τάση αστοχίας 4 (MPa)	Τάση αστοχίας 5 (MPa)	Τάση αστοχίας 6 (MPa)
17,26	16,70	16,09	10,67	16,11	16,15

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης οπτόπλινθων κατά την οριζόντια διεύθυνση

Οριζόντια διεύθυνση					
Φορτία					
Μέσος όρος (kN)	Τυπική απόκλιση (kN)	COV (%)			
81,23	6,06	7,46			
Φορτίο αστοχίας 1 (kN)	Φορτίο αστοχίας 2 (kN)	Φορτίο αστοχίας 3 (kN)	Φορτίο αστοχίας 4 (kN)	Φορτίο αστοχίας 5 (kN)	Φορτίο αστοχίας 6 (kN)
83	85,6	69,9	79,2	86	83,7
Τάσεις					
Μέσος όρος (MPa)	Τυπική απόκλιση (MPa)	COV (%)			
7,13	0,53	7,46			
Τάση αστοχίας 1 (MPa)	Τάση αστοχίας 2 (MPa)	Τάση αστοχίας 3 (MPa)	Τάση αστοχίας 4 (MPa)	Τάση αστοχίας 5 (MPa)	Τάση αστοχίας 6 (MPa)
7,28	7,51	6,13	6,95	7,54	7,34

3.3.2 Κονίαμα αρμών τοιχοποιίας

Και για τις δύο σειρές δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, στην πλήρωση των αρμών μεταξύ των οπτόπλινθων των δοκιμών τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε κονίαμα δόμησης, γενικής εφαρμογής. Η σύσταση του προέκυψε από ανάμειξη τσιμέντου, άμμου, ασβέστη και νερού.

Οι αναλογίες και οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κονιάματος αναγράφονται στον **Πίνακα 3.4** και αντιστοιχούν στην κατασκευή κονιάματος για ένα δοκίμιο τοιχοποιίας τη φορά.

Πίνακας 3.4: Σύνθεση μείγματος κονιάματος

Σύνθεση μείγματος κονιάματος		
Συστατικά	Αναλογίες (κατά όγκο)	Βάρος (Kg)
Τσιμέντο	1	0,945
Άμμος	5	7,66
Ασβέστης	1	1,13
Νερό		0,9

Κατά την κατασκευή ορισμένων δοκιμών τοιχοποιίας, η ποσότητα των συστατικών του κονιάματος προσαυξήθηκε κατά 10% με σκοπό τη δειγματοληψία μείγματος. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.5** το μείγμα τοποθετήθηκε σε μεταλλικές μήτρες με τη βοήθεια των οποίων μορφώθηκαν δοκίμια κονιάματος διαστάσεων 160 x 40 x 40 mm, με βάρος που κυμαινόταν από 496 g μέχρι 536 g. Δημιουργήθηκαν εννέα δοκίμια, των οποίων η συντήρηση περιλάμβανε διαβροχή της ελεύθερης επιφάνειας τους για επτά ημέρες. Η συγκεκριμένη διαδικασία στόχευε στον πειραματικό προσδιορισμό μηχανικών χαρακτηριστικών του κονιάματος των αρμών.



Σχήμα 3.5: Τοποθέτηση κονιάματος στη μεταλλική μήτρα

Με το πέρας του κατάλληλου χρονικού διαστήματος τα δοκίμια κονιάματος αφαιρέθηκαν από τις μεταλλικές μήτρες και υποβλήθηκαν σε δύο πειραματικές δοκιμές.

- Δοκιμές κάμψης τριών σημείων, με στόχο τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος. Από τις εν λόγω δοκιμές προέκυψαν δύο πρίσματα τα οποία υποβλήθηκαν στις επόμενες δοκιμές.
- Δοκιμές θλίψης, με στόχο τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος.

Ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος έγινε μέσω της **Εξ. (3.2)** ενώ ο υπολογισμός της θλιπτικής αντοχής του μέσω της **Εξ. (3.3)**. Στο **Σχήμα 3.6** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των δοκιμών κάμψης τριών σημείων ενώ στο **Σχήμα**

3.7 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των δοκιμών θλίψης. Τέλος, ο ρυθμός επιβολής φορτίου για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων ήταν 0,05 kN/s και για τις δοκιμές θλίψης 15 mm/s.

- Υπολογισμός εφελκυστικής τάσης αστοχίας

$$\sigma = 1,5 \frac{F \cdot 100}{b \cdot d^2} \quad (3.2)$$

Όπου

F: Φορτίο αστοχίας δοκιμίου, σε N

b: Πλάτος δοκιμίου, σε mm

d: Ύψος δοκιμίου, σε mm

100: Μήκος δοκιμίου μεταξύ των στηρίξεων (καθαρό άνοιγμα), σε mm

- Υπολογισμός θλιπτικής τάσης αστοχίας

$$\sigma = \frac{F \cdot 1000}{40 \cdot b} \quad (3.3)$$

Όπου

F: Φορτίο αστοχίας δοκιμίου, σε kN

b: Πλάτος δοκιμίου, σε mm

40: Μήκος δοκιμίου που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια επιβολής φορτίου, σε mm



Σχήμα 3.6: Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης τριών σημείων κονιάματος



Σχήμα 3.7: Πειραματική διάταξη δοκιμής θλίψης πρίσματος του κονιάματος

Ακολουθεί ο **Πίνακας 3.5** με τις τιμές φορτίου και τάσεων παραμόρφωσης των δοκιμίων κονιάματος καθώς και με τις ιδιότητες αυτών, για τις πειραματικές δοκιμές που αναφέρθηκαν.

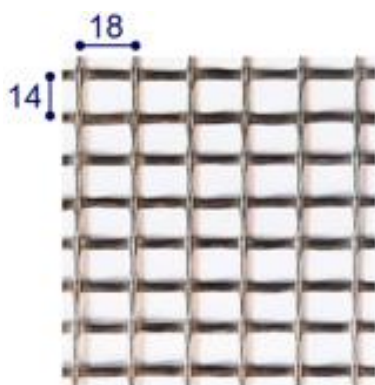
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και θλίψης του κονιάματος των αρμών

Δοκίμιο	Βάρος (g)	Μήκος L (mm)	Πλάτος b (mm)	Ύψος d (mm)	Κάμψη		Θλίψη	
					Φορτίο αστοχίας (N)	Τάση αστοχίας(Mpa)	Φορτίο αστοχίας(kN)	Τάση αστοχίας (MPa)
T-1-a	522	159,5	40,55	40,05	755	1,74	14	8,63
T-1-b	521,4	159,25	40,5	40,15	792	1,82	14,5	8,95
T-1-c	523,7	159,5	40,45	40,15	897	2,06	13,9	8,59
T-2-a	500,6	160,25	40,1	39,95	827	1,94	12,6	7,86
T-2-b	496,3	160,25	39,15	39,95	624	1,50	11,2	7,15
T-2-c	496,1	160,25	38,65	40,05	666	1,61	10,5	6,79
T-3-a	524,1	160	41,3	40,05	859	1,95	14,4	8,72
T-3-b	528,9	160	41,85	40,15	1034	2,30	13,2	7,89
T-3-c	528,6	160,25	41,75	40,05	924	2,07	16	9,58
Μέσος όρος :					819,78	1,89	13,37	8,24
Τυπική απόκλιση :					128,09	0,25	1,71	0,89
COV (%):					15,62	13,16	12,82	10,82

3.3.3 Πλέγμα ενίσχυσης

Για την ενίσχυση των δοκιμών τοιχοπλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν στρώσεις IAM. Πιο συγκεκριμένα έγινε χρήση πλέγματος ινών υάλου με θεωρητικό άνοιγμα βρόγχων 18 x 14 mm. Κύρια διεύθυνση εφαρμογής των IAM πάνω στα δοκίμια καθώς και παραλαβής φορτίου θεωρήθηκε η οριζόντια, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.8**.

Στον **Πίνακα 3.6** παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες βασικές ιδιότητες του πλέγματος ινών υάλου. Η επιλογή της συγκεκριμένης ενίσχυσης έγινε λόγω της ιδιαίτερης δυνατότητας των ινοπλεγμάτων να αναπτύσσουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις και μεγαλύτερη αντοχή στο επιβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 3.8: Πλέγμα ινών υάλου (Koutas and Papakonstantinou, 2021)

Πίνακας 3.6: Ιδιότητες πλέγματος ινών υάλου

Ιδιότητες	Υλικό	Μονάδες
	Γυαλί	
Μέτρο Ελαστικότητας	80	GPa
Επιφανειακό βάρος χωρίς επικάλυψη	280	g/m ²
Επιφανειακό βάρος με επικάλυψη	360	g/m ²
Ποσοστό βάρους στην κύρια διεύθυνση (%)	51,78	-
Ποσοστό βάρους στην δευτερεύουσα διεύθυνση (%)	48,22	-
Εφελκυστική αντοχή κύριας διεύθυνσης	77	KN/m
Εφελκυστική αντοχή δευτερεύουσας διεύθυνσης	76	KN/m
Διαστάσεις πλέγματος	18 x 14	mm

3.3.4 Μήτρες ενίσχυσης

Όπως αναφέρθηκε οι σειρές πειραματικών δοκιμών που έλαβαν μέρος κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν δύο. Για τις δοκιμές διαγώνιας θλίψης, η μήτρα ενίσχυσης ήταν ανόργανη - γεωπολυμερούς σύστασης για όλα τα δοκίμια. Για τις δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης σε ένα από τα δύο δοκίμια η μήτρα ήταν ανόργανη - τσιμεντοειδούς σύστασης.

- **Ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης**

Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με μήτρα αυτού του είδους και για τις δύο σειρές πειραματικών δοκιμών ήταν συνολικά επτά. Η σύσταση προέκυψε έπειτα από δοκιμές στο εργαστήριο και αποτελούνταν από διάλυμα πυριτικού καλίου, μετακαολίνη (με αργιλοπυριτικά οξείδια $\geq 95\%$), ίνες πολυπροπυλελίου (μήκους 6 mm), θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή από λατομείο (κοκκομετρικής διαβάθμισης 0-0,5 και 0,5-1) και νερό.

Στον **Πίνακα 3.7** παρουσιάζονται οι αναλογίες των συστατικών που αναμείχθηκαν.

Πίνακας 3.7: Σύνθεση γεωπολυμερούς μήτρας

Συστατικά	Σύνθεση γεωπολυμερούς μήτρας
	Αναλογίες (κατά βάρος)
Διάλυμα πυριτικού καλίου	2
Μετακαολίνη	1,5
Θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (0 -0,5)	4
Θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (0,5 - 1)	1,5
Ίνες πολυπροπυλελίου	1% (του όγκου νερού)
Νερό	0,3

- **Ανόργανη μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης**

Η συγκεκριμένη μήτρα εφαρμόστηκε σε ένα δοκίμιο τοιχοποιίας, το οποίο αποτελούσε μέρος της έρευνας της δοκιμής εκτός επιπέδου κάμψης τοιχοσωμάτων. Το εμπορικό

τσιμεντοκονίαμα ενισχύσεων που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε από την ανάμιξη τσιμεντοειδούς κονιάς και νερού.

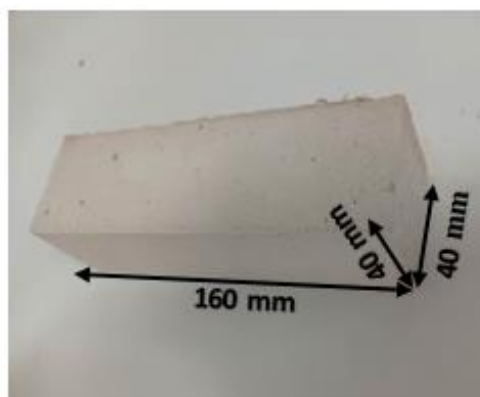
Στον **Πίνακα 3.8** παρουσιάζονται οι αναλογίες των συστατικών που αναμείχθηκαν.

Πίνακας 3.8: Σύνθεση τσιμεντοειδούς μήτρας

Σύνθεση τσιμεντοειδούς μήτρας	
Συστατικά	Αναλογίες (κατά βάρος)
Τσιμεντοειδής κονία	1
Νερό	0,23

Όπως και στην περίπτωση του κονιάματος των αρμών έτσι και στις περιπτώσεις των ανόργανων μητρών ενίσχυσης συλλέχθηκαν δείγματα έξι δοκιμίων γεωπολυμερούς και τριών δοκιμίων τσιμεντοειδούς κονιάς από τις μεταλλικές μήτρες διαστάσεων 160 x 40 x 40 mm και είχαν βάρος που κυμαινόταν από 410,7 g έως 505,1 g. Η διαδικασία συντήρησης ήταν ίδια με αυτή που προαναφέρθηκε. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης τριών σημείων και θλίψης των επιμέρους πρισμάτων που θα προκύπταν από την πρώτη δοκιμή. Σκοπός των δοκιμών ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των κονιαμάτων.

Στο **Σχήμα 3.9** παρουσιάζεται ένα δοκίμιο γεωπολυμερούς κονιάματος με τις αντίστοιχες διαστάσεις του.



Σχήμα 3.9: Δοκίμιο γεωπολυμερούς κονιάματος με τις διαστάσεις του

Ακολουθεί ο **Πίνακας 3.9** με τις τιμές φορτίου και τάσεων αστοχίας των δοκιμών γεωπολυμερούς και ο **Πίνακας 3.10** με τις αντίστοιχες τιμές των δοκιμών τσιμεντοειδούς κονιάματος καθώς και με τα χαρακτηριστικά αυτών, για τις πειραματικές δοκιμές που αναφέρθηκαν. Ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής των κονιαμάτων έγινε μέσω της **Εξ. (3.2)** ενώ ο υπολογισμός της θλιπτικής αντοχής τους μέσω της **Εξ. (3.3)**.

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων και θλίψης γεωπολυμερούς κονιάματος

Δοκίμιο	Βάρος (g)	Μήκος L (mm)	Πλάτος b (mm)	Ύψος d (mm)	Φορτίο αστοχίας (N)	Τάση αστοχίας(MPa)	Φορτίο αστοχίας(kN)	Τάση αστοχίας (MPa)
DTW - a	505,1	158	39,24	40,21	2254	5,33	73,812	47,03
DTW - b	495,7	158	39,51	40,05	2254	5,33	75,627	47,85
DTW - c	496,7	158	39,25	40,65	2130	4,93	74,44	47,41
DTW - d	491	157,5	39,42	39,82	2006	4,81	72,904	46,24
DTW - e	502,8	157,5	39,36	40,72	2166	4,98	72,276	45,91
DTW - f	497,3	158	39,27	39,85	1572	3,78	68,016	43,30
Μέσος όρος :					2063,67	4,86	72,85	46,29
Τυπική απόκλιση :					257,83	0,57	2,64	1,63
COV (%):					12,49	11,75	3,62	3,53

Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων και θλίψης τσιμεντοειδούς κονιάματος

Δοκίμιο	Βάρος (g)	Μήκος L (mm)	Πλάτος b (mm)	Ύψος d (mm)	Κάμψη		Θλίψη	
					Φορτίο αστοχίας (N)	Τάση αστοχίας(Mpa)	Φορτίο αστοχίας(kN)	Τάση αστοχίας (MPa)
SIKA - a	413,7	158,5	39,69	39,67	1148	2,76	23,183	14,60
SIKA - b	415,8	159	39,71	39,87	1640	3,90	25,558	16,09
SIKA - c	410,7	158,5	38,95	39,86	1686	4,09	26,326	16,90
Μέσος όρος :					1491,33	3,58	25,02	15,86
Τυπική απόκλιση :					298,22	0,72	1,64	1,16
COV (%):					20,00	20,09	6,55	7,34

3.4 Διαδικασία κατασκευής δοκιμών τοιχοπλήρωσης

Η κατασκευή όλων των δοκιμών τοιχοπλήρωσης πραγματοποιήθηκε εντός άκαμπτων ξύλινων καλουπιών, που δημιουργήθηκαν πρώτα, ώστε να διατηρήσουν τη μορφή τους και να αποφευχθούν παραμορφώσεις των δοκιμών κατά την κατασκευή τους. Για την περίπτωση της διαγώνιας θλίψης τα καλούπια ήταν τετραγωνικής μορφής και για την περίπτωση της εκτός επιπέδου κάμψης ήταν ορθογωνικής μορφής.

Έπειτα, ακολούθησε η διαβροχή των διατρητών οπτόπλινθων, σε πλαστικό δοχείο μεγάλης χωρητικότητας, εντός του οποίου υπήρχε επαρκής ποσότητα νερού. Συγκεκριμένα, οι οπτόπλινθοι τοποθετήθηκαν εντός του δοχείου για χρονικό διάστημα δέκα λεπτών. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν και μετά από ολιγόλεπτη αναμονή με στόχο την αποστράγγισή της περιττής ποσότητας νερού από την επιφάνεια τους, ξεκίνησε η διαδικασία της τοποθέτησης τους εντός των ξύλινων καλουπιών. Η τοποθέτηση τους έγινε σε οριζόντια διάταξη. Η διαδικασία διαβροχής των οπτόπλινθων στοχεύει στην αποφυγή του φαινομένου απορρόφησης της υγρασίας του κονιάματος, σε περίπτωση που δεν έχουν υποστεί τη διαβροχή, λόγω του μεγάλου πορώδους που διαθέτουν. Με το πέρας της κατασκευής τους ακολούθησε η διαβροχή της επιφάνειας των δοκιμών για επτά ημέρες ώστε να διατηρηθεί η υπάρχουσα υγρασία και να διατηρηθούν οι μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος των αρμών. Στο τέλος της βδομάδας αφαιρέθηκαν από τα καλούπια και ξεκίνησε η διαδικασία ετοιμασίας τους προς ενίσχυση.

Στο **Σχήμα 3.10** φαίνεται η διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω (για δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης) σε βήματα.

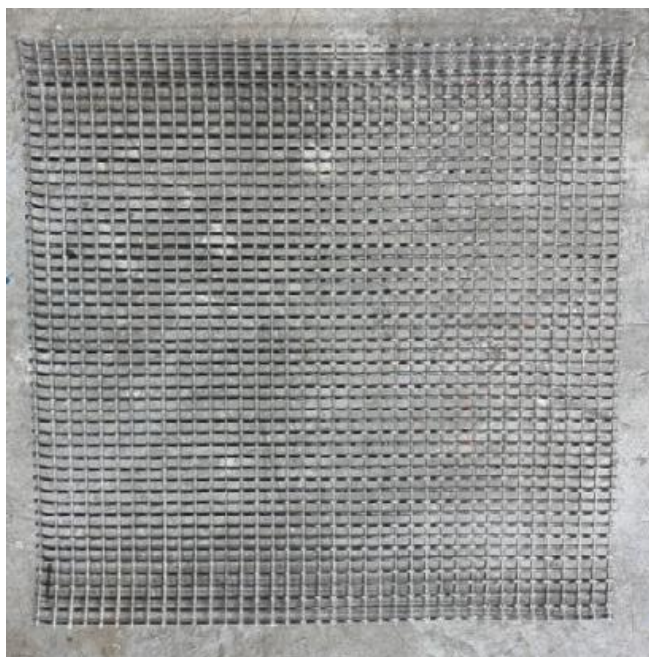


Σχήμα 3.10: Διαδικασία κατασκευής δοκιμών τοιχοπλήρωσης

3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμών τοιχοπλήρωσης

Η ενίσχυση των δοκιμών ακολούθησε έπειτα από κάποιες απαραίτητες διαδικασίες. Πρώτα από όλα τα ινοπλέγματα, σε μορφή ρολού, απλώθηκαν στο πάτωμα και κόπηκαν σε διαστάσεις μικρότερες κατά 5mm περίπου, από αυτές των δοκιμών. Αυτό έγινε ώστε να μην προεξέχουν κλώνοι ινών από την επιφάνεια της όψης του δοκιμίου κατά τη διαδικασία της ενίσχυσης. Σε περιπτώσεις μη ακριβούς εκτίμησης, το περιττό υλικό αφαιρέθηκε με λίμα. Έτσι, για τη σειρά των δοκιμών διαγώνιας θλίψης τα ινοπλέγματα υάλου απέκτησαν διαστάσεις 695 x 695 mm και για τη σειρά των δοκιμών εκτός επιπέδου κάμψης 1080 x 385 mm.

