



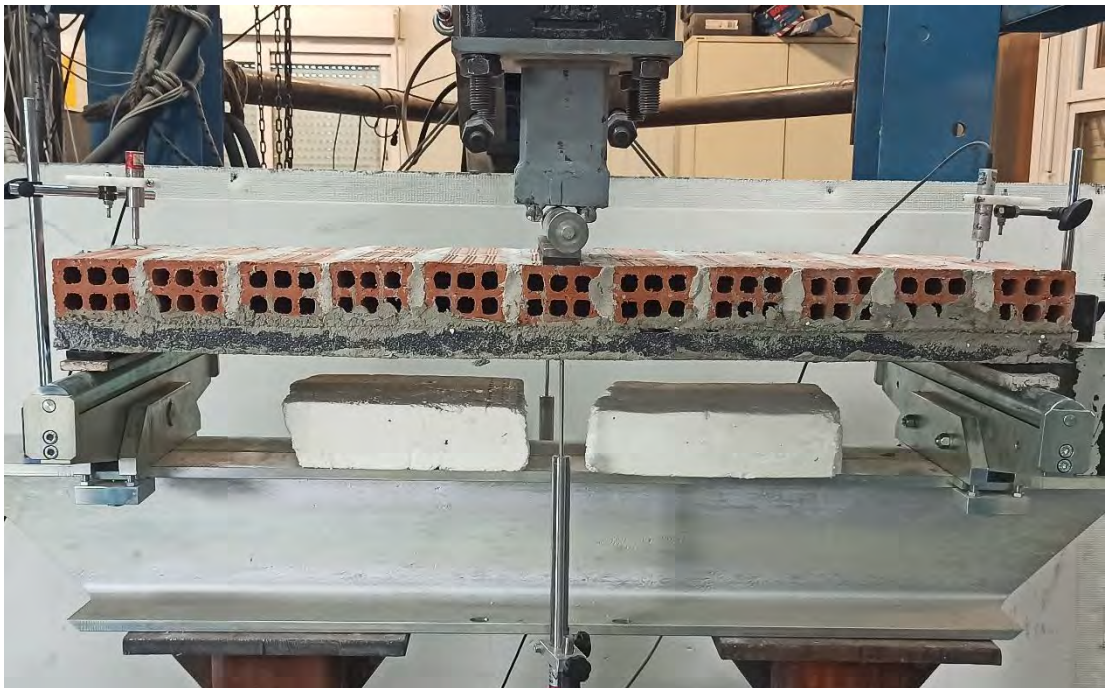
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΕΚΤΟΣ-ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΜΟΝΩΜΕΝΩΝ  
ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ**

**ΜΟΥΤΣΙΝΑ ΙΩΑΝΝΑ**

**ΧΛΙΒΕΡΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**



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

**ΒΟΛΟΣ 2023**

© 2023 Μουτσινά Ιωάννα

© 2023 Χλιβερός Γεώργιος

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. Μυστακίδης Ευριπίδης

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους επιβλέποντες της διπλωματικής μας εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Κούτα Λάμπρο και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, για την πολύτιμη βοήθειά τους, την καθοδήγηση και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Οφείλουμε ευχαριστίες στον κ. Κουτσελίνη Αλέκο, μέλος ΕΤΕΠ, για την πολύτιμη βοήθεια και χειρωνακτική εργασία που προσέφερε, τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Szymon Cholostiakow, για την καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και την υποψήφια διδάκτωρ Ιωάννα Σκυριανού, για την συνεισφορά των γνώσεων της. Ευχαριστούμε όλους τους φίλους μας για την υποστήριξη της προσπάθειάς μας. Πάνω απ' όλα είμαστε ευγνώμων στις οικογένειές μας, στις οποίες και αφιερώνουμε αυτή την εργασία, στους γονείς μας Σπυρίδων Χλιβερό και Ουρανία Ραντιστή, Δημήτριο Μουτσινά και Ευδοκία Αγιώτη και στα αδέρφια μας Φάνη και Γαρυφαλλιά, Έμμου και Γιώργο, για την υποστήριξη και κατανόησή τους όλα αυτά τα χρόνια που σπουδάσαμε.

Μουτσινά Ιωάννα  
Χλιβερός Γεώργιος

# ΕΚΤΟΣ-ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Μουτσινά Ιωάννα

Χλιβερός Γεώργιος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων:

Δρ. Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Συνεπιβλέπων:

Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ.