Στο **Σχήμα 3.11** παρουσιάζεται ινόπλεγμα υάλου έπειτα από την επεξεργασία που αναφέρθηκε, διαμορφωμένο για προσαρμογή σε επιφάνεια δοκιμίου υποβαλλόμενου σε δοκιμή διαγώνιας θλίψης.



Σχήμα 3.11: Διαμορφωμένο ινόπλεγμα υάλου

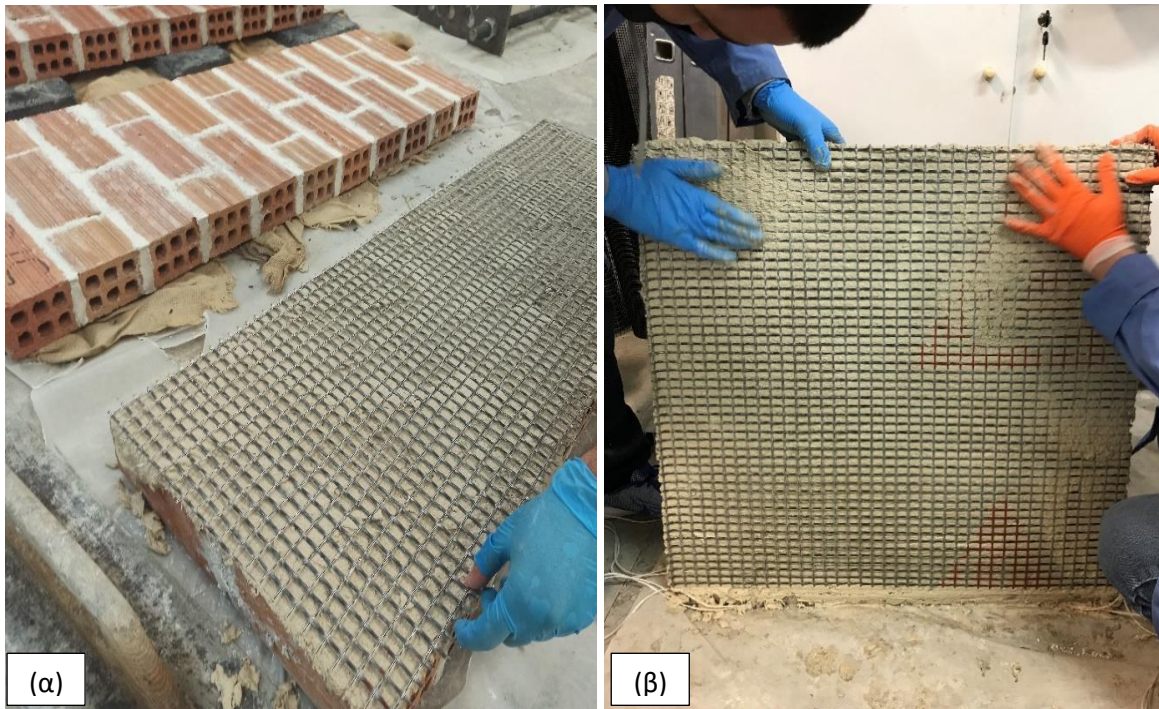
Σχεδόν δύο μήνες από την κατασκευή των δοκιμών ακολούθησε η λείανση της επιφάνειάς τους, απομακρύνοντας περιττό κονίαμα αρμών ή διάφορα αδρανή και σκόνες με τη βοήθεια κάποια λίμας και ειδικής μικρής σκούπας. Στόχος ήταν η όσο δυνατόν καλύτερη εφαρμογή του κονιάματος ενίσχυσης πάνω στις επιφάνειες των τοιχοσωμάτων. Χρειάστηκε προσοχή ώστε να μην προκληθούν βλάβες στα δοκίμια μέσω της ασκούμενης πίεσης ή της

τριβής κατά τη λείανση, ειδικά στην περίπτωση των δοκιμών που υποβλήθηκαν σε εκτός επιπέδου κάμψη λόγω της πρακτικά μηδενικής τους αντοχής. Μίση ώρα πριν τη διαδικασία ενίσχυσης τους ακολούθησε διαβροχή της επιφάνειάς τους για τελευταία φορά ώστε να υπάρξει η κατάλληλη υγρασία. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η ανάμειξη των συστατικών, για την κάθε μήτρα ενίσχυσης μέσω ηλεκτρικού αναδευτήρα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.12**.



Σχήμα 3.12: Κονίαμα γεωπολυμερούς κατά τη φάση της ανάμειξης

Η διαδικασία της ενίσχυσης φτάνει στο τέλος της με την εφαρμογή των κονιαμάτων πάνω στα δοκίμια τοιχοπλήρωσης και της τοποθέτησης των ινοπλεγμάτων. Αρχικά εφαρμόστηκε μία στρώση κονιάματος με τη βοήθεια μυστριού και τοποθετήθηκε ασκώντας ελαφριά πίεση η πρώτη στρώση του ινοπλέγματος ώστε να εισχωρήσει στη μήτρα ενίσχυσης και να αποκτήσει κατάλληλη συνάφεια, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.13**. Για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν αμφίπλευρα, το ίδιο πραγματοποιήθηκε και στις δύο όψεις τους, ενώ στα δοκίμια που ενισχύθηκαν μονόπλευρα, προστέθηκε δεύτερη στρώση κονιάματος και ινοπλέγματος, πάνω στις υπάρχουσες στρώσεις με την ίδια σειρά που αναφέρθηκε. Και στις δύο περιπτώσεις ενισχύσεων στο τέλος επαλείφθηκε κατάλληλα το κονίαμα ώστε να επικαλυφθεί η ενίσχυση. Τα τελικά πάχη των ενισχύσεων για την περίπτωση της μονόπλευρης ενίσχυσης ήταν της τάξης των 5 mm και της αμφίπλευρης ενίσχυσης της τάξης των 10 mm.



Σχήμα 3.13: Τοποθέτηση ινοπλεγμάτων σε δοκίμια υποβαλλόμενα σε δοκιμές (α) εκτός επιπέδου κάμψης, (β) διαγώνιας θλίψης

Σημαντικά σημεία που χρήζουν σημασίας στη διαδικασία την ενίσχυσης των δοκιμών ήταν τα εξής:

- Σωστή ανάδευση των υλικών των κονιαμάτων με τη χρήση ηλεκτρικού αναδευτήρα. Τοποθετούνται τα στερεά συστατικά μαζί και τα υγρά συστατικά μαζί και έπειτα αναμιγνύονται. Στην αρχή εφαρμόστηκε στον αναδευτήρα χαμηλότερη ταχύτητα που σταδιακά αυξήθηκε ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη εργασιμότητα τους, απαραίτητη για την ομαλή διείδυση του ινοπλέγματος στη μήτρα ενίσχυσης.
- Επάλειψη λεπτών στρώσεων των κονιαμάτων, ικανών να επικαλύψουν τις στρώσεις των ινοπλεγμάτων.
- Εξομάλυνση της τελευταίας στρώσης κονιάματος.
- Διαβροχή της ενισχυμένης επιφάνειας των δοκιμών για χρονικό διάστημα επτά ημερών ώστε να κρατήσει τα απαραίτητα επίπεδα υγρασίας και να αποφευχθούν φαινόμενα συστολής ξήρανσης της μήτρας ενίσχυσης.

Στο **Σχήμα 3.14** παρουσιάζεται ένα ενισχυμένο δοκίμιο στην τελική του μορφή.



Σχήμα 3.14: Ενισχυμένο δοκίμιο τοιχοπλήρωσης

3.6 Πειραματική διάταξη

Στην παρούσα ενότητα γίνεται περιγραφή των πειραματικών διατάξεων των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Και για τις δύο σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ένα σερβοϋδραυλικό έμβολο MTS με ικανότητα επιβολής φορτίου ± 250 kN. Οι δοκιμές που έλαβαν χώρα έγιναν βάσει διεθνώς αναγνωρισμένων προτύπων (RILEM, 1991; ASTM, 2019).

3.6.1 Πειραματική διάταξη διαγώνιας θλίψης

Η διαδικασία προετοιμασίας της πειραματικής διάταξης για τις δοκιμές διαγώνιας θλίψης, στις οποίες υποβλήθηκαν τα τοιχοσώματα διαστάσεων 700 x 700 x 70 mm, περιλάμβανε τα εξής βήματα:

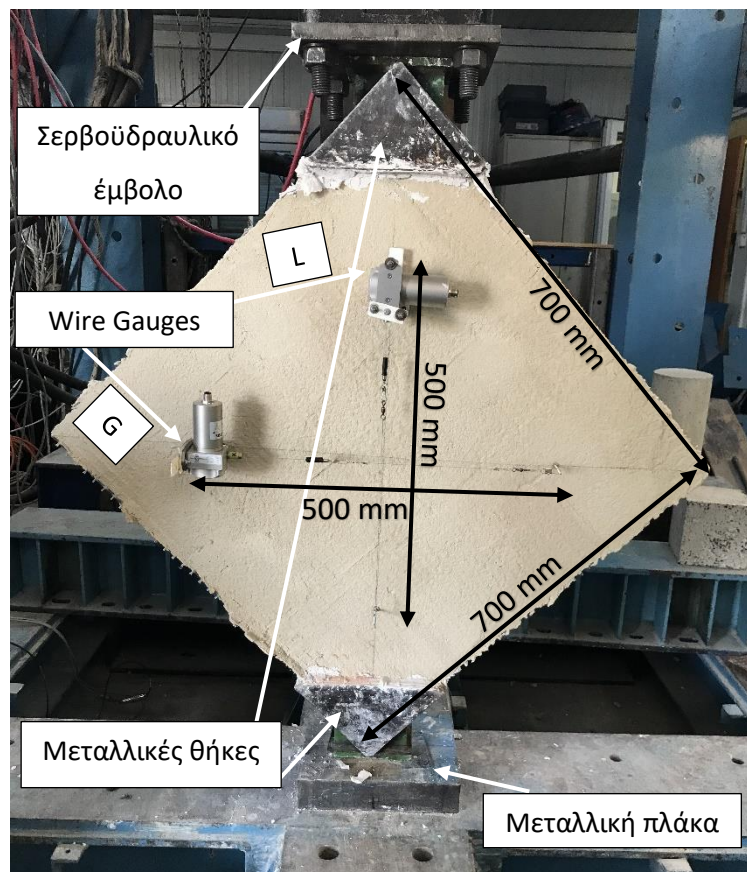
- Χάραξη των διαγωνίων των τοιχοσωμάτων. Η μια εκ των δύο χαρακτηρίστηκε ως κύρια διαγώνιος αποτελώντας τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, ενώ η άλλη χαρακτηρίστηκε ως δευτερεύουσα και σχεδιάστηκε ώστε να είναι κάθετη στην κύρια διαγώνιο.

- Απομάκρυνση περιττών εξογκωμάτων ανόργανης μήτρας και ινοπλεγμάτων με τη χρήση λίμας. Πραγματοποιήθηκε λείανση των επιφανειών, κυρίως στις γωνίες της κύριας διαγωνίου, με στόχο την μείωση πιθανότητας ανομοιόμορφης κατανομής του φορτίου κατά την επιβολή του.
- Διάνοιξη τεσσάρων οπών σε αποστάσεις των 250 mm από το κέντρο του τοιχοσώματος, το οποίο ήταν το σημείο τομής των διαγωνίων, κατά τη διεύθυνση των διαγωνίων.
- Τοποθέτηση ντιζών, πάχους 3 mm, στις οπές με τη βοήθεια κολλώδους ουσίας με σκοπό την σταθεροποίηση αυτών στο δοκίμιο. Με το πέρας μίας ημέρας οι ντίζες αποκτούσαν την επιθυμητή συνάφεια με την ουσία εντός των οπών.
- Τοποθέτηση των ηλεκτρονικών αισθητήρων (wire gauges) που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των δεδομένων κατά τις δοκιμές, επάνω στις ντίζες. Στα σημεία όπου θα τοποθετούνταν οι δύο αισθητήρες η προεξοχή των ντιζών ήταν περίπου 2,2 cm ενώ στα υπόλοιπα σημεία ήταν περίπου 6 cm. Οι αισθητήρες κατέγραφαν πόσο συρρικνώθηκε το δοκίμιο κατά την κύρια (wire gauge L) και πόσο επεκτάθηκε κατά τη δευτερεύουσα διεύθυνση (wire gauge G). Η αποφυγή οποιασδήποτε επαφής των συρμάτων των gauges κρίθηκε απαραίτητη ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβείς.
- Μεταφορά και τοποθέτηση των αντίστοιχων δοκιμίων - ένα τη φορά - μεταξύ του εμβόλου και της ακλόνητης μεταλλικής δοκού που είναι πακτωμένη στην αντίστοιχη θέση του μεταλλικού πλαισίου της πρέσας. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση πραγματοποιήθηκε εντός μεταλλικών βάσεων, στις γωνίες της κύριας διαγωνίου, οι οποίες σταθεροποιήθηκαν με τη βοήθεια μίγματος γύψου. Το μίγμα επέτρεψε την κατάλληλη κατανομή του θλιπτικού φορτίου και απέτρεψε την ανισόρροπη κατανομή συγκεντρωμένων τάσεων στις γωνίες. Μία τέτοια κατάσταση θα μπορούσε να οδηγήσει σε μη επιθυμητή και πρόωρη μορφή αστοχίας του τοιχοσώματος.
- Προσαρμογή των επιφανειών της άνω βάσης ώστε να είναι παράλληλη στην επιφάνεια επαφής του εμβόλου και της κάτω βάσης ώστε να είναι παράλληλη στην επιφάνεια επαφής της μεταλλικής δοκού όπου εδραζόταν, με στόχο την αποφυγή πρόωρης αστοχίας.
- Προσαρμογή του δοκιμίου τοιχοπλήρωσης με τη βοήθεια αεροστάθμης ώστε η κύρια διαγώνιος να είναι κατακόρυφη και το δοκίμιο να βρίσκεται κάθετα στο έμβολο.

Με την πάροδο μίας ημέρας από την εφαρμογή του γύψου και σταθεροποίησης του δοκιμίου σε αυτό, διενεργήθηκε έλεγχος παραμονής του δοκιμίου στην κατάλληλη θέση. Αν όλα κρίνονταν καθώς πρέπει το πείραμα μπορούσε να ξεκινήσει. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 3.15**.

Η πρέσα λάμβανε τις απαραίτητες εντολές μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή τον οποίο χειριζόταν κάποιος αρμόδιος. Ο ρυθμός επιβολής φορτίου ορίστηκε σε 0,01 mm/sec και τα δεδομένα καταγραφής του υπολογιστή ήταν:

- Το φορτίο επιβολής, σε KN
- Η μετακίνηση της κεφαλής του εμβόλου, σε mm
- Οι παραμορφώσεις του κατακόρυφου wire gauge (L), σε mm
- Οι παραμορφώσεις του οριζώντιου wire gauge (G), σε mm



Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη διαγώνιας θλίψης

Με το πέρας του εκάστοτε πειράματος σημειώθηκαν με έντονο χρώμα οι ρωγμές, όπου ήταν απαραίτητο, ώστε να είναι ευδιάκριτες.

3.6.2 Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου κάμψης

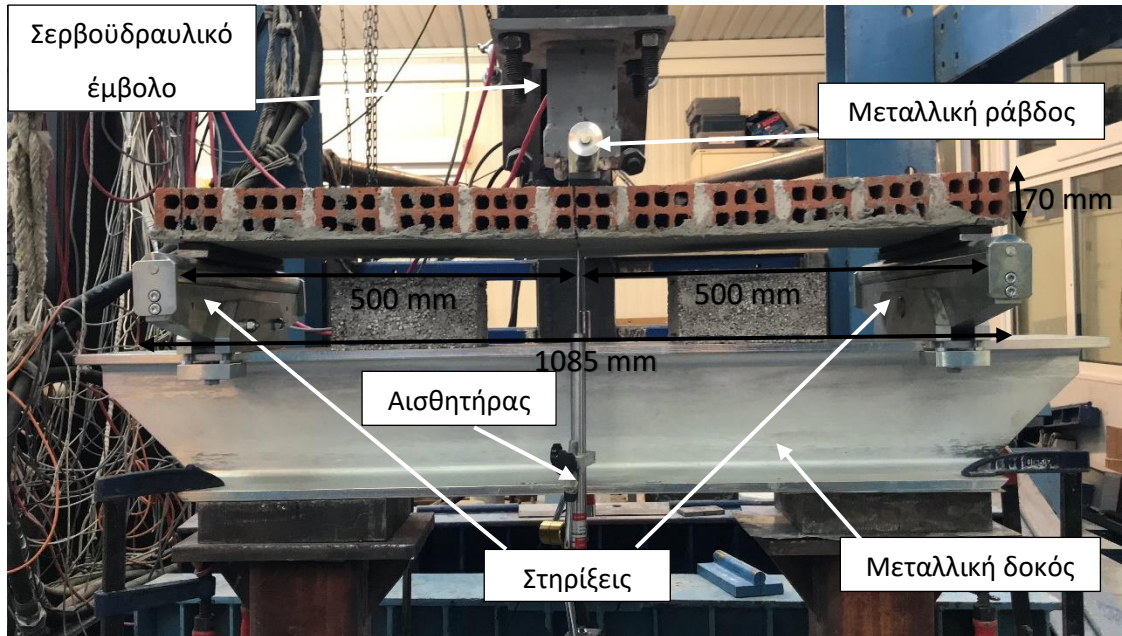
Η διαδικασία προετοιμασίας της πειραματικής διάταξης για τις δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης, στις οποίες υποβλήθηκαν τα τοιχοσώματα διαστάσεων 1085 x 390 x 70 mm, περιλάμβανε τα εξής βήματα:

- Χάραξη των μέσων των πλευρών τους ώστε να βρεθούν οι μεσοκάθετοι τους και επομένως το κέντρο των δοκιμών.
- Μεταφορά και προσεκτική τοποθέτηση των δοκιμών - ένα τη φορά - πάνω σε δύο κυλίνδρους, εδραζόμενες σε μεταλλική δοκό, ώστε το κέντρο του δοκιμίου, το οποίο ήταν και η θέση επιβολής του φορτίου να απέχει 500 mm από την κάθε στήριξη. Η τοποθέτηση των τοιχοσωμάτων έγινε ώστε η ενισχυμένη πλευρά να είναι αυτή που θα εδράζεται πάνω στις στηρίξεις.
- Ανασήκωμα των δοκιμών ώστε να τοποθετηθούν κομμάτια καουτσούκ στα σημεία επαφής ανάμεσα στις στηρίξεις και στα δοκίμια. Κομμάτι καουτσούκ τοποθετήθηκε και στο σημείο επιβολής του φορτίου το οποίο αποτελούσε μεταλλική ράβδος. Ο λόγος που οδήγησε σε αυτή την προσαρμογή ήταν ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα ολίσθησης των δοκιμών από τη θέση τους και φαινόμενα τοπικής θραύσης των οπτόπλινθων, γεγονός που θα οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Τα κομμάτια καουτσούκ δημιούργησαν καλύτερες συνθήκες τριβής και συνέβαλαν στην καλύτερη κατανομή φορτίου στις στηρίξεις.
- Τοποθέτηση δύο αισθητήρων, μπροστά και πίσω, κατά μήκος της μεσοκαθέτου της μικρής πλευράς. Οι μετακινήσεις του εμβόλου λήφθηκαν ως ο μέσος όρος των μετρήσεων των αισθητήρων. Η τοποθέτηση δύο αντί ενός αισθητήρα κρίθηκε αναγκαία λόγω του βάρους του δοκιμίου ενώ μάλιστα η ακρίβεια των μετρήσεων κατά την αστοχία των δοκιμών θα ήταν μεγαλύτερη.

Αν όλα κρίνονταν καθώς πρέπει το πείραμα μπορούσε να ξεκινήσει. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 3.16**.

Η πρέσα λάμβανε τις απαραίτητες εντολές μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή τον οποίο χειριζόταν κάποιος αρμόδιος. Ο ρυθμός επιβολής φορτίου ορίστηκε σε 0,01 mm/sec, όπως και στην προηγούμενη σειρά πειραμάτων, και τα δεδομένα καταγραφής του υπολογιστή ήταν:

- Το φορτίο επιβολής, σε KN
- Η μετακίνηση της κεφαλής του εμβόλου, σε mm
- Οι μετακινήσεις δύο αισθητήρων, σε mm



Σχήμα 3.16: Πειραματική διάταξη εκτός επιπέδου κάμψης

Με το πέρας του εκάστοτε πειράματος σημειώθηκαν με έντονο χρώμα οι ρωγμές, όπου ήταν απαραίτητο, ώστε να είναι ευδιάκριτες.

Κεφάλαιο 4

4. Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός

4.1 Γενικά

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο σειρών πειραματικών δοκιμών που διεξήχθησαν συνοδεία σχολιασμού αυτών και φωτογραφικού υλικού. Για λόγους συντομίας οι δοκιμές διαγώνιας θλίψης θα αναφέρονται ως Ά Σειρά Δοκιμών και οι δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης τριών σημείων ως Β Σειρά Δοκιμών. Σκοπός των δοκιμών ήταν η μελέτη της αποδοτικότητας των ινοπλεγμάτων υάλου σε ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς. Παρατηρήθηκαν οι διαφορετικές συμπεριφορές απόκρισης των δοκιμών καθώς και οι μορφές αστοχίας αυτών. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν ώστε να προκύψουν τα απαραίτητα συμπεράσματα ήταν τα φορτία και οι τάσεις ρηγμάτωσης και αστοχίας και οι εφελκυστικές τάσεις των δοκιμών. Τα μεγέθη ρηγμάτωσης προκύπτουν τη στιγμή που οι πρώτες ρωγμές κάνουν την εμφάνιση τους, ενώ τα μεγέθη αστοχίας τη στιγμή που το δοκίμιο αδυνατεί να παραλάβει φορτίο. Για λόγους σύγκρισης, για την Ά Σειρά Δοκιμών, παρατίθενται αποτελέσματα από διπλωματική εργασία που εκτυλίχθηκε γύρω από δοκιμές διαγώνιας θλίψης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Χατζίκος και Μηλιώτη, 2022). Η εν λόγω σύγκριση αναφέρεται κυρίως στη μήτρα ενίσχυσης των τοιχοσωμάτων, καθώς οι Χατζίκος και Μηλιώτη χρησιμοποίησαν μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης.

Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της Ά Σειράς Δοκιμών. Στον **Πίνακα 4.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Β Σειράς Δοκιμών.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα και μορφές αστοχίας Α Σειράς Δοκιμών

Δοκίμιο	Φορτίο (KN)		Διατμητική τάση (MPa)		Μορφή αστοχίας
	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	
DT_WALL_CON_1	49,99	51,89	0,777	0,806	Διαγώνιος διαχωρισμός λόγω ρηγμάτωσης του κονιάματος αρμών
DT_WALL_CON_2	35,85	46,24	0,557	0,718	Διαγώνιος διαχωρισμός λόγω ρηγμάτωσης του κονιάματος αρμών
DT_WALL_CON_3	43,26	61,98	0,672	0,963	Διαγώνιος διαχωρισμός λόγω ρηγμάτωσης του κονιάματος αρμών
DT_WALL_GEO_G2_1	67,32	96,87	1,046	1,505	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, θραύση οπτόπλινθου, αποκόλληση ενίσχυσης, εκτός επιπέδου κύρτωση δοκιμίου
DT_WALL_GEO_G2_2	79,31	90,22	1,232	1,402	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, ρηγμάτωση οπτόπλινθου, αποκόλληση ενίσχυσης, εκτός επιπέδου κύρτωση δοκιμίου
DT_WALL_GEO_G2_3	67,6	105,97	1,05	1,646	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, ρηγμάτωση οπτόπλινθου, αποκόλληση ενίσχυσης, εκτός επιπέδου κύρτωση δοκιμίου
DT_WALL_GEO_G1-1_1	75,76	92,12	1,177	1,431	Ρηγματώσεις στις ενισχυμένες επιφάνειες, θραύση οπτόπλινθου, αποκόλληση ενίσχυσης, σμίκρυνση κατά την κατακόρυφη και διαπλάτυση κατά την οριζόντια διεύθυνση του δοκιμίου
DT_WALL_GEO_G1-1_2	65,67	107,18	1,02	1,665	Ρηγματώσεις στις ενισχυμένες επιφάνειες, , αποκόλληση ενίσχυσης, σμίκρυνση κατά την κατακόρυφη και διαπλάτυση κατά την οριζόντια διεύθυνση του δοκιμίου
DT_WALL_GEO_G1-1_3	70,51	89,33	1,096	1,388	Ρηγματώσεις στις ενισχυμένες επιφάνειες, αποκόλληση ενίσχυσης, σμίκρυνση κατά την κατακόρυφη και διαπλάτυση κατά την οριζόντια διεύθυνση του δοκιμίου
DT_WALL_G2_1	59,61	80,92	0,973	1,363	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, εκτός επιπέδου κύρτωση δοκιμίου
DT_WALL_G2_2	73,79	85,96	1,225	1,443	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών και θραύση οπτόπλινθων, εκτός επιπέδου κύρτωση δοκιμίου
DT_WALL_G2_3	82,14	85,31	1,119	1,437	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, εκτός επιπέδου κύρτωση δοκιμίου

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα και μορφές αστοχίας 'B Σειράς Δοκιμών

Δοκίμιο	Φορτίο		Μορφή αστοχίας
	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	
OOPB_CON	0,405	0,405	Αποκόλληση μεταξύ κονιάματος αρμών και οπτόπλινθων, διαχωρισμός δοκιμίου σε δύο τμήματα
OOPB_GEO_G2	1,13	4,15	Διατμητική ολίσθηση μεταξύ της διεπιφάνειας των οπτόπλινθων και του κονιάματος των αρμών, ρήξη του πλέγματος ενίσχυσης, διαχωρισμός δοκιμίου σε δύο τμήματα
OOPB_SIKA_G2	1,73	7,69	Διατμητική θραύση οπτόπλινθων, αποκόλληση της ενίσχυσης

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Ά Σειράς Δοκιμών

4.2.1 Δοκίμια αναφοράς

Τα τρία δοκίμια που σχολιάζονται στην παρούσα υποενότητα υποβλήθηκαν στις εν λόγω δοκιμές χωρίς να ενισχυθούν.

- **DT_WALLS_CON**

Και στα τρία δοκίμια της εξεταζόμενης τριάδας η εμφάνιση των πρώτων ρωγμών παρατηρήθηκε στο κονίαμα των αρμών και συνοδεύτηκε με τη σταδιακή του αποκόλληση από τους οπτόπλινθους. Όταν το ασκούμενο θλιπτικό φορτίο έφτασε τις τιμές των φορτίων ρηγμάτωσης, υπήρξε μικρή πτώση του επιβαλλόμενου φορτίου. Στη συνέχεια ακολούθησε αύξηση του μέχρι τη στιγμή που τα δοκίμια αστόχησαν, παραλαμβάνοντας τις μέγιστες τιμές φορτίων (φορτία αστοχίας) που ήταν ικανά. Σε αυτό το σημείο η πειραματική διαδικασία έφτασε στο τέλος της καθώς τα δοκίμια αστόχησαν διατμητικά, λόγω θραύσης του κονιάματος των αρμών, με τα δοκίμια να χωρίζονται σε δύο επιμέρους τμήματα. Η αστοχία των τοιχοσωμάτων επήλθε σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα μετά τη διαρροή τους.

Γενικά παρατηρήθηκε πως η συμπεριφορά της εξεταζόμενης τριάδας δοκιμών ήταν παρόμοια. Η αστοχία τους ήταν ψαθυρή και η μορφή της διατμητική. Το DT_WALL_CON_3 παρουσίασε μεγαλύτερη αντοχή συγκριτικά με τα άλλα δύο. Ωστόσο, οι τιμές της μετακίνησης του εμβόλου και στις τρεις δοκιμές για τις στιγμές ρηγμάτωσης και αστοχίας δεν είχαν μεγάλη απόκλιση. Αξίζει να αναφερθεί πως και στις τρεις περιπτώσεις δοκιμών

τοποθετήθηκαν μεταλλικές πλάκες κοντά στα δοκίμια, ώστε κατά την προβλεπόμενη αστοχία τους να μην αποκολληθούν απότομα τα τμήματα των δοκιμίων κατά την πτώση τους και πέσουν στο πάτωμα, δημιουργώντας βλάβες στα wire gauges.

Οι τιμές των φορτίων, τάσεων ρηγματώσης και αστοχίας παρουσιάζονται για το κάθε δοκίμιο της τριάδας των δοκιμίων αναφοράς στον **Πίνακα 4.1**. Ο υπολογισμός των διατμητικών τάσεων πραγματοποιήθηκε μέσω της **Εξ. (4.1)** και ο υπολογισμός των διατμητικών παραμορφώσεων μέσω της **Εξ. (4.2)**.

Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων και στα **Σχήματα 4.2** και **4.3** τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης και διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης αντίστοιχα.

$$\tau = \frac{0,707 * P * 1000}{b * d}, \quad (4.1)$$

Όπου

P: Επιβαλλόμενο φορτίο, σε KN

b: μήκος δοκιμίου, σε mm

d: πάχος δοκιμίου, σε mm

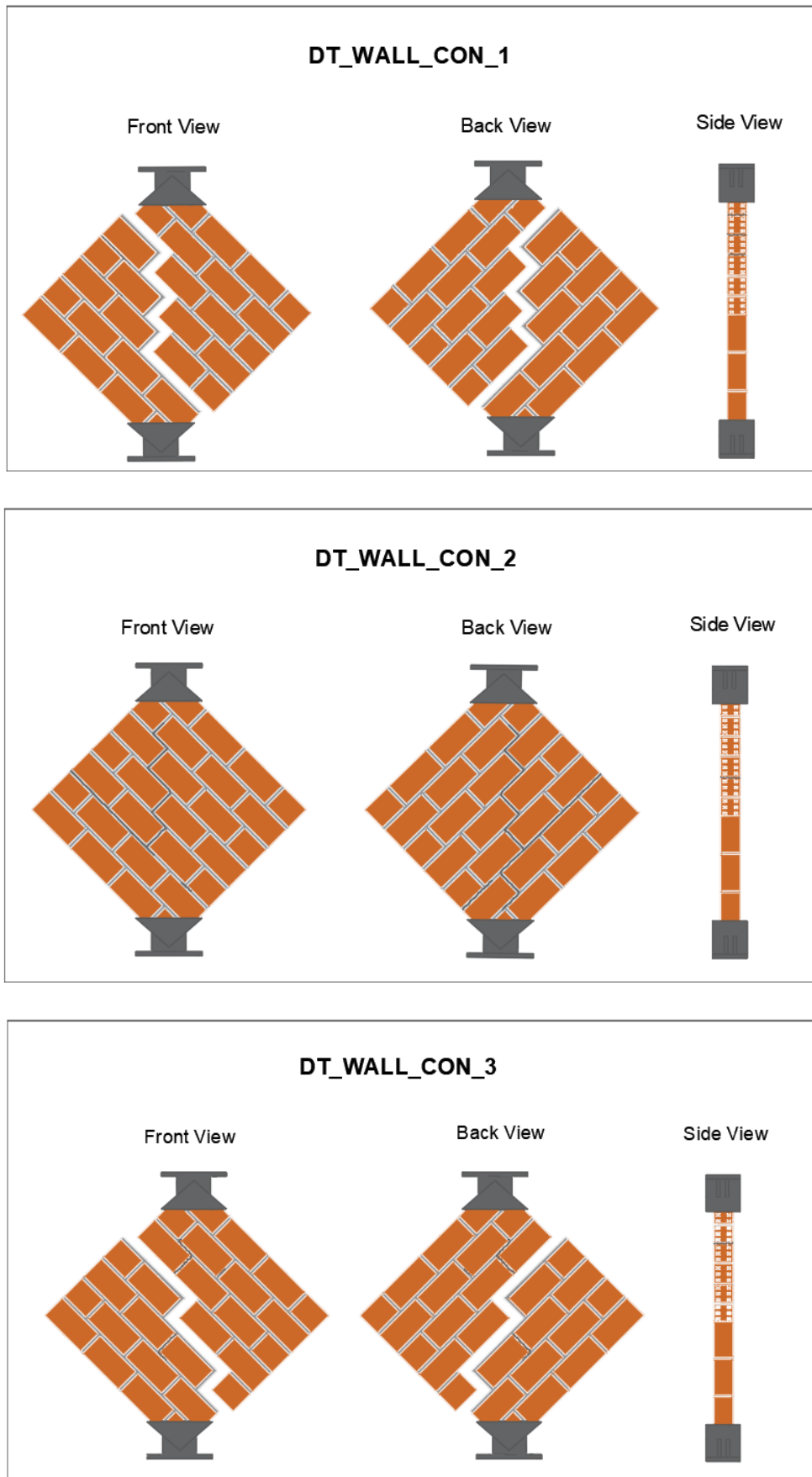
$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}, \quad (4.2)$$

Όπου

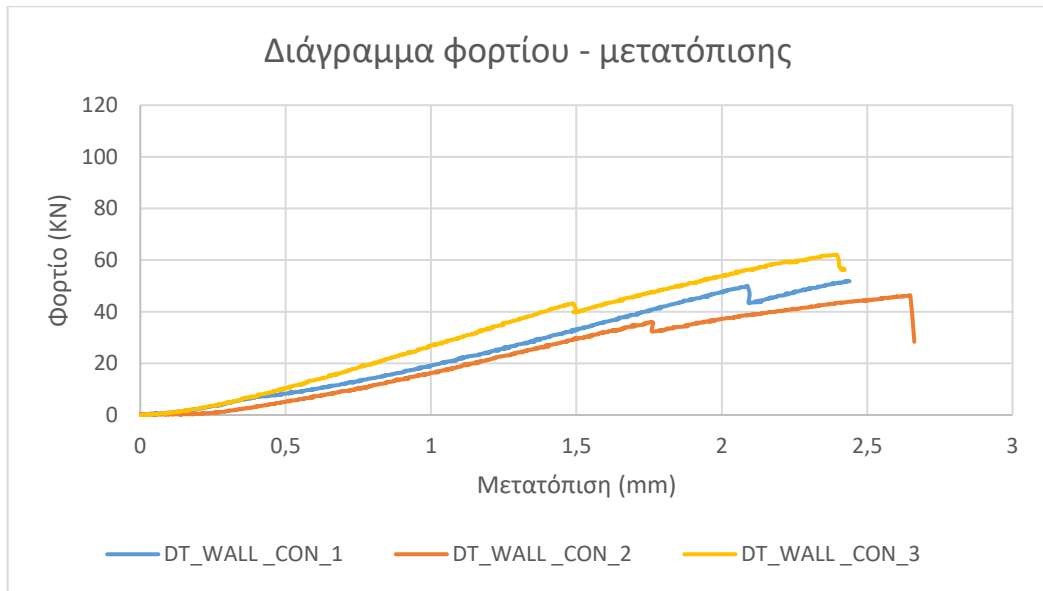
ΔV : παραμόρφωση κατακόρυφου wire gauge, σε mm

ΔH : παραμόρφωση οριζόντιου wire gauge, σε mm

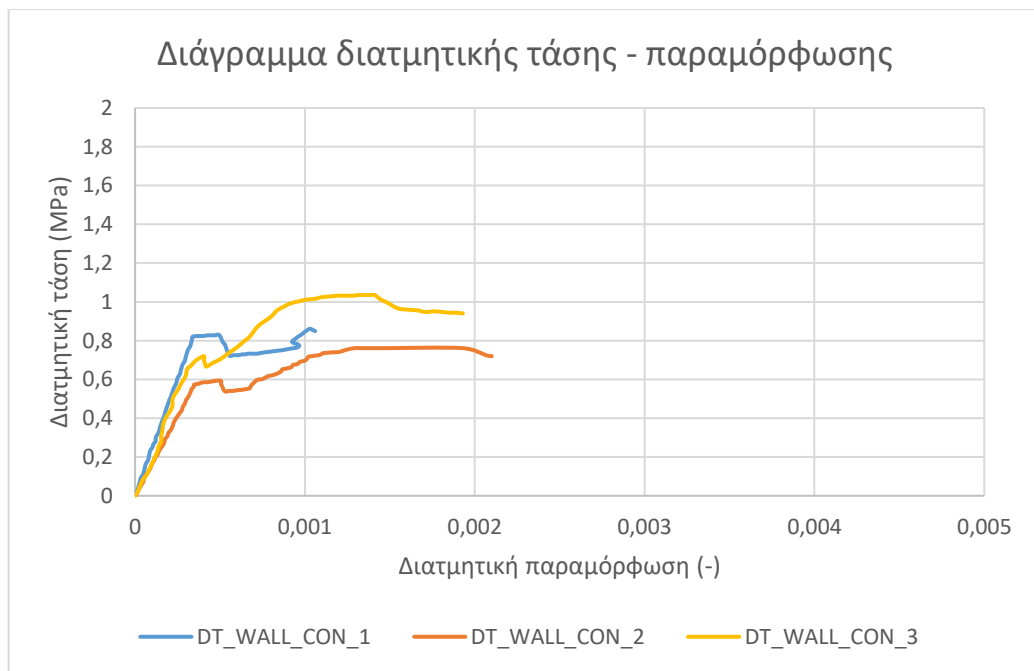
g: μήκος wire gauges, σε mm



Σχήμα 4.1: Μορφές αστοχίας δοκιμίων αναφοράς



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμίων αναφοράς



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων αναφοράς

4.2.2 Δοκίμια ενισχυμένα μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης

Τα τρία δοκίμια που σχολιάζονται στην παρούσα υποενότητα υποβλήθηκαν στις εν λόγω δοκιμές με μονόπλευρη ενίσχυση δύο στρώσεων ινοπλέγματος υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς.