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματική εργασίας είναι η διερεύνηση της εκτός επιπέδου συμπεριφοράς θερμικά μονωμένων και ενισχυμένων τοιχοσωμάτων και της εκτός επιπέδου απόκρισης τοιχοπλήρωσης, εμφανιζόμενης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν υλικά νέας γενιάς, τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM), εστιάζοντας στην αποδοτικότητα του υλικού της μήτρας (κονιάματα τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερικής σύστασης), των ινοπλεγμάτων (βασάλτη και υάλου) και της παρουσίας ή μη θερμομονωτικού υλικού. Στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος αναπτύχθηκε ένα κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και εφαρμόστηκαν ενισχύσεις δώδεκα τοιχοσωμάτων. Επιπρόσθετα, κατασκευάστηκε τοιχοπληρωμένο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος και υποβλήθηκε σε εκτός επιπέδου φόρτιση η εμφανιζόμενη τοιχοπλήρωση. Αρχικά γίνεται μία παρουσίαση του σύνθετου υλικού IAM και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι έως τώρα εφαρμογές στο πεδίο ενισχύσεων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας και τοιχοπληρωμένων πλαισίων. Έπειτα περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής και ενίσχυσης των δοκιμίων και παρουσιάζονται τα υλικά και η πειραματική διάταξη. Ακολουθεί η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων στο πλαίσιο της σύγκρισης των διαφορετικών συστημάτων ενίσχυσης. Συνολικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ενίσχυση των τοιχοσωμάτων με τα υλικά IAM αύξησε σημαντικά την αντοχή τους σε κάμψη.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Σύνθετα υλικά, τοιχοπλήρωση, θερμομόνωση, γεωπολυμερές, σεισμική ενίσχυση*

# OUT-OF-PLANE EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF THERMALLY INSULATED INFILL WALLS REINFORCED WITH INORGANIC COMPOSITE MATERIALS OF INORGANIC MATRIX

Moutsina Ioanna  
Chliveros Georgios

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor:

Dr. Koutas Lampros, Assistant Professor at University of Thessaly

Co-supervisor:

Dr. Papakonstantinou Christos, Associate Professor at University of Thessaly

## Abstract

The subject of this thesis is the investigation of the out-of-plane behavior of thermally insulated reinforced walls and the out-of-plane response of infill wall embedded in a reinforced concrete frame. In particular, new generation materials were applied, Textile Reinforced Mortar (TRM), focusing on the efficiency of the matrix material (cement and geopolymer mortar), the fiber meshes (basalt and glass) and the presence or absence of heat insulating material. In the Laboratory of Reinforced Concrete Technology and Constructions, a mortar composed of geopolymer was developed and reinforcement applications of twelve walls took place. In addition, an infilled reinforced concrete frame was constructed and the infill wall was subjected to out-of-plane loading. First, a presentation of the TRM composite material is made, and then the so far applications in the field of reinforcement of reinforced concrete constructions, masonry and infilled frames are presented. Then, the process of constructing and strengthening of the specimens is described in detail and the materials and the experimental setup are presented. At the end, the presentation and commentary of the results follows, in the context of the comparison of the different reinforcement systems. Overall, the conclusion that is drawn is that the reinforcement of the walls significantly increased their flexural resistance.