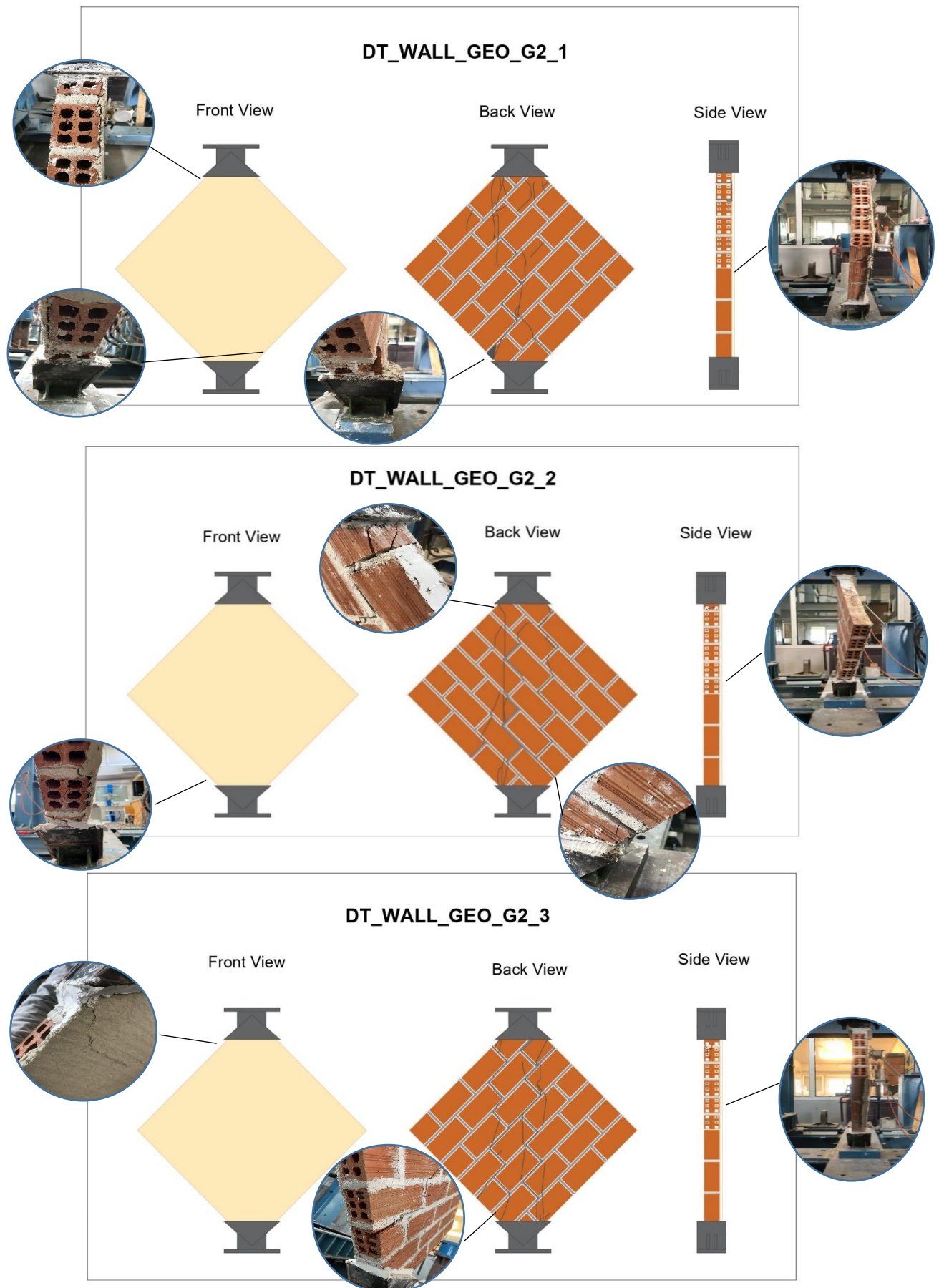
- **DT_WALLS_GEO_G2**

Και στα τρία δοκίμια της εξεταζόμενης τριάδας η εμφάνιση των πρώτων ρωγμών παρατηρήθηκε στο κονίαμα των αρμών από τη μεριά της μη ενισχυμένης πλευράς και ήταν πάνω στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Όταν το ασκούμενο θλιπτικό φορτίο έφτασε τις τιμές των φορτίων ρηγμάτωσης, υπήρξε μικρή πτώση του επιβαλλόμενου φορτίου. Στη συνέχεια ακολούθησε αύξηση του μέχρι τη στιγμή που τα δοκίμια αστόχησαν, παραλαμβάνοντας τις μέγιστες τιμές φορτίων (φορτία αστοχίας) που ήταν ικανά. Σε αυτό το σημείο η πειραματική διαδικασία έφτασε στο τέλος της καθώς τα δοκίμια αστόχησαν. Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας οι ρηγματώσεις πλήθαιναν και κάποιες από αυτές έγιναν μεγαλύτερες ενώ η πλειοψηφία αυτών εμφανίστηκε στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Στις μη ενισχυμένες πλευρές παρατηρήθηκαν ρωγμές και θραύση του κονιάματος των αρμών και των οπτόπλινθων, κυρίως κοντά στις μεταλλικές βάσεις λόγω φαινομένων τοπικής περίσφιγξης που οδήγησαν στην εμφάνιση συγκεντρωμένων τάσεων. Σε δύο περιπτώσεις μάλιστα, λόγω της αποκόλλησης των αρμών από τους οπτόπλινθους, τα δοκίμια τείνανε να χωριστούν σε δύο τμήματα, κάτι που λόγω της ενίσχυσης δεν πραγματοποιήθηκε. Στις ενισχυμένες πλευρές παρατηρήθηκε αποκόλληση της ενίσχυσης κοντά στις μεταλλικές βάσεις. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως υπήρξε κύρτωση - λυγισμός των δοκιμίων κατά την οριζόντια διεύθυνση, προς τις μη ενισχυμένες πλευρές τους.

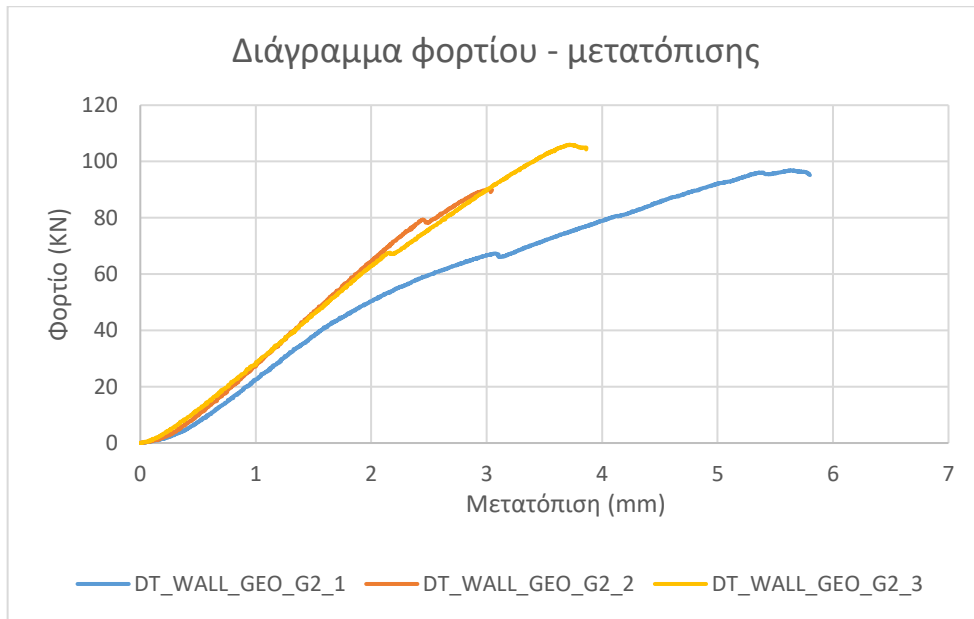
Γενικά παρατηρήθηκε πως η συμπεριφορά της εξεταζόμενης τριάδας δοκιμίων ήταν παρόμοια. Το DT_WALL_GEO_G2_3 παρουσίασε μεγαλύτερη αντοχή σε όρους φορτίου ενώ το DT_WALL_GEO_G2_1 μια πιο όλκιμη συμπεριφορά καθώς αστόχησε για μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων. Γενικά στις ενισχυμένες πλευρές δεν εμφανίστηκαν ρωγμές εκτός από ελάχιστες, μικρής κλίμακας. Από τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται επίσης η αύξηση της αποδοτικότητας της συγκεκριμένης ενίσχυσης συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς.

Οι τιμές των φορτίων, τάσεων ρηγμάτωσης και αστοχίας παρουσιάζονται για το κάθε δοκίμιο της τριάδας των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης στον **Πίνακα 4.1**. Ο υπολογισμός των διατμητικών τάσεων πραγματοποιήθηκε μέσω της **Εξ. (4.1)** και ο υπολογισμός των διατμητικών παραμορφώσεων μέσω της **Εξ. (4.2)**.

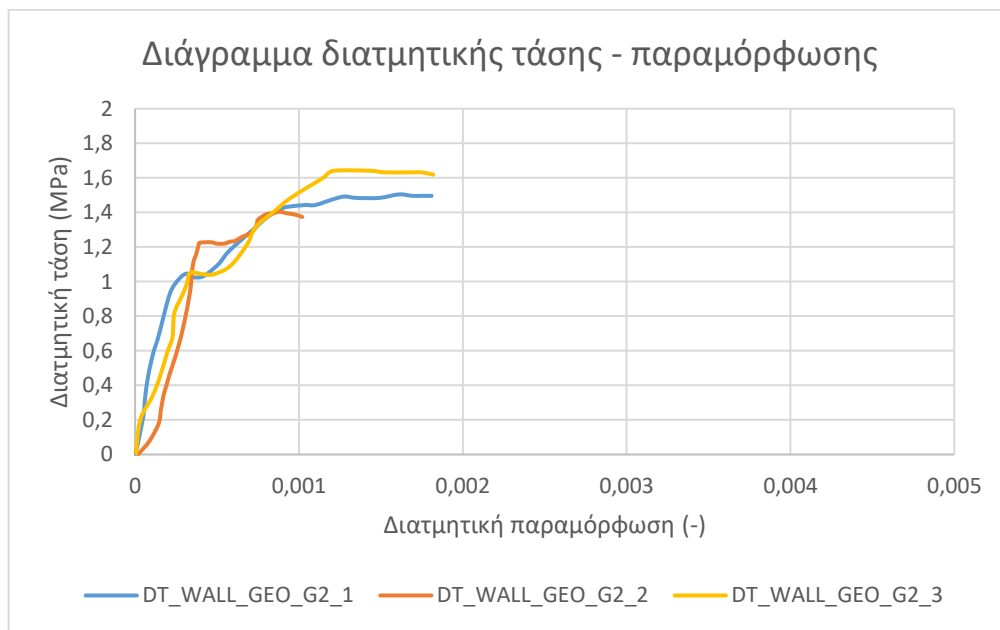
Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων και στα **Σχήματα 4.5** και **4.6** τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης και διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης αντίστοιχα.



Σχήμα 4.4: Μορφές αστοχίας μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης

4.2.3 Δοκίμια ενισχυμένα αμφίπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης

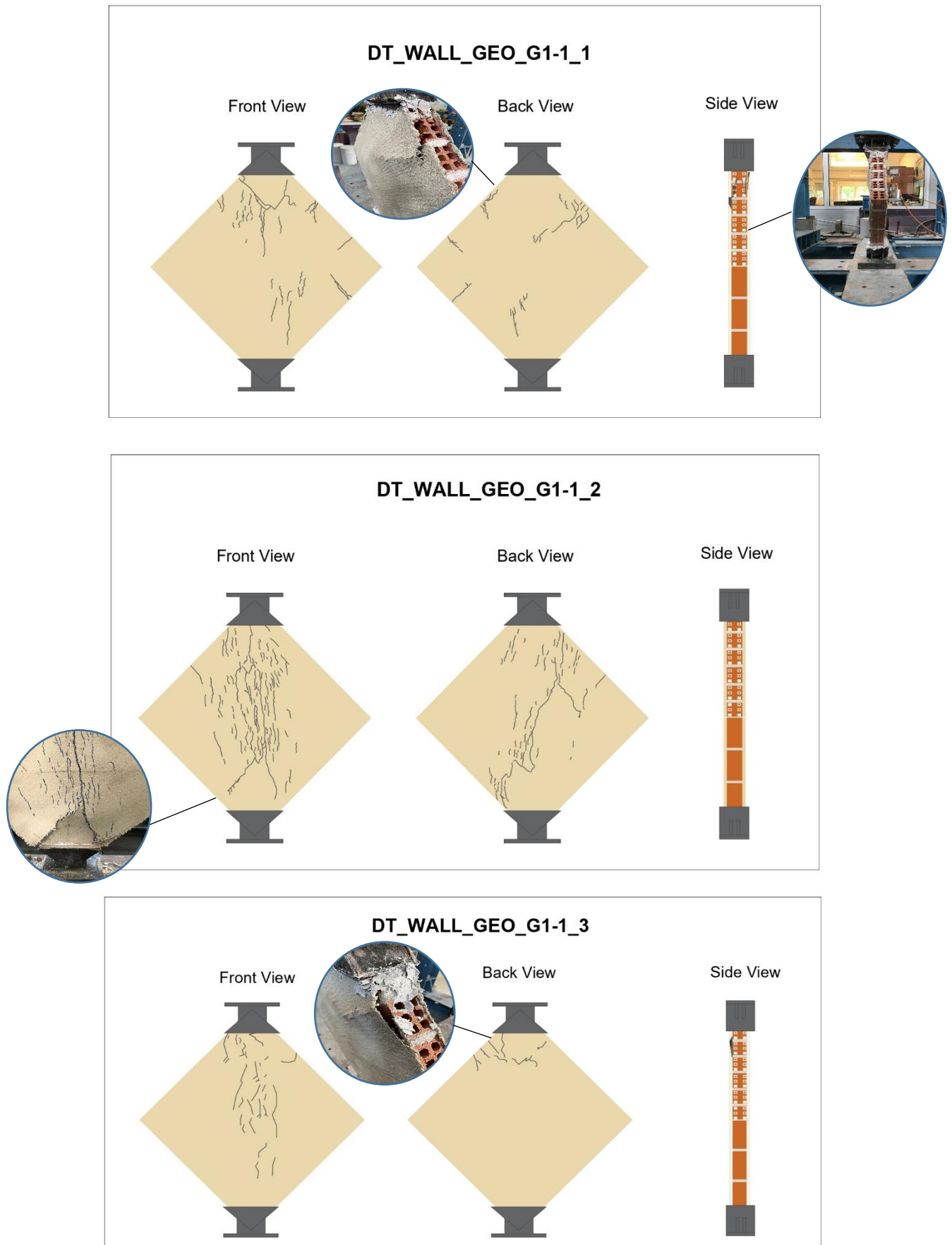
Τα τρία δοκίμια που σχολιάζονται στην παρούσα υποενότητα υποβλήθηκαν στις εν λόγω δοκιμές με αμφίπλευρη ενίσχυση δύο στρώσεων ινοπλέγματος υάλου, μία στην κάθε πλευρά του δοκιμίου, σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος.

- **DT_WALL_GEO_G1-1**

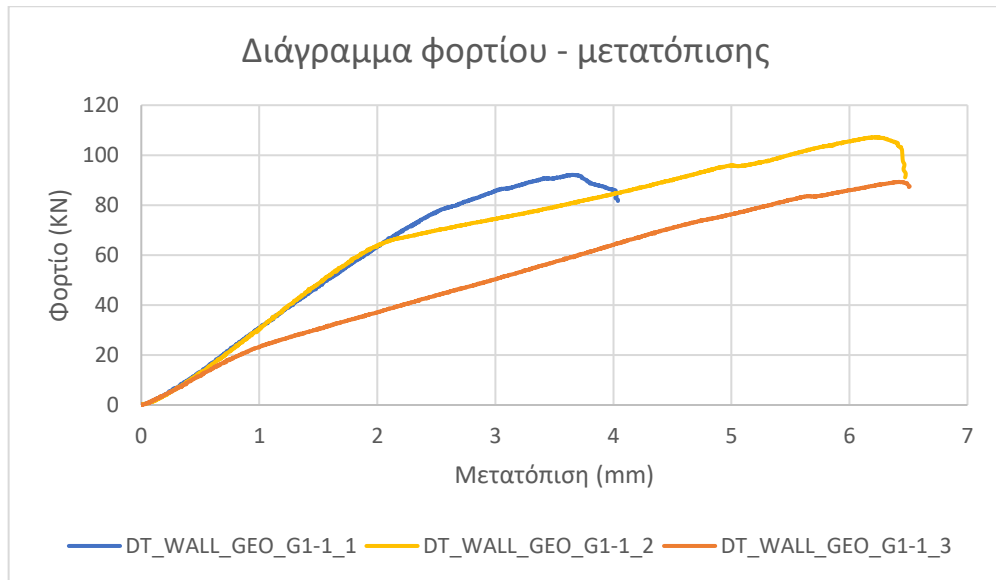
Και στα τρία δοκίμια της εξεταζόμενης τριάδας η εμφάνιση των πρώτων ρωγμών παρατηρήθηκε στις ενισχυμένες επιφάνειες κυρίως κοντά στις μεταλλικές βάσεις. Το ασκούμενο θλιπτικό φορτίο αυξανόταν καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, χωρίς να υπάρξει κάποια αξιοσημείωτη πτώση του όταν έφτασε τα φορτία ρηγμάτωσης, μέχρι τη στιγμή που τα δοκίμια αστόχησαν παραλαμβάνοντας τα μέγιστα φορτία (φορτία αστοχίας) που ήταν ικανά. Σε αυτό το σημείο η πειραματική διαδικασία έφτασε στο τέλος της καθώς τα δοκίμια αστόχησαν. Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας οι ρηγματώσεις πλήθαιναν με την πλειοψηφία αυτών να εμφανίζεται στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Και στις δύο πλευρές εμφανίστηκαν ρηγματώσεις. Γενικά παρατηρήθηκε θραύση οπτόπλινθων και αποκόλληση της ενίσχυσης κοντά στις μεταλλικές βάσεις. Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε σμίκρυνση των δοκιμίων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση τους και διαπλάτυνση τους κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Γενικά παρατηρήθηκε πως η συμπεριφορά της εξεταζόμενης τριάδας δοκιμίων ήταν παρόμοια. Η ανάπτυξη αρκετών ρωγμών στην ενίσχυση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι μια επιθυμητή συμπεριφορά απόκρισης καθώς σημαίνει πως το υλικό ενίσχυσης δέχτηκε μεγάλο μέρος του φορτίου, ενώ παράλληλα έγινε καλή κατανομή τάσεων. Το DT_WALL_GEO_G1-1_2 είχε την καλύτερη συμπεριφορά απόκρισης συγκριτικά με τα άλλα δύο. Από τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται επίσης η αύξηση της αποδοτικότητας της συγκεκριμένης ενίσχυσης συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς.

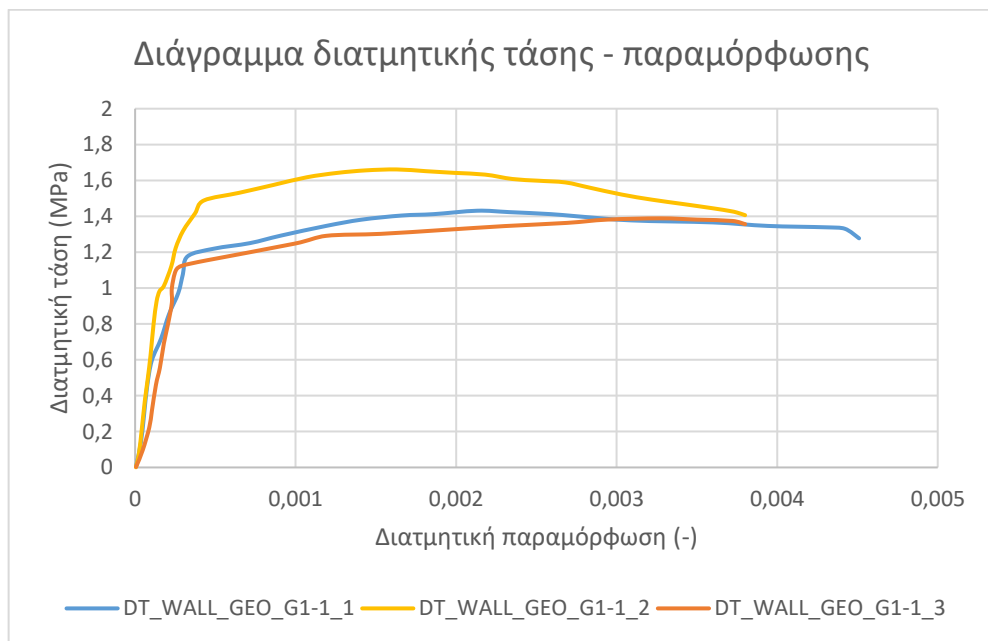
Οι τιμές των φορτίων, τάσεων ρηγμάτωσης και αστοχίας παρουσιάζονται για το κάθε δοκίμιο της τριάδας των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης στον **Πίνακα 4.1**. Ο υπολογισμός των διατμητικών τάσεων πραγματοποιήθηκε μέσω της **Εξ. (4.1)** και ο υπολογισμός των διατμητικών παραμορφώσεων μέσω της **Εξ. (4.2)**. Στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων και στα **Σχήματα 4.8** και **4.9** τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης και διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7: Μορφές αστοχίας αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης αμφίπλευρά ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης



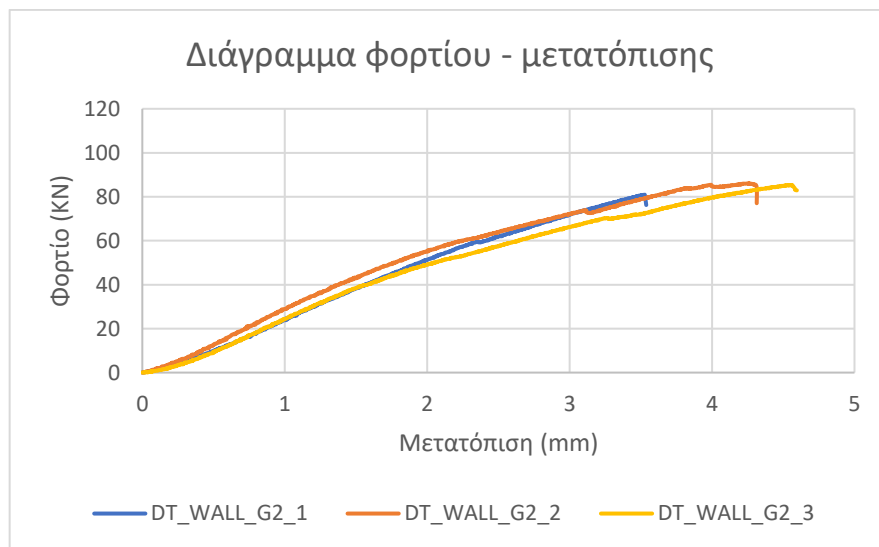
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης αμφίπλευρά ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης

4.2.4 Δοκίμια ενισχυμένα μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης

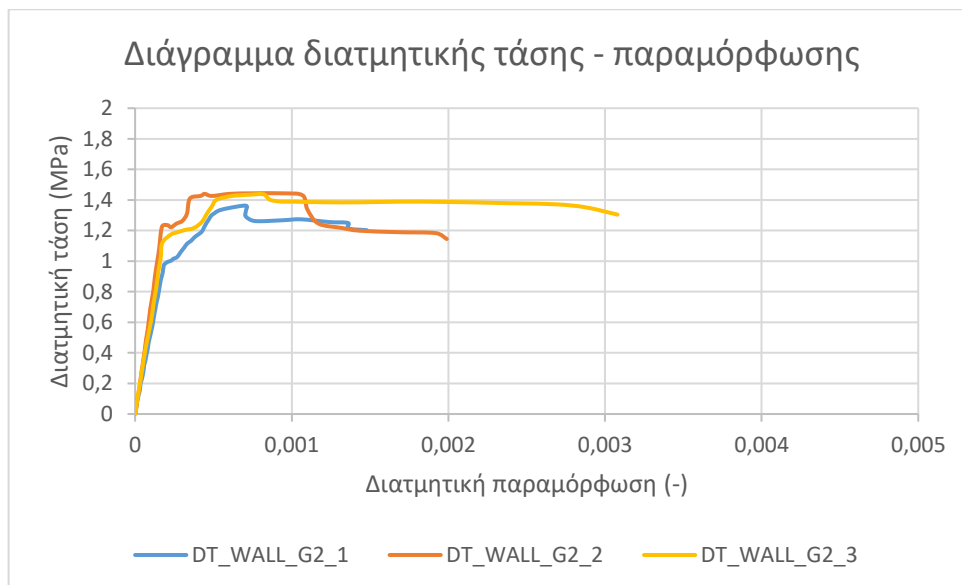
Η συγκεκριμένη τριάδα δοκιμών δεν αποτέλεσε πειραματικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι πειραματικές δοκιμές αποτέλεσαν αντικείμενο

μελέτης των Χατζίκος και Μηλιώτη (2022) και τα πειραματικά αποτελέσματα παρατίθενται συνοπτικά χωρίς εκτενή σχολιασμό τους για λόγους σύγκρισης.

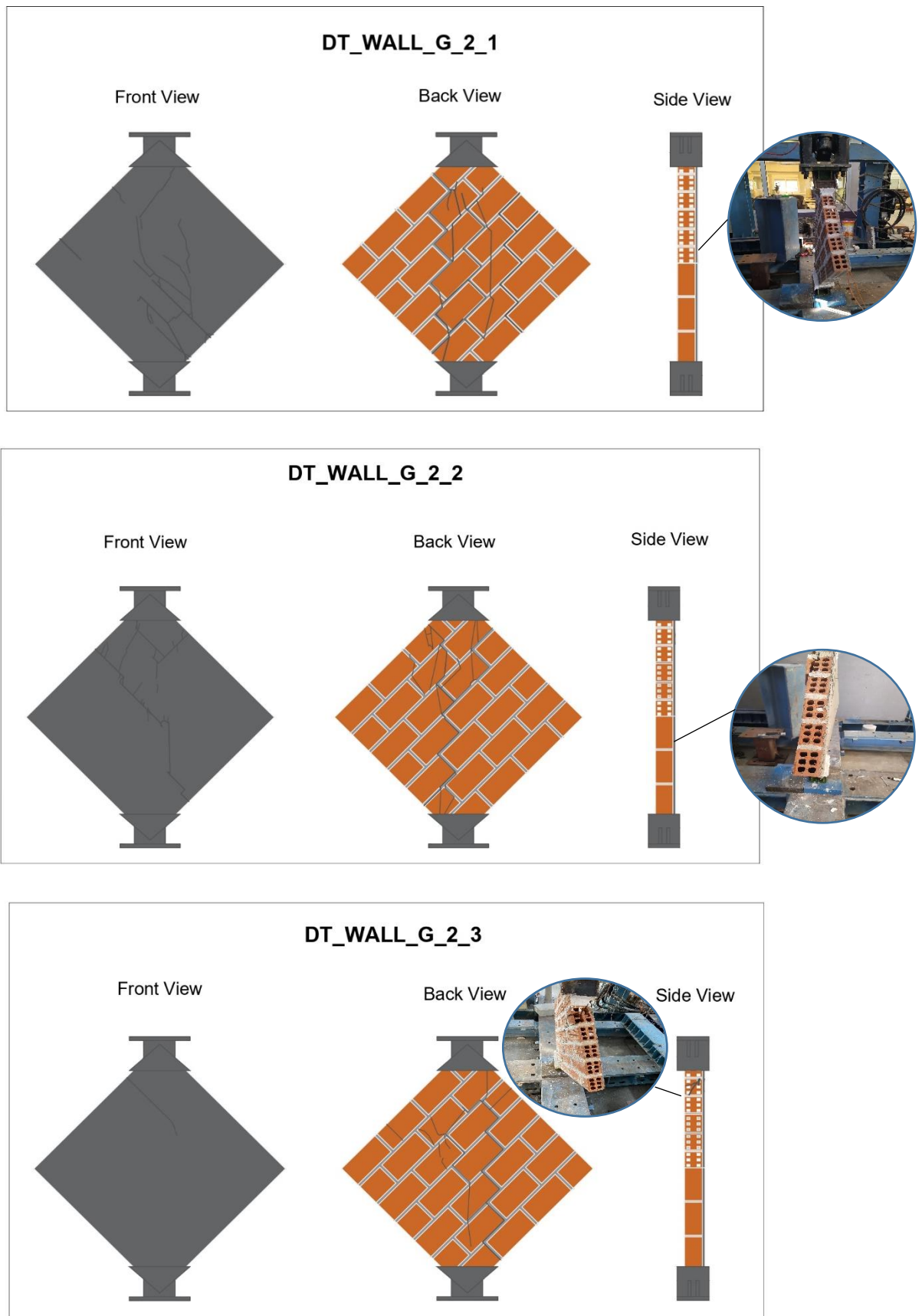
Στον **Πίνακα 4.1** αναγράφονται οι τιμές των συγκρίσιμων μεγεθών μελέτης όπως και οι μορφές αστοχίας της συγκεκριμένης τριάδας. Ο υπολογισμός των διατμητικών τάσεων πραγματοποιήθηκε μέσω της **Εξ. (4.1)** και ο υπολογισμός των διατμητικών παραμορφώσεων μέσω της **Εξ. (4.2)**. Στα **Σχήματα 4.10** και **4.11** παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης και διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης



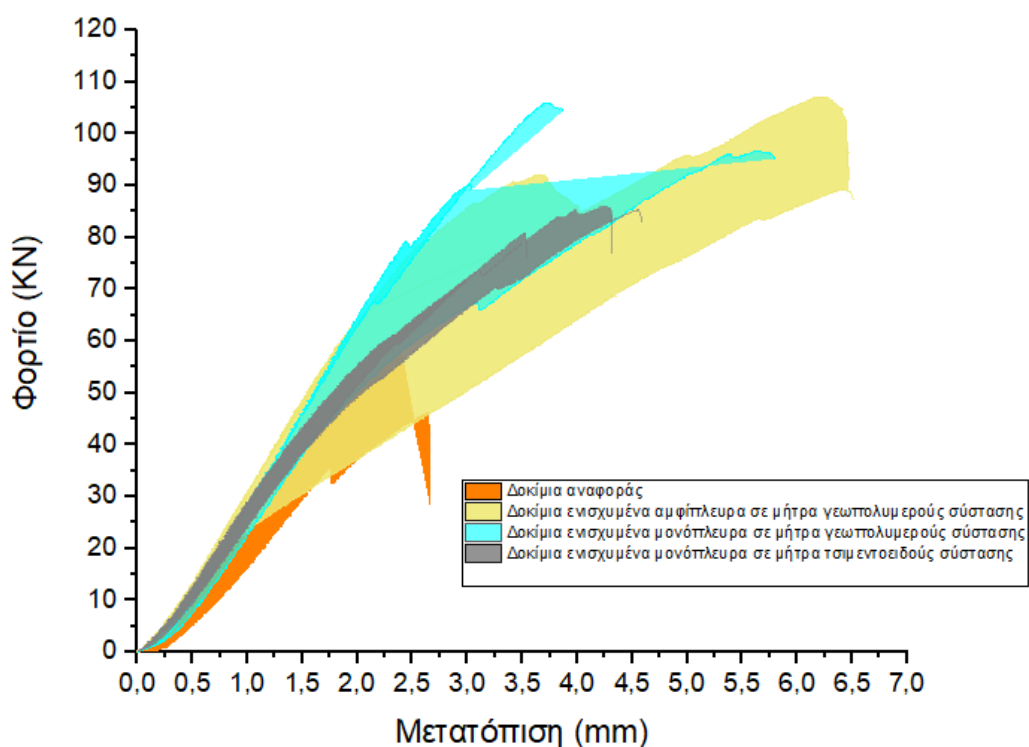
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης



Σχήμα 4.12: Μορφές αστοχίας μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης

4.3 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων

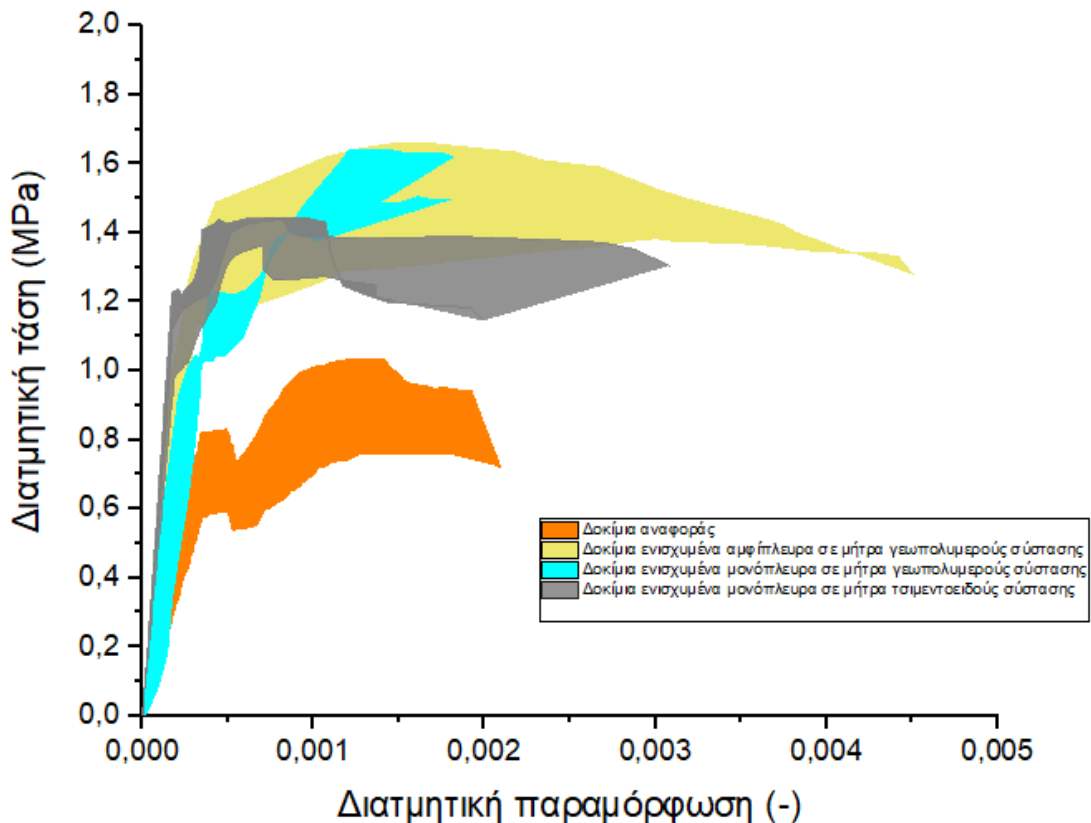
Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου - μετατόπισης και διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης των δοκιμίων που προαναφέρθηκαν. Στα **Σχήματα 4.13** και **4.14** παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες των αντίστοιχων διαγραμμάτων, της κάθε τριάδας δοκιμίων που υποβλήθηκαν στις συγκεκριμένες πειραματικές δοκιμές. Στόχος της σύγκρισης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή και την απόδοση της ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε στην κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.13: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης των δοκιμίων

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό σε όλες τις περιπτώσεις ενισχύσεων παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της αντοχής των δοκιμίων έναντι διαγώνιας θλίψης, συγκριτικά με την περίπτωση των δοκιμίων αναφοράς. Τις μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε θλιπτικό φορτίο δείχνουν να πέτυχαν τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης ήταν γεωπολυμερούς σύστασης. Επίσης, τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια είναι αυτά που αστόχησαν για μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης του εμβόλου επιβολής φορτίου. Ακολουθούν τα μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης, τα μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης και τέλος τα δοκίμια αναφοράς. Τα δοκίμια των οποίων η μήτρα

αποτελούνταν από κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης αστόχησαν για μικρότερες τιμές φορτίου και μετατόπισης συγκριτικά με τις δύο περιπτώσεις που το κονίαμα ενίσχυσης ήταν γεωπολυμερούς σύστασης. Ωστόσο η διακύμανση των τιμών της συγκεκριμένης τριάδας ήταν πιο μικρή συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.13**, κάτι που φανερώνει μία πιο σταθερή συμπεριφορά απόκρισης.



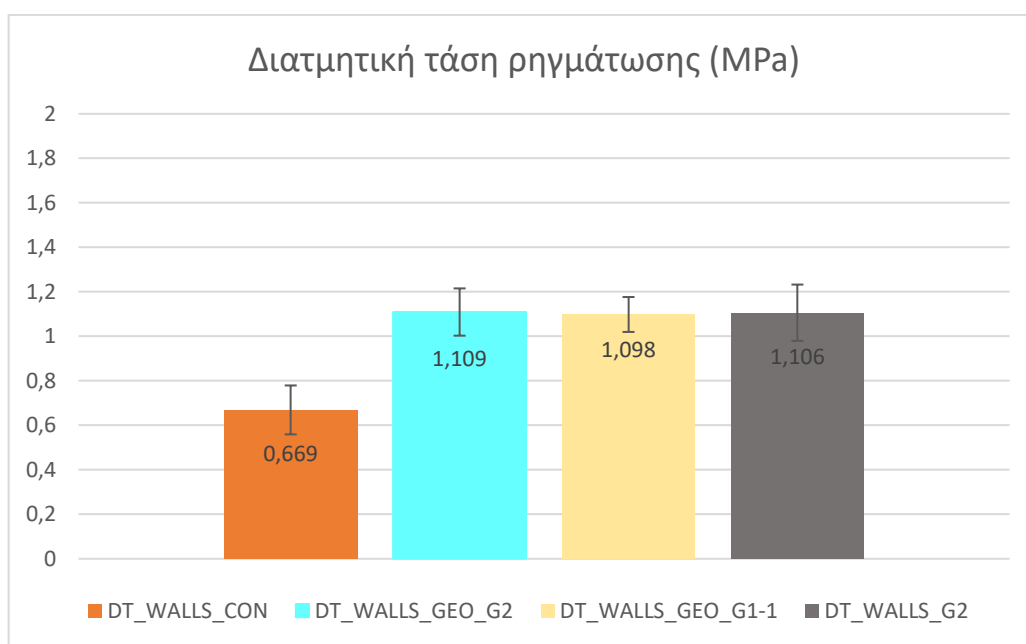
Σχήμα 4.14: Συγκριτικό διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης των δοκιμών

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι υπήρξε σημαντική αύξηση στις τιμές των τάσεων ρηγμάτωσης και αστοχίας σε όλες τις περιπτώσεις των ενισχύσεων σε σχέση με αυτές των μη ενισχυμένων δοκιμών. Έτσι, η τριάδα των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος είναι αυτή που ανέπτυξε μεγαλύτερες τιμές σε όρους παραμορφώσεων. Μάλιστα, οι μεγαλύτερες τιμές τάσεων αστοχίας εμφανίστηκαν σε δοκίμιο της συγκεκριμένης τριάδας, στο DT_WALL_GEO_G1-1_2. Η τριάδα των δοκιμών των οποίων η μήτρα ήταν τσιμεντοειδούς κονιάματος ανέπτυξε ρηγματώσεις για μικρότερες τιμές παραμορφώσεων, σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις ενισχύσεων όπως φαίνεται και οι τιμές των τάσεων ρηγμάτωσης ήταν μεγαλύτερες από αυτές των οποίων η μήτρα ήταν

γεωπολυμερούς σύστασης, τριάδες οι οποίες ενισχύθηκαν κατά τον ίδιο τρόπο. Τέλος, όπως φαίνεται από την κλίση των περιβαλλουσών της κάθε τριάδας ο ρυθμός μεταβολής του μέτρου διάτμησης είναι μικρότερος για τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης. Ακολουθούν τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης, έπειτα τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης και τέλος τα δοκίμια αναφοράς.

4.4 Σχολιασμός διατμητικών τάσεων των δοκιμίων

Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζονται μέσω γραφημάτων οι μέσοι όροι των τάσεων ρηγμάτωσης και αστοχίας της κάθε τριάδας δοκιμίων και ακολουθεί σχολιασμός τους ώστε να σχηματιστεί μια πιο ακριβής άποψη περί των συγκεκριμένων μεγεθών με αριθμητικά δεδομένα.

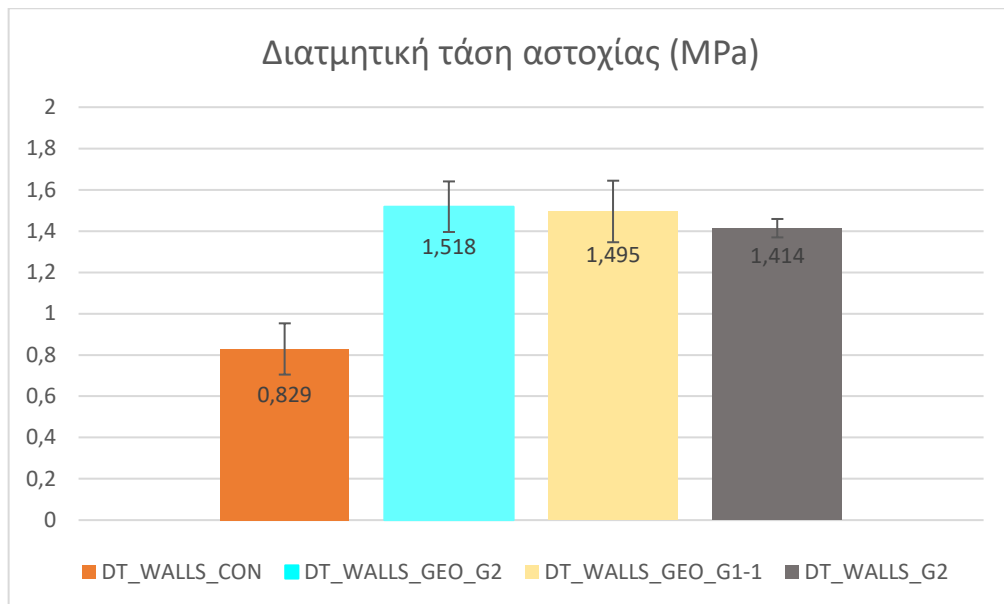


Σχήμα 4.15: Γράφημα τάσης ρηγμάτωσης των δοκιμίων

- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων ρηγμάτωσης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,109 MPa παρουσιάζοντας αύξηση κατά 65,77% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.

- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων ρηγμάτωσης των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,098 MPa παρουσιάζοντας αύξηση κατά 64,12% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων ρηγμάτωσης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,106 MPa παρουσιάζοντας αύξηση κατά 65,32% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων ρηγμάτωσης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης παρουσίασε αύξηση κατά 0,27% σε σχέση με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης και κατά 1% σε σχέση με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων ρηγμάτωσης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης παρουσίασε αύξηση κατά 0,7% σε σχέση με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.

Παρατηρείται πως οι μεγαλύτερες τιμές τάσεων ρηγμάτωσης παρουσιάζονται στα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης είναι γεωπολυμερούς σύστασης. Τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης ακολουθούν, με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης να είναι τα επόμενα. Οι αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών ενισχυμένων τριάδων μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, όπως φαίνεται και από τα νούμερα, γεγονός που καθιστά τους μέσους όρους τιμών των τάσεων ρηγμάτωσης της κάθε τριάδας πρακτικά ίσους. Οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται, όπως ήταν αναμενόμενο, στα δοκίμια αναφοράς.



Σχήμα 4.16: Γράφημα τάσης αστοχίας των δοκιμών

- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων αστοχίας των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,518 MPa παρουσιάζοντας αύξηση κατά 83,11% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων αστοχίας των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,495 MPa παρουσιάζοντας αύξηση κατά 80,33% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων αστοχίας των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,414 MPa παρουσιάζοντας αύξηση κατά 70,57% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων αστοχίας των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης παρουσίασε αύξηση κατά 7,35% σε σχέση με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης και κατά 1,54% σε σχέση με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.
- Ο μέσος όρος των τιμών τάσεων αστοχίας των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης παρουσίασε αύξηση κατά 5,73% σε σχέση με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης.

Παρατηρείται πως οι μεγαλύτερες τιμές τάσεων αστοχίας παρουσιάζονται στα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης είναι γεωπολυμερούς σύστασης. Τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης ακολουθούν, με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης να είναι τα επόμενα. Οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση, όπως ήταν αναμενόμενο, στα δοκίμια αναφοράς.

Προς την κατεύθυνση καλύτερης σύγκρισης των αποτελεσμάτων μαζί με τους μέσους όρους υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση της κάθε τριάδας, βάσει των οποίων υπολογίστηκε και το ποσοστό απόκλισης COV όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.3**.

Πίνακας 4.3: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV διατμητικών τάσεων

Τάση	Δοκίμια αναφοράς		Δοκίμια μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης		Δοκίμια αμφίπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης		Δοκίμια μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης	
	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας
Μέσος όρος	0,669	0,829	1,109	1,518	1,098	1,495	1,106	1,414
Τυπική απόκλιση	0,11	0,12	0,11	0,12	0,08	0,15	0,13	0,04
COV (%)	16,45	14,97	9,58	8,07	7,15	9,97	11,44	3,15

Συνοψίζοντας, οι τιμές των τάσεων ρηγμάτωσης των ενισχυμένων δοκιμίων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Όσον αφορά τις τιμές των τάσεων αστοχίας τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης ήταν γεωπολυμερούς σύστασης, παρουσίασαν καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης, με τις τιμές των μονόπλευρα ενισχυμένων να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες, κατά μέσο όρο, από αυτές των αμφίπλευρα ενισχυμένων.

4.5 Σχολιασμός μέτρου διάτμησης των δοκιμίων

Η κλίση του διαγράμματος διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης εκφράζει το μέτρο διάτμησης κάθε δοκιμίου. Με την παραδοχή ότι το διάγραμμα χωρίζεται σε δύο γραμμικά τμήματα, υπολογίζονται δύο τιμές για το μέτρο διάτμησης. Το πρώτο τμήμα (Α) εκφράζει το μέτρο διάτμησης μέχρι την εμφάνιση των πρώτων ρηγματώσεων. Το δεύτερο τμήμα (Β) εκφράζει το μέτρο διάτμησης από την εμφάνιση των ρηγματώσεων μέχρι την αστοχία του δοκιμίου,

ωστόσο τα συγκεκριμένα αποτελέσματα παρατίθενται μόνο για λόγους πληρότητας. Ο υπολογισμός των μέτρων διάτμησης πραγματοποιήθηκε μέσω της Εξ. (4.3).

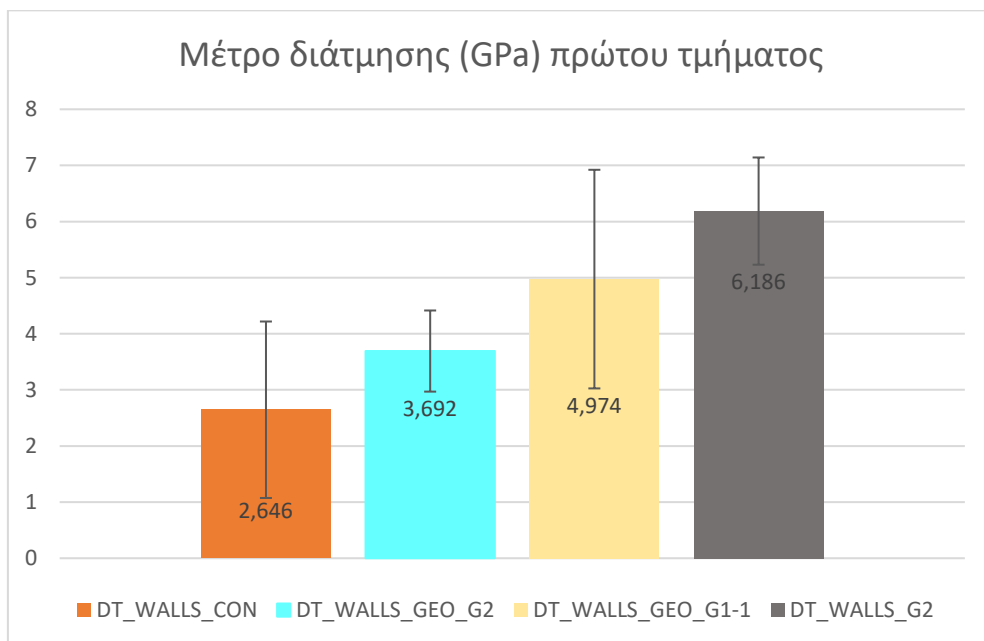
Στα Σχήματα 4.17 και 4.18 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων όρων των μέτρων διάτμησης για τις εξεταζόμενες τριάδες για το πρώτο και το δεύτερο τμήμα αντίστοιχα.

$$G = \frac{\tau}{\gamma \cdot 1000} \quad (4.3)$$

Όπου

τ : διατμητική τάση, σε MPa

γ : διατμητική παραμόρφωση

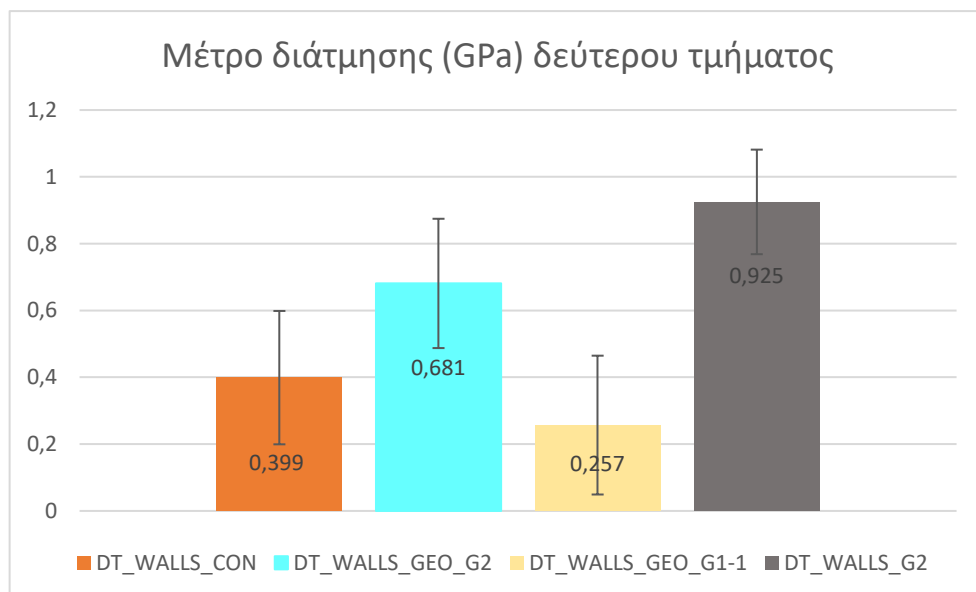


Σχήμα 4.17: Γράφημα μέτρων διάτμησης Α τμήματος των δοκιμών

- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 3,692 GPa παρουσιάζοντας αύξηση του κατά 39,53% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Το μέτρο διάτμησης των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 4,974 GPa παρουσιάζοντας αύξηση του κατά 87,98% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.

- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης υπολογίστηκε στα 6,186 GPa παρουσιάζοντας αύξηση του κατά 133,79% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης παρουσίασε αύξηση του κατά 24,37% σε σχέση με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια και κατά 67,55% σε σχέση με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.
- Το μέτρο διάτμησης των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης παρουσίασε αύξηση του κατά 34,72% σε σχέση με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης

Η αύξηση του μέτρου διάτμησης για τις περιπτώσεις των ενισχύσεων συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς είναι εμφανής. Οι μεγαλύτερες τιμές μέτρου διάτμησης, για το πρώτο τμήμα της καμπύλης τάσεων παραμόρφωσης, παρουσιάζονται στα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης είναι τσιμεντοειδούς σύστασης. Τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης ακολουθούν, με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης να είναι τα επόμενα.



Σχήμα 4.18: Γράφημα μέτρων διάτμησης 'B τμήματος των δοκιμίων

- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 0,681 GPa παρουσιάζοντας αύξηση του κατά 70,68% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Το μέτρο διάτμησης των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 0,257 GPa παρουσιάζοντας μείωση του κατά 55,25% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης υπολογίστηκε στα 0,925 GPa παρουσιάζοντας αύξηση του κατά 131,18% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης παρουσίασε αύξηση του κατά 259,92% σε σχέση με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια και κατά 35,83% σε σχέση με τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.
- Το μέτρο διάτμησης των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης παρουσίασε αύξηση του κατά 164,98% σε σχέση με τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.

Παρατηρήθηκε πως οι μεγαλύτερες τιμές μέτρου διάτμησης, και για το δεύτερο τμήμα της καμπύλης τάσεων παραμόρφωσης, παρουσιάζονται στα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης είναι τσιμεντοειδούς σύστασης. Τα μονόπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης ακολουθούν, με τα δοκίμια αναφοράς να είναι τα επόμενα και τα αμφίπλευρα ενισχυμένα δοκίμια σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης να είναι τα τελευταία. Ωστόσο η συγκεκριμένη σύγκριση πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά για λόγους πληρότητας, όπως προαναφέρθηκε, καθώς μόνο το μέτρο διάτμησης του Ά τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης έχει φυσικό νόημα.

Προς την κατεύθυνση καλύτερης σύγκρισης των αποτελεσμάτων μαζί με τους μέσους όρους υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση της κάθε τριάδας, βάσει των οποίων υπολογίστηκε και το ποσοστό απόκλισης COV όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.4**.

Πίνακας 4.4: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV μέτρων διάτμησης

Μέτρο διάτμησης	Δοκίμια αναφοράς		Δοκίμια μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης		Δοκίμια αμφίπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης		Δοκίμια μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης	
	Α Τμήμα	Β Τμήμα	Α Τμήμα	Β Τμήμα	Α Τμήμα	Β Τμήμα	Α Τμήμα	Β Τμήμα
Μέσος όρος	2,646	0,399	3,692	0,681	4,974	0,257	6,186	0,925
Τυπική απόκλιση	1,57	0,20	0,72	0,19	1,95	0,21	0,96	0,16
COV (%)	59,42	50,03	19,58	28,41	39,16	80,85	15,44	16,92

Συνοψίζοντας, οι τιμές των μέτρων διάτμησης των ενισχυμένων δοκιμίων, για το πρώτο τμήμα της καμπύλης παρουσιάζονται εμφανώς αυξημένες σε σχέση με αυτές των δοκιμίων αναφοράς. Κάτι τέτοιο φανερώνει τη δυνατότητα των ενισχύσεων να αναλαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές τάσεων για μικρότερες τιμές παραμορφώσεων, τουλάχιστον μέχρι τη στιγμή της ρηγμάτωσης. Από τη στιγμή της διαρροής των δοκιμίων μέχρι τη στιγμή της αστοχίας τους, όπως φάνηκε από τις παραπάνω συγκρίσεις τα μέτρα διάτμησης των ενισχυμένων δοκιμίων ήταν εξίσου μεγαλύτερα από αυτά των δοκιμίων αναφοράς εκτός από αυτό της αμφίπλευρης ενίσχυσης που φάνηκε να παρουσιάζουν μείωση του μέτρου διάτμησης τους. Ο σχολιασμός για το μέτρο διάτμησης του Β τμήματος παρατίθεται και σε αυτή την περίπτωση για λόγους πληρότητας και μόνο.

Και για τα δύο τμήματα της καμπύλης πάντως οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου διάτμησης παρουσιάστηκαν στα δοκίμια των οποίων η μήτρα ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης.

4.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων Β Σειράς Δοκιμών

4.6.1 Δοκίμιο αναφοράς

- OOPB_CON

Για τη συγκεκριμένη σειρά δοκιμών δεν υποβλήθηκε σε πειραματική δοκιμή κάποιο μη ενισχυμένο δοκίμιο. Ο λόγος είναι, όπως έχει παρατηρηθεί και από άλλες έρευνες, πως τα συγκεκριμένα δοκίμια έχουν μικρή αντοχή σε κάμψη, σε τέτοιο βαθμό που θα μπορούσαν να αστοχήσουν μέχρι και λόγω του ίδιου βάρους. Τα ευάλωτα σημεία σε αυτά τα δοκίμια είναι οι διεπιφάνειες μεταξύ του κονιάματος των αρμών και των οπτόπλινθων, με την αντοχή τους

να εκτιμάται από τη βιβλιογραφία μεταξύ 0,3 και 0,5 MPa. Έτσι, για τη μέση τιμή των 0,4 MPa και μέσω ανάλυσης διατομής η αντοχή σε κάμψη του ιδεατού δοκιμίου αναφοράς υπολογίστηκε στα 0,405 KN. Ο υπολογισμός έγινε εξισώνοντας τις εξισώσεις των ροπών ρηγμάτωσης και της μέγιστης ροπής αμφιέριστης δοκού, με την παραδοχή πως το δοκίμιο είναι ένα συνεχές σώμα. Οι παραπάνω εξισώσεις είναι οι **Εξς. (4.4-4.6)** αντίστοιχα. Η **Εξ. (4.5)** χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης του δοκιμίου.

$$M_{cr} = w * f_t \quad (4.4)$$

Όπου

f_t : Εφελκυστική αντοχή διεπιφάνειας, σε MPa

w: Ροπή αντίστασης του δοκιμίου, σε mm³

$$w = \frac{b * h^2}{6} \quad (4.5)$$

Όπου

b: Πλάτος δοκιμίου, σε mm

h: Πάχος δοκιμίου, σε mm

$$M_e = \frac{P * L}{4} \quad (4.6)$$

Όπου

P: Ασκούμενο φορτίο, σε N

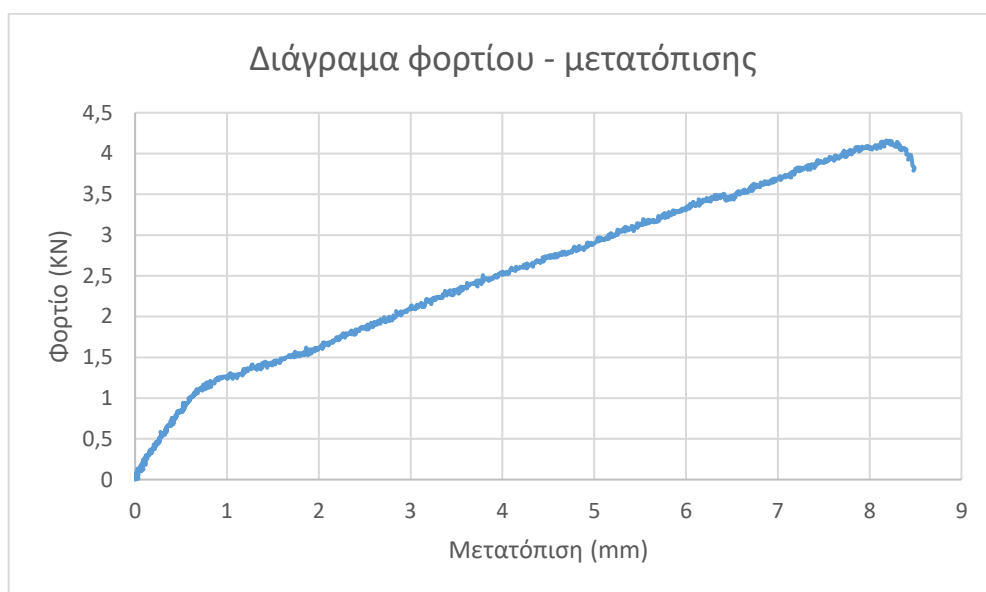
L: Μήκος δοκιμίου, σε mm

4.6.2 Δοκίμιο ενισχυμένο μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης

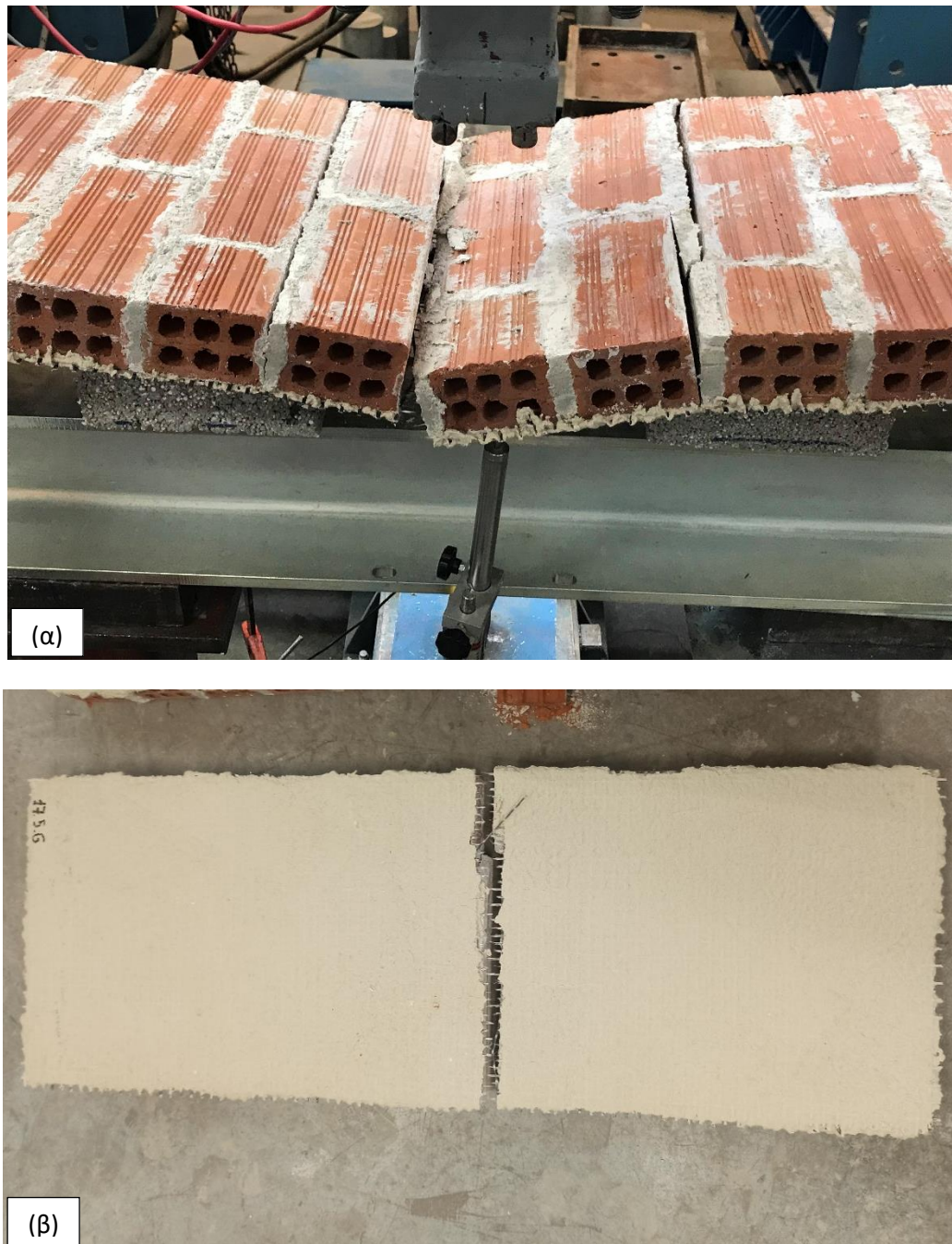
Το δοκίμιο που σχολιάζεται στην παρούσα υποενότητα ενισχύθηκε μονόπλευρα με δύο στρώσεις ινοπλέγματος υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης και υποβλήθηκε στις πειραματικές δοκιμές της 'B Σειράς Δοκιμών.