**Keywords:** Composite materials, infill walls, thermal insulation, geopolymer, seismic reinforcement



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>17</b>
1.1	Η ανάγκη ενίσχυσης τοιχοπληρώσεων.....	17
1.2	Η ανάγκη χρήσης των σύνθετων υλικών IAM .....	18
1.3	Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	19
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....</b>	<b>20</b>
2.1	Ενισχύσεις κατασκευών με IAM.....	20
2.1.1	Γενικά για τα IAM.....	22
2.1.2	Πεδίο εφαρμογών IAM στις ενισχύσεις κατασκευών.....	26
2.1.2.1	Ενίσχυση σε κάμψη.....	27
2.1.2.2	Ενίσχυση σε διάτμηση.....	32
2.1.2.3	Ενίσχυση σε περισφιγξη.....	33
2.1.2.4	Ενίσχυση τοιχοποιίας σε εντός-εκτός επιπέδου φόρτιση.....	36
2.1.2.5	Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ.....	40
2.1.2.6	Εντός επιπέδου ενίσχυση.....	41
2.1.2.7	Εκτός επιπέδου ενίσχυση.....	46
2.1.2.8	Επιρροή της εντός επιπέδου βλάβης στην εκτός (ή το ανάποδο).....	49
2.1.3	IAM με μήτρα γεωπολυμερους.....	54
2.2	Συνδυασμένη σεισμική-ενεργειακή αναβάθμιση.....	58
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Πειραματικό Πρόγραμμα.....</b>	<b>63</b>
3.1	Εισαγωγή.....	63
3.2	Δοκιμές εκτός επιπέδου κάμψης τοιχίσκων.....	63
3.2.1	Παράμετροι υπό διερεύνηση και παρουσίαση δοκιμών.....	64
3.2.2	Υλικά.....	65
3.2.3	Διαδικασία ενίσχυσης.....	70
3.2.4	Πειραματική διάταξη.....	74
3.3	Εκτός επιπέδου κάμψη τοιχοπλήρωσης εμφανιζόμενης σε πλαίσιο ΟΣ.....	76
3.3.1	Γεωμετρία.....	76
3.3.2	Υλικά.....	78
3.3.3	Διαδικασία κατασκευής.....	80
3.3.4	Πειραματική διάταξη.....	83
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός.....</b>	<b>86</b>



4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων των τοιχοσωμάτων .....	86
4.1.1 Ομάδα δοκιμών " OOP_WALL_GEO-B2, OOP_WALL_GEO-G2, OOP_WALL_CEM-B2, OOP_WALL_CEM-G2 " .....	89
4.1.2 Ομάδα δοκιμών "OOP_WALL_GEO-B-I2, OOP_WALL_GEO-G-I2, OOP_WALL_CEM-B-I2, OOP_WALL_CEM-G-I2 " .....	95
4.1.3 Ομάδα δοκιμών "OOP_WALL_GEO-B-1I1, OOP_WALL_GEO-G-1I1, OOP_WALL_CEM-B-1I1, OOP_WALL_CEM-G-1I1" .....	100
4.2 Σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των τοιχοσωμάτων.....	106
4.2.1 Δοκίμια με τσιμεντοειδές κονίαμα και πλέγμα βασάλτη "OOP_WALL_CEM-B" ...	106
4.2.2 Δοκίμια με τσιμεντοειδές κονίαμα και υαλόπλεγμα "OOP_WALL_CEM-G" .....	108
4.2.3 Δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και πλέγμα βασάλτη "OOP_WALL_GEO-B" .....	110
4.2.4 Δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και υαλόπλεγμα "OOP_WALL_GEO-G" .....	112
4.2.5 Δοκίμια με κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης "OOP_WALL_CEM" .....	114
4.2.6 Δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης "OOP_WALL_GEO" .....	115
4.2.7 Σύγκριση θερμικά μονωμένων δοκιμίων.....	116
4.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων του τοιχοπληρωμένου πλαισίου.....	118
<b>Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και συμπεράσματα .....</b>	<b>123</b>
5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα.....	123
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>126</b>

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 2.1:</b> Σύγκριση «ΙΑΜ» και «ΙΟΠ».....	25
<b>Πίνακας 3.1:</b> Ονοματολογία δοκιμών και μορφές ενίσχυσης.....	65
<b>Πίνακας 3.2:</b> Μηχανικές ιδιότητες οπτόπλινθων και κονιάματος.....	66
<b>Πίνακας 3.3:</b> Αναλογίες ανάμειξης τσιμεντοειδούς κονιάματος.....	67
<b>Πίνακας 3.4:</b> Αναλογίες ανάμειξης κονιάματος γεωπολυμερικής σύστασης.....	67
<b>Πίνακας 3.5:</b> Εφελκυστική αντοχή από κάμψη και θλιπτική αντοχή τσιμεντοειδούς κονιάματος.....	68
<b>Πίνακας 3.6:</b> Εφελκυστική αντοχή από κάμψη και θλιπτική αντοχή κονιάματος γεωπολυμερικής σύστασης.....	68
<b>Πίνακας 3.7:</b> Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος βάσης, πλαισίου και τσιμεντοκονιάματος.....	80
<b>Πίνακας 4.1:</b> Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων όλων των δοκιμών.....	87

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 2.1:</b> Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (Koutas et al., 2015).....	20
<b>Σχήμα 2.2:</b> Επικόλληση υφασμάτων με συγκολλητικό υλικό την ρητίνη, για την ενίσχυση δομικών στοιχείων.....	23
<b>Σχήμα 2.3:</b> Υφάσματα ενίσχυσης για: (α) ΙΟΠ; (β) ΙΑΜ.....	24
<b>Σχήμα 2.4:</b> Ινοπλέγματα που επικολλώνται με ανόργανη μήτρα: (α) βασάλτης; (β) γυαλί; (γ) άνθρακας; (δ) πολυβενζοξαζόλη ή «PBO».....	24
<b>Σχήμα 2.5:</b> Ενίσχυση τοιχίσκου με εμπότιση υαλοπλέγματος σε τσιμεντοκονίαμα.....	26
<b>Σχήμα 2.6:</b> Τρόπος εφαρμογής ενίσχυσης στην επιφάνεια των πλακών (διαστάσεις σε mm) (Koutas & Bournas, 2017).....	28
<b>Σχήμα 2.7:</b> Γεωμετρία και λεπτομέρειες όπλισης της υπό ενίσχυσης δοκού ΟΣ (Koutas & Parakonstantinou, 2021).....	30
<b>Σχήμα 2.8:</b> Απεικόνιση του συνδυασμού των ενισχύσεων (διαστάσεις σε mm) (Koutas & Parakonstantinou, 2021).....	30
<b>Σχήμα 2.9:</b> Τοποθέτηση του υφάσματος: (α) συμβατικά; (β) σπειροειδώς (Triantafillou & Paranicolaou, 2006).....	32
<b>Σχήμα 2.10:</b> Ενίσχυση τοιχίσκων με TRM: (α) έναρξη ρηγμάτωσης κατά μήκος της θλιπτικής διαγωνίου; (β) ολική αστοχία υλικού και αποκόλληση (Yardim & Lalaj, 2016).....	37
<b>Σχήμα 2.11:</b> Τοιχίσκος υπό κάμψη τριών σημείων σε αστοχία (Kariou et al., 2018).....	39
<b>Σχήμα 2.12:</b> Καμπύλες φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος (Kariou et al., 2018)...	39
<b>Σχήμα 2.13:</b> Τοιχοπληρωμένο πλαίσιο ΟΣ που υπόκειται σε εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση.....	41
<b>Σχήμα 2.14:</b> Γεωμετρία του γυμνού πλαισίου ΟΣ: (α) εμπρός όψη; (β) πλάγια όψη και (γ) προοπτική άποψη (Koutas et al., 2015).....	42
<b>Σχήμα 2.15:</b> Διάταξη και διαστάσεις ενίσχυσης (Koutas et al., 2015).....	42
<b>Σχήμα 2.16:</b> Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (Abdel-Hafez et al., 2015).....	44

<b>Σχήμα 2.17:</b> Βρόγχοι υστέρησης φορτίου-μετατόπισης, (Akhoundi et al., 2018).....	45
<b>Σχήμα 2.18:</b> Οι διαφορετικοί τρόποι ενίσχυσης των τεσσάρων δοκιμών και η κατεύθυνση φόρτισης τους (Koutas & Bournas, 2019).....	47
<b>Σχήμα 2.19:</b> Εκτός επιπέδου απόκριση των τοιχοπληρωμένων πλαισίων για έκκεντρη φόρτιση σε σχέση με τη μετατόπιση (Koutas & Bournas, 2019).....	47
<b>Σχήμα 2.20:</b> Τοποθετήσεις υφάσματος: α) απευθείας και β) «sandwich» (Sagar et al., 2019).....	50
<b>Σχήμα 2.21:</b> Υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν: α) σε όλη την επιφάνεια και β) στις άκρες (Sagar et al., 2019).....	51
<b>Σχήμα 2.22:</b> Ενίσχυση με IAM ενός εκ των πέντε δοκιμών (Sagar et al., 2019).....	51
<b>Σχήμα 2.23:</b> Οι διαστάσεις και οι λεπτομέρειες του πλαισίου ΟΣ (τα μήκη σε m; οι διάμετροι των οπλισμών σε mm) (De Risi et al., 2022).....	53
<b>Σχήμα 2.24:</b> Γεωμετρία και τρόποι ενίσχυσης δοκιμών: (α) κάθετη και (β) διαγώνια δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Maras & Kose, 2021).....	56
<b>Σχήμα 2.25:</b> Γεωμετρία δοκιμών (Gkournelos et al., 2022).....	57
<b>Σχήμα 2.26:</b> Πλέγμα από ίνες: (α) λιναριού και (β) βασάλτη (Gkournelos et al., 2022).....	58
<b>Σχήμα 2.27:</b> Προτεινόμενη τοποθέτηση συνδυασμού μονωτικού υλικού με TRM (Triantafyllou et al., 2017).....	60
<b>Σχήμα 2.28:</b> Συνδυασμός IAM και θερμομόνωσης (Pohoryles et al., 2020).....	61
<b>Σχήμα 3.1:</b> Απεικόνιση τοιχοσωμάτων: α) κάτοψη; β) πλάγια όψη, διαστάσεις σε mm.....	65
<b>Σχήμα 3.2:</b> Διαστάσεις διάτρητου οπτόπλινθου έξι οπών.....	66
<b>Σχήμα 3.3:</b> Ανάμειξη κονιάματος γεωπολυμερικής σύστασης.....	67
<b>Σχήμα 3.4:</b> Μηχανικές ιδιότητες ινοπλεγμάτων υάλου και βασάλτη.....	69
<b>Σχήμα 3.5:</b> Γεωμετρία και ιδιότητες διογκωμένης πολυστερίνης.....	69
<b>Σχήμα 3.6:</b> Απεικόνιση διαστρωμάτωσης υλικών (απουσία θερμομόνωσης).....	70