- **OOPB_GEO_G2**

Η στιγμή της διαρροής του δοκιμίου επήλθε όταν η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου έφτασε τα 1,13 kN με την μετατόπιση του εμβόλου να ισούται με 0,72 mm, με τη δυσκαμψία του δοκιμίου να μειώνεται. Αυτό φαίνεται από την αλλαγή κλίσης της ευθείας στο **Σχήμα 4.19**. Το μέγιστο φορτίο το οποίο έμελλε να είναι και το φορτίο αντοχής του ενισχυμένου δοκιμίου έναντι κάμψης ήταν 4,15 kN για μετατόπιση εμβόλου ίση με 8,21 mm. Οι πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο φάνηκαν τη στιγμή της αλλαγής της δυσκαμψίας αλλά δεν ήταν ευδιάκριτες. Πιο συγκεκριμένα σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή σχηματίστηκαν μικρές ρωγμές στην ενισχυμένη επιφάνεια και μερικές πιο μεγάλες μεταξύ του κονιάματος των αρμών και των οπτόπλινθων, κοντά στη θέση επιβολής του φορτίου. Το δοκίμιο τελικά αστόχησε μέσω διατμητικής ολίσθησης σε τρία σημεία μεταξύ της διεπιφάνειας των οπτόπλινθων και του κονιάματος των αρμών και ρήξης του πλέγματος ενίσχυσης με το δοκίμιο να χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο **Σχήμα 4.20** φαίνονται στιγμιότυπα από τη στιγμή της αστοχίας του δοκιμίου.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος



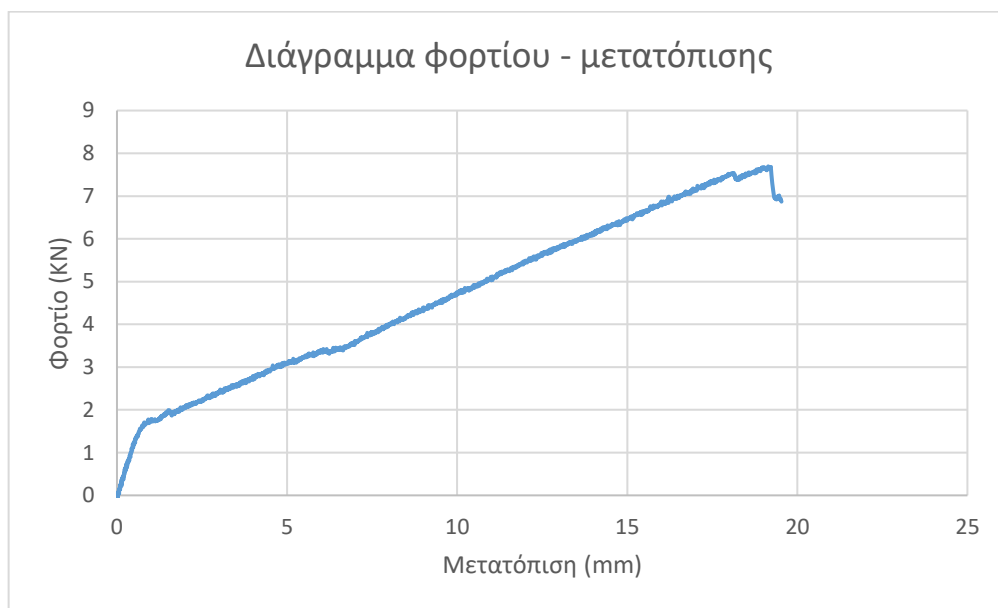
Σχήμα 4.20: Μορφή αστοχίας (α) άνω, (β) κάτω όψης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος

4.6.3 Δοκίμιο ενισχυμένο μονόπλευρα με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης

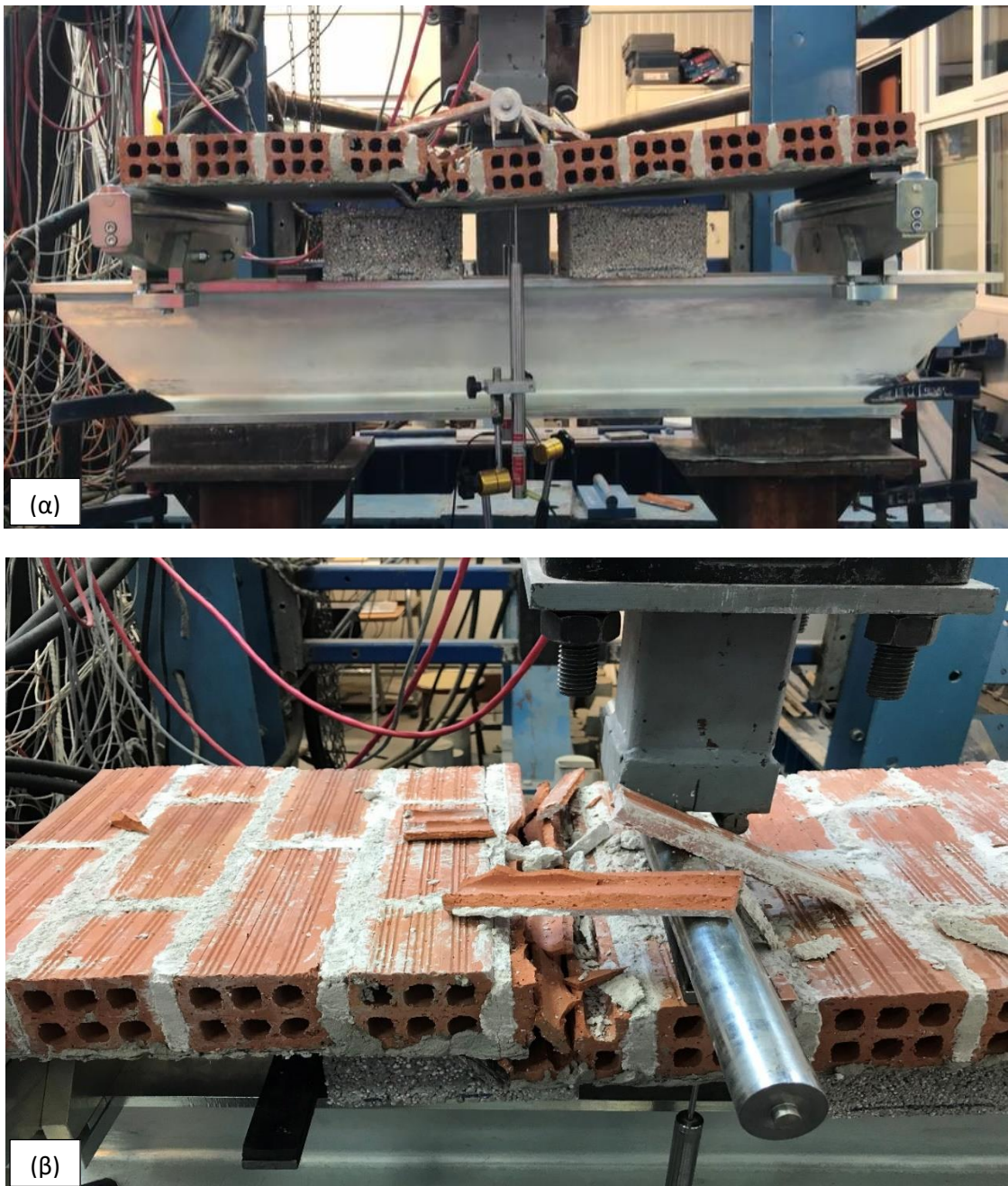
Το δοκίμιο που σχολιάζεται στην παρούσα υποενότητα ενισχύθηκε μονόπλευρα με δύο στρώσεις ινοπλέγματος υάλου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης και υποβλήθηκε στις πειραματικές δοκιμές της 'B Σειράς Δοκιμών.

- **OOPB_SIKA_G2**

Η στιγμή της διαρροής του δοκιμίου επήλθε όταν η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου έφτασε τα 1,73 kN με την μετατόπιση του εμβόλου να ισούται με 0,96 mm, με τη δυσκαμψία του δοκιμίου να μειώνεται. Αυτό φαίνεται από την αλλαγή κλίσης της ευθείας στο **Σχήμα 4.21**. Το μέγιστο φορτίο το οποίο έμελλε να είναι και το φορτίο αντοχής του ενισχυμένου δοκιμίου έναντι κάμψης ήταν 7,69 kN για μετατόπιση εμβόλου ίση με 19,14 mm. Οι πρώτες ρωγμές στο δοκίμιο φάνηκαν τη στιγμή της αλλαγής της δυσκαμψίας αλλά δεν ήταν ευδιάκριτες. Πιο συγκεκριμένα σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή σχηματίστηκαν μικρές ρωγμές στην ενισχυμένη επιφάνεια κοντά στη θέση επιβολής του φορτίου. Το δοκίμιο τελικά αστόχησε μέσω διατμητικής θραύσης οπτόπλινθων κατά μήκος της σειράς αποκόλλησης της ενίσχυσης στο ίδιο σημείο. Στο **Σχήμα 4.22** φαίνονται στιγμιότυπα από τη στιγμή της αστοχίας του δοκιμίου.



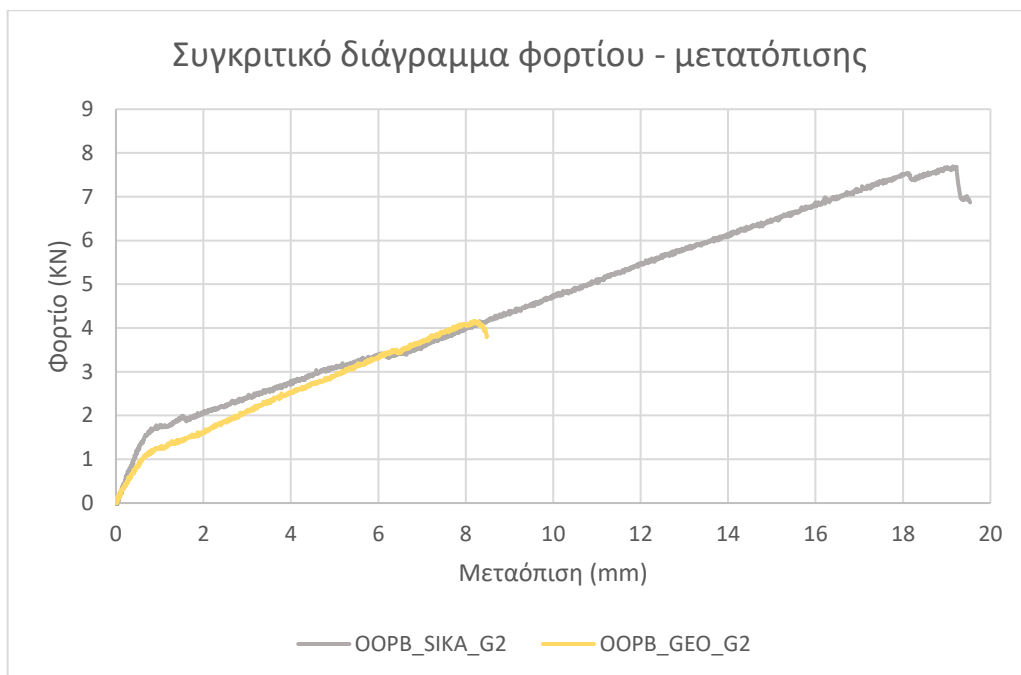
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος



Σχήμα 4.22: Μορφή αστοχίας (α) μπροστινής (β) άνω όψης ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος

4.7 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης των δοκιμών που προαναφέρθηκαν. Στόχος της σύγκρισης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή και την απόδοση της μήτρας ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε στην κάθε περίπτωση. Στο **Σχήμα 4.23** παρουσιάζεται το συγκεκριμένο διάγραμμα και ακολουθεί συνοπτικός σχολιασμός του.

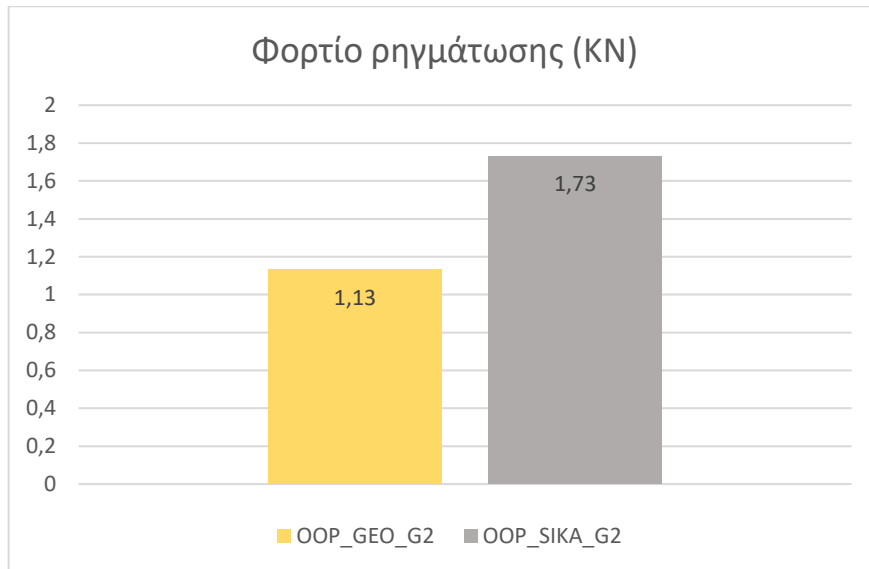


Σχήμα 4.23: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης δοκιμών υποβαλλόμενων σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το παραπάνω διάγραμμα η στιγμή που η δυσκαμψία μειώνεται πραγματοποιείται και στα δύο δοκίμια για σχεδόν ίσες τιμές μετακίνησης. Η ικανότητα παραλαβής φορτίου του δοκιμίου OOPB_SIKA_G2 είναι μεγαλύτερη εκείνη τη στιγμή από το OOPB_GEO_G2. Επίσης, όπως μπορεί να διαπιστωθεί γενικά το δοκίμιο OOPB_SIKA_G2 αστόχησε για τιμές φορτίου και μετακίνησης σχεδόν διπλάσιες από ότι το δοκίμιο OOPB_GEO_G2.

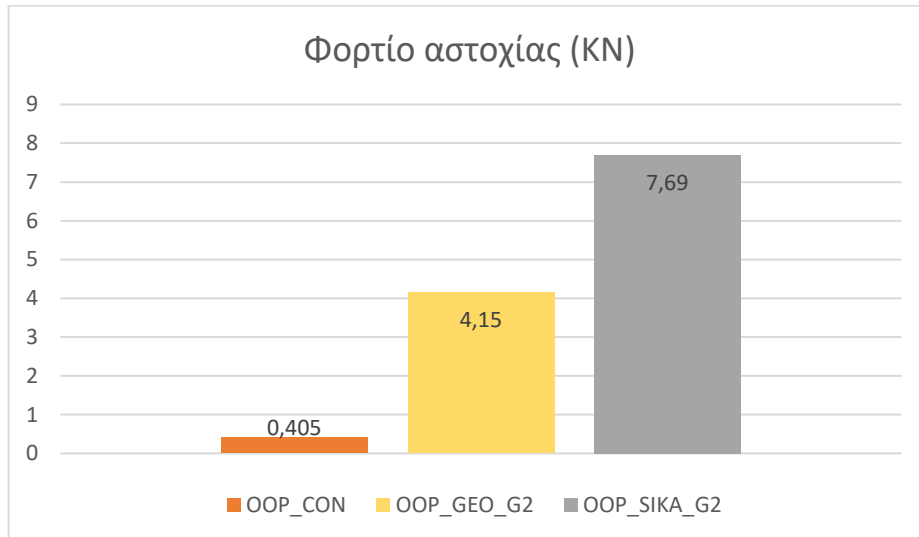
4.8 Σχολιασμός φορτίσεων των δοκιμών

Στα **Σχήματα 4.24** και **4.25** παρουσιάζονται μέσω γραφημάτων οι τιμές των φορτίων ρηγμάτωσης και αστοχίας αντίστοιχα των δοκιμών που υποβλήθηκαν στις δοκιμές και ακολουθεί σχολιασμός τους ώστε να σχηματιστεί μια πιο ακριβής άποψη περί των συγκεκριμένων μεγεθών με αριθμητικά δεδομένα. Τιμή σύγκρισης του φορτίου ρηγμάτωσης για το ιδεατό δοκίμιο αναφοράς δεν υπάρχει καθώς το φορτίο ρηγμάτωσης του είναι και το φορτίο αστοχίας του.



Σχήμα 4.24: Γράφημα φορτίου ρηγμάτωσης των δοκιμίων

- Το φορτίο ρηγμάτωσης του ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης υπολογίστηκε στα 1,73 KN παρουσιάζοντας αύξηση κατά 53,08% σε σχέση με το ενισχυμένο δοκίμιο σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.



Σχήμα 4.25: Γράφημα φορτίου αστοχίας των δοκιμίων

- Το φορτίο αστοχίας του ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης υπολογίστηκε στα 4,15 KN παρουσιάζοντας αύξηση της αντοχής του έναντι κάμψης κατά 924,69% σε σχέση με το ιδεατό δοκίμιο αναφοράς.

- Το φορτίο αστοχίας του ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης υπολογίστηκε στα 7,69 KN παρουσιάζοντας αύξηση της αντοχής του έναντι κάμψης κατά 1798,77% σε σχέση με το ιδεατό δοκίμιο αναφοράς.
- Το φορτίο αστοχίας του ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης παρουσίασε αύξηση της αντοχής του έναντι κάμψης κατά 85,30% σε σχέση με το ενισχυμένο δοκίμιο σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης.

Συνοψίζοντας, γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει μια πολύ μεγάλη αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκιμίων έναντι κάμψης σε σχέση με το μη ενισχυμένο-ιδεατό δοκίμιο. Το δοκίμιο του οποίου η μήτρα ενίσχυσης ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης εμφάνισε της μεγαλύτερες τιμές αντοχής για της περιπτώσεις ρηγμάτωσης και αστοχίας κάτι που θα μπορούσε να αποδοθεί στην καλύτερη συνάφεια της συγκεκριμένης μήτρας με το ινόπλεγμα υάλου. Βέβαια εξίσου σημαντική ήταν η αύξηση αντοχής του δοκιμίου του οποίου η μήτρα ήταν γεωπολυμερούς σύστασης.

Κεφάλαιο 5

5. Συμπεράσματα πειραματικής μελέτης και προτάσεις μελλοντικής έρευνας

5.1 Συμπεράσματα

Μέσω της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε εκτενέστερη έρευνα γύρω από τη συμπεριφορά των IAM στην ενίσχυση στοιχείων τοιχοποιίας. Το βασικό συμπέρασμα είναι πως η χρήση των IAM στον τομέα των ενισχύσεων οδηγεί σε βελτιστοποίηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας των στοιχείων τοιχοποιίας. Εκτός αυτού, η χρήση γεωπολυμερούς κονιάματος αντί τσιμεντοκονιάματος φάνηκε να προσδίδει ελπιδοφόρα αποτελέσματα, γεγονός που θα μπορούσε να στρέψει την επιστημονική κοινότητα ακόμα περισσότερο σε έρευνα του συγκεκριμένου υλικού ώστε να πραγματοποιηθεί χρήση του στον τομέα των ενισχύσεων. Τα επιμέρους συμπεράσματα που προέκυψαν, κατηγοριοποιημένα ανά τις σειρές δοκιμών που διενεργήθηκαν, αναφέρονται παρακάτω.

5.1.1 Συμπεράσματα Ά Σειράς Δοκιμών

- Η αστοχία των δοκιμών αναφοράς επήλθε σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά από τη στιγμή διαρροής τους. Ήταν απότομη, με έντονη μορφή, με τα τοιχοσώματα να χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα. Αιτία του φαινομένου μπορεί να θεωρηθεί η ψαθυρότητα των υλικών που απαρτίζουν τα τοιχοσώματα.
- Η αστοχία των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος ήταν πιο ελεγχόμενη και παραπλήσια και στα τρία δοκίμια της τριάδας, με ρηγματώσεις σε οπτόπλινθους και μεταξύ του κονιάματος των αρμών, αποκόλληση της ενίσχυσης, ενώ παρατηρήθηκε εκτός επιπέδου κύρτωση των δοκιμών. Οι τυπικές μορφές αστοχίας τους έμοιαζαν αρκετά με αυτές των μονόπλευρα ενισχυμένων δοκιμών σε μήτρα τσιμεντοκονιάματος με τη διαφορά ότι αυτά του γεωπολυμερούς κονιάματος δεν ανέπτυξαν ρωγμές στην ενισχυμένη πλευρά τους. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός πως το γεωπολυμερές κονίαμα φάνηκε ισχυρότερο από το τσιμεντοκονίαμα. Επίσης στα δοκίμια των οποίων η μήτρα ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση της

ενίσχυσης, διαφορά που θα μπορούσε να αποδοθεί στην καλύτερη συνάφεια που αναπτύσσει η μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης με το υλικό του ινοπλέγματος υάλου και του δοκιμίου τοιχοποιίας.

- Η αστοχία των αμφίπλευρα ενισχυμένων δοκιμίων σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος ήταν η πιο ελεγχόμενη συγκριτικά με τις εξεταζόμενες τριάδες και παραπλήσια και στα τρία δοκίμια της τριάδας, με ρηγματώσεις στις ενισχυμένες επιφάνειες, αποκόλληση της ενίσχυσης ενώ παρατηρήθηκε σμίκρυνση κατά την κατακόρυφη και διαπλάτυνση κατά την οριζόντια διεύθυνση του δοκιμίου. Η εμφάνιση ρηγματώσεων στις επιφάνειες της αμφίπλευρης ενίσχυσης, φαινόμενο που στην περίπτωση της μονόπλευρης δεν παρουσιάστηκε, μαρτύρα ενεργοποίηση της ενίσχυσης σε μεγαλύτερο βαθμό, γεγονός που απέδωσε στα συγκεκριμένα δοκίμια μεγαλύτερη ικανότητα παραμορφωσιμότητας.
- Τα μεγέθη ρηγμάτωσης και αστοχίας παρουσίασαν θεαματική αύξηση σε όλες τις περιπτώσεις των ενισχύσεων σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Οι τιμές των φορτίων και τάσεων ρηγμάτωσης και για τις τρεις περιπτώσεις ενισχύσεων ήταν πολύ κοντά. Οι τιμές των φορτίων και τάσεων αστοχίας για όλα τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης ήταν γεωπολυμερούς σύστασης ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης. Όπως φαίνεται το γεωπολυμερές κονίαμα παρουσιάζει καλύτερη κατανομή των φορτίων στις δοκιμές διαγώνιας θλίψης. Ωστόσο, η συμπεριφορά απόκρισης των δοκιμίων σε αυτές τις δοκιμές θεωρείται πιο αξιόπιστη μέχρι τη στιγμή της ρηγμάτωσης καθώς από εκεί και έπειτα εμφανίζονται φαινόμενα τοπικής περίσφιγξης στις μεταλλικές βάσεις που μπορούν να προκαλέσουν απρόβλεπτες και πρόωρες βλάβες.
- Η ικανότητα των ενισχυμένων τοιχοσωμάτων να αντιστέκονται σε διατμητικές παραμορφώσεις φάνηκε αρκετά βελτιωμένη σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, μέσω της αύξησης του μέτρου διάτμησης τους. Για το πρώτο τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ήταν γεωπολυμερούς σύστασης εμφάνισαν μέτρα διάτμησης κοντά μεταξύ τους, με αυτά της αμφίπλευρης να παρουσιάζουν το μεγαλύτερο σε σχέση με αυτά της μονόπλευρης ενίσχυσης. Ωστόσο, οι τιμές τους ήταν μικρότερες από αυτής των δοκιμίων των οποίων η μήτρα ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης. Για το δεύτερο τμήμα της καμπύλης, τα δοκίμια των οποίων η μήτρα ενίσχυσης ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης εμφάνισαν επίσης

μεγαλύτερο μέτρο διάτμησης με τα μονόπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς να ακολουθούν, και τα αμφίπλευρα ενισχυμένα σε μήτρα γεωπολυμερούς να εμφανίζουν τις μικρότερες, ακόμα και από τα δοκίμια αναφοράς. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε κονίαμα αρμών μικρότερης αντοχής για τη συγκεκριμένη τριάδα δοκιμών.

5.1.2 Συμπεράσματα ΈΒ Σειράς Δοκιμών

- Τα φορτία ρηγμάτωσης και αστοχίας του ιδεατού δοκιμίου είναι πρακτικά ίσα λόγω της έλλειψης ικανότητας ενός μη ενισχυμένου δοκιμίου έναντι κάμψης να παραλάβει επιπλέον φορτία μετά τη στιγμή της διαρροής του.
- Η αστοχία του μονόπλευρα ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης ήταν απότομη. Αστόχησε μέσω διατμητικής ολίσθησης μεταξύ της διεπιφάνειας των οπτόπλινθων και του κονιάματος των αρμών, ρήξη του πλέγματος ενίσχυσης και εν τέλει διαχωρισμό του δοκιμίου σε δύο τμήματα. Η μορφή αστοχίας έδειξε να ελέγχεται από το τοιχώσωμα σε αυτή την περίπτωση.
- Η αστοχία του μονόπλευρα ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης ήταν πιο ελεγχόμενη. Αστόχησε μέσω διατμητικής θραύσης οπτόπλινθων και αποκόλληση της ενίσχυσης. Η μορφή αστοχίας έδειξε να ελέγχεται από την ενίσχυση σε αυτή την περίπτωση.
- Τα φορτία αστοχίας των ενισχυμένων δοκιμών παρουσιάστηκαν θεαματικά αυξημένα σε σχέση με το ιδεατό - μη ενισχυμένο δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα, το φορτίο αστοχίας του ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης παρουσιάστηκε κοντά στις 10 φορές μεγαλύτερο ενώ το φορτίο αστοχίας του ενισχυμένου δοκιμίου σε μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης κοντά στις 19 φορές μεγαλύτερο. Η εξίσου μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο ενισχύσεων θα μπορούσε να αποδοθεί στην καλύτερη συνάφεια της τσιμεντοειδούς μήτρας με το τοιχώσωμα και το ινόπλεγμα υάλου σε αντίθεση με αυτή της γεωπολυμερούς σύστασης που φαίνεται πτωχότερη. Φαίνεται πως το κονίαμα γεωπολυμερούς δεν παρουσιάζει χημική συμβατότητα με το υλικό επικάλυψης του ινοπλέγματος υάλου.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από τη συγκεκριμένη μελέτη προέκυψαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα σχετικά με τη χρήση γεωπολυμερών κονιαμάτων στον τομέα των ενισχύσεων με IAM. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να αναπτυχθεί πάνω στα εξής:

- Εφαρμογή ενισχύσεων IAM με διαφορετικούς τύπους ινοπλεγμάτων (άνθρακας, αραμίδιο κλπ.) σε μήτρα γεωπολυμερούς κονιάματος.
- Εφαρμογή του συνδυασμού ενίσχυσης ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς με παραμέτρους διερεύνησης διαφορετικές διαστάσεις βρόγχων, τοιχοσωμάτων, οπτόπλινθων και διαφορετικό πάχος αρμών.
- Μονόπλευρη ενίσχυση τοιχοσωμάτων με ινόπλεγμα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς, παρουσία μόνωσης υποβαλλόμενων σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης.
- Αμφίπλευρη ενίσχυση τοιχοσωμάτων με ινοπλέγματα υάλου σε μήτρα γεωπολυμερούς, υποβαλλόμενων σε δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης.
- Περαιτέρω διερεύνηση των μηχανισμών παραλαβής φορτίων από τα γεωπολυμερή κονιάματα ως μήτρα ενίσχυσης, καθώς δείχνουν μια διαφορετική συμπεριφορά απόκρισης στις δοκιμές διαγώνιας θλίψης από ότι στις δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης.

Βιβλιογραφία

➤ Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Κούτας, Λάμπρος (2015, Πανεπιστήμιο Πατρών), " Νέες τεχνικές και υλικά για την ενίσχυση πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εμφανιζόμενης τοιχοποιίας: πειραματική και αναλυτική μελέτη.

ΚΑΝ.ΕΠΕ. – Κανονισμός επεμβάσεων (2013), Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας.

Μηλιώτη, Χατζίκος (2022) "Ενίσχυση τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα: πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης τοιχωμάτων." Διπλωματική εργασία, Βόλος: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

➤ Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Akin, E., Ozcebe, G., & Ersoy, U. (2009). Strengthening of brick infilled reinforced concrete (RC) frames with carbon fiber reinforced polymers (CFRP) sheets. In *Seismic risk assessment and retrofitting* (pp. 367-386). Springer, Dordrecht.

Almusallam, T. H., & Al-Salloum, Y. A. (2007). Behavior of FRP strengthened infill walls under in-plane seismic loading. *Journal of Composites for Construction*, 11(3), 308-318.

Al-Salloum, Y. A., Siddiqui, N. A., Elsanadedy, H. M., Abadel, A.A., and Aqel, M. A. (2011). "Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints." *J. Comp. Constr.*, 15(6), 920-933.

Altin, S., Anil, Ö., Kara, M. E., & Kaya, M. (2008). An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips. *Composites Part B: Engineering*, 39(4), 680-693.

ASTM (2019) "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages". E 519 – 02, United States." *Astm* 1–5.

Babaeidarabad, S., Caso, F., and Nanni, A. (2014). "Out-of-Plane Behavior of URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite." *J. Compos. Constr.*, 18(4), 04013057

Bournas, D., Lontou, P., Papanicolaou, C. G. and Triantafillou, T. C. (2007). "Textilereinforced mortar (TRM) versus FRP confinement in reinforced concrete columns." *ACI Struct. J.*, 104(6), 740-748.

- Bournas, D., Triantafillou, T. C., Zygouris, K., and Stavropoulos, F. (2009). "Textile reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars." *J. Comp. Constr.*, 13(5), 360–371.
- Bruckner, A., Ortlepp, R., and Curbach, M. (2006). "Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear." *Mater. Struct.*, 39, 741-748.
- D' Ambrici, A., and Focacci, F. (2011). "Flexural strengthening of RC beams with cement based composites." *J. Comp. Constr.*, 15(1), 707-720
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., and Al-Salloum, Y. A. (2013). "Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study." *Comp. Struct.*, 97, 40-55.
- El-Dakhkhni, Wael W., Ahmad A. Hamid, and Mohamed Elgaaly (2004). "Strength and Stiffness Prediction of Masonry Infill Panels." 13th World Conference on Earthquake Engineering. University Centre for Effective Design of Structures, Hamilton (Paper No. 3089).
- El-Dakhkhni Wael W. , Ahmad A. Hamid² and Mohamed Elgaaly (2016). "STRENGTH AND STIFFNESS PREDICTION OF MASONRY INFILL PANELS" 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 (Paper No. 3089).
- EN 1996-1-1: Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures
- Erol, G., Karadogan, H. F., & Cili, F. (2008, October). Seismic strengthening of infilled RC frames by CFRP. In *Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 12-17).
- Fardis, M. N., and Panagiotakos, T. B. (1997). "Seismic design and response of bare and infilled reinforced concrete buildings – Part II: Infilled structures." *J. Earthquake Eng.*, 1(3), 473-503.
- Fardis, M. N. (2000). "Design provisions for masonry-infilled RC frames." *Proc.12th World Conf. Earthq. Engrg.*, Auckland, New Zeland.
- Fardis, M. N. (2009) "Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings: based on EN-Eurocode 8." 1st ed., Springer, Netherlands.
- Garmendia, L., Marcos, I., Garbin, E., & Valluzzi, M. R. (2014). Strengthening of masonry arches with Textile-Reinforced Mortar: experimental behaviour and analytical approaches. *Materials and structures*, 47(12), 2067-2080.

- Garcia-Ramonda, Larisa, Luca Pela, Pere Roca, and Guido Camata (2020). "In-Plane Shear Behaviour by Diagonal Compression Testing of Brick Masonry Walls Strengthened with Basalt and Steel Textile Reinforced Mortars." *Construction and Building Materials*. 240:117905. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117905.
- Gkournelos, P. D., Bournas, D. A., & Triantafyllou, T. C. (2019). Combined seismic and energy upgrading of existing reinforced concrete buildings using TRM jacketing and thermal insulation. *Earthq. Struct*, 16(5), 625-639.
- Gkournelos, P., Triantafyllou, T., & Azdejkovic, L. (2021, November). Innovative and eco-friendly solutions for the seismic retrofitting of natural stone masonry walls with textile reinforced mortar (TRM): in-and out of-plane behavior. American Society of Civil Engineers.
- Gulinelli, Pietro, Alessandra Aprile, Raffaella Rizzoni, Yves Henri Grunevald, Frederic Lebon, Roberto Lovisetto, and Sergio Tralli (2019). "A FE Model for TRM Reinforced Masonry Walls with Interface Effects." *Trans Tech Publications Ltd.*, Vol. 817, 57–64 in *Key Engineering Materials*.
- Gulinelli, Pietro, Alessandra Aprile, Raffaella Rizzoni, Yves Henri Grunevald, and Frederic Lebon (2020). "Multiscale Numerical Analysis of Trm-Reinforced Masonry under Diagonal Compression Tests." *Buildings* 10(11), 1–20. doi: 10.3390/buildings10110196.
- Harajli, M., ElKhatib, H., & San-Jose, J. T. (2010). Static and cyclic out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. *Journal of materials in civil engineering*, 22(11), 1171-1180.
- Koutas, L., Bousias, S. N., & Triantafyllou, T. C. (2014). Seismic strengthening of masonry-infilled RC frames with TRM: Experimental study. *Journal of Composites for Construction*, 19(2).
- Koutas, L. (2015). New techniques and materials for the seismic retrofitting of RC frames through infilled masonry: Experimental and Analytical Study (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Civil Engineering Department, University of Patras, Patras, Greece (in Greek). <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/8443>).
- Koutas, L., Triantafyllou, T. C., & Bousias, S. N. (2015). Analytical modeling of masonry infilled RC frames retrofitted with textile-reinforced mortar. *Journal of Composites for Construction*, 19(5), 04014082.
- Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafyllou, T. C. (2019). Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.
- 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.

- Koutromanos, I., Kyriakides, M., Stavridis, A., Billington, S., & Shing, P. B. (2013). Shake-table tests of a 3-story masonry-infilled RC frame retrofitted with composite materials. *Journal of Structural Engineering*, 139(8), 1340-1351.
- Longo, F., Cascardi, A., Lassandro, P., & Aiello, M. A. (2021). Energy and seismic drawbacks of masonry: A unified retrofitting solution. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), 1-24.
- Loreto, G., Leardini, L., Arboleda, D., and Nanni, A. (2014). "Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites." *J. Compos. Constr.*, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000415.
- Maras, M. M., & Kose, M. M. (2021). Structural behavior of masonry panels strengthened using geopolymer composites in compression tests. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(2), 767-777.
- Mehrabi, A. B., Shing P. B., Schuller, M. P., and Noland, J. L. (1996). "Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames." *J. Struct. Eng.*, 122(3), 228-237.
- Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., ... & Manfredi, G. (2013). Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1667-1676.
- Ombres, L. (2014). Concrete confinement with a cement based high strength composite material. *Composite Structures*, 109, 294-304.
- Ombres, L. (2015). "Confinement effectiveness in eccentrically loaded masonry columns strengthened by fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) jackets." *Key Eng. Mater.*, 624, 551-558.
- Ortlepp, R., Lorenz, A., & Curbach, M. (2009). Column strengthening with TRC: influences of the column geometry onto the confinement effect. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2009.
- Papakonstantinou, C., & Katakalos, K. (2009). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with a hybrid inorganic matrix-Steel fiber retrofit system. *Structural engineering & mechanics*. 31(5). 567-585. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.5.567>
- Provis, J., & van Deventer, J. (2009). Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications. In J. Provis & J. van Deventer, *Introduction to geopolymers* (1st ed., pp. 1-14). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Karlos, K., and Papatthanasiou, M. (2007). "Textilereinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane

- Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papathanasiou, M., and Karlos, K. (2008). "Textilereinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading." *Mater. Struct.*, 41(1), 143-157
- Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papantoniou, I., and Balioukos, C. (2009). "Strengthening of two-way slabs with textile reinforced mortars (TRM)." *Proc. 11th fib Symposium, London, UK.*
- Papanicolaou, C., Triantafillou, T., & Lekka, M. (2011). Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials*, 25(2), 504-514.
- Parisi, F., Iovinella, A., Balsamo, A., Augenti, N., and Prota, A. (2013). "In-plane behavior of tuff masonry strengthened with inorganic matrix-grid composites." *Compos: Part B*, 45(1), 1657-1666.
- Pohoryles, D. A., & Bournas, D. A. (2020). Seismic retrofit of infilled RC frames with textile reinforced mortars: State-of-the-art review and analytical modelling. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107702.
- Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G., and Aldea, C. (2006). "Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites." *J. Compos. Constr.*, 10(3), 223-233.
- RILEM LUMB6 (1991), "Diagonal tensile strength tests of small wall specimens". TC76-LUM.
- Saatcioglu, M., Serrato, F., & Foo, S. (2005). Seismic performance of masonry infill walls retrofitted with CFRP sheets. *Special Publication*, 230, 341-354.
- Shen, X., Chen, W., Li, B., Hancock, C. M., & Xu, Y. (2021). Flexural strengthening of reinforced concrete beams using fabric reinforced alkali-activated slag matrix. *Journal of Building Engineering*, 33, 101865.
- Triantafillou, T. C., and Papanicolaou, C. G. (2005). "Textile reinforced mortars (TRM) versus fiber reinforced polymers (FRP) as strengthening materials of concrete structures." SP- 230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Paper 20, 341-354, Shield C., Busel J., Walkup S., Gremel D., (eds.), American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., and Laourdekis, T. (2006). "Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets." *ACI Struct. J.*, 103(1), 28-37.
- Triantafillou, T. C., and Papanicolaou, C. G. (2006). "Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets." *Mater. Struct.*, 39(1), 93-103

➤ **Ιστοσελίδες**

<https://www.lhlogismiki.gr/nea/nea-programmaton/nea-statikon-fespa-5-6-0-6>