<b>Σχήμα 3.7:</b> Απεικόνιση διαστρωμάτωσης υλικών (2 στρώσεις μετά τη θερμομόνωση).....	71
<b>Σχήμα 3.8:</b> Διαδικασία ενίσχυσης: (α) Πρώτη στρώση κονιάματος; (β) τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού; (γ) ενσωμάτωση πλέγματος στο κονιάμα; (δ) τελευταία στρώση κονιάματος.....	72
<b>Σχήμα 3.9:</b> Απεικόνιση διαστρωμάτωσης υλικών (στρώσεις εκατέρωθεν της θερμομόνωσης).....	73
<b>Σχήμα 3.10:</b> Τοιχόσωμα σε μονοτονική κάμψη τριών σημείων.....	75
<b>Σχήμα 3.11:</b> Λεπτομέρειες στήριξης τοιχοσώματος και επαφής με το έμβολο: (α) αριστερή στήριξη; (β) μέσω ανοίγματος; (γ) δεξιά στήριξη.....	75
<b>Σχήμα 3.12:</b> Η γεωμετρία του πλαισίου και οι λεπτομέρειες οπλισμού: α) το οπλισμένο πλαίσιο; β) οι διαστάσεις των συνδετήρων που χρησιμοποιήθηκαν.....	78
<b>Σχήμα 3.13:</b> Μονοαξονική θλίψη κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος.....	79
<b>Σχήμα 3.14:</b> Ηλεκτρικός επιτραπέζιος τροχός νερού.....	79
<b>Σχήμα 3.15:</b> Κατασκευή βάσεων: α) το καλούπι της βάσης με τοποθετημένο οπλισμό; β) σκυροδετημένες βάσεις.....	81
<b>Σχήμα 3.16:</b> Κατασκευή πλαισίων: α) τοποθέτηση οπλισμού εντός των καλουπιών; β) σκυροδέτηση πλαισίου.....	82
<b>Σχήμα 3.17:</b> Τοιχοπληρωμένο πλαίσιο (FRAME_1).....	83
<b>Σχήμα 3.18:</b> Μεταλλική κυρτή επιφάνεια επιβολής φορτίου: α) πλάγια όψη; β) κάτοψη.....	84
<b>Σχήμα 3.19:</b> Η πειραματική διάταξη για τη φόρτιση του (FRAME_1): α) πρόσοψη; β) πλάγια όψη.....	84
<b>Σχήμα 3.20:</b> LVDT's στην πίσω όψη του πλαισίου.....	85
<b>Σχήμα 4.1:</b> Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος, των δοκιμίων "OOP_WALL_W-X".....	90
<b>Σχήμα 4.2:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_W-X".....	91

<b>Σχήμα 4.3:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-B2"	92
<b>Σχήμα 4.4:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-G2"	92
<b>Σχήμα 4.5:</b> Θραύση ινών του υαλοπλέγματος του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-G2"	93
<b>Σχήμα 4.6:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-B2"	94
<b>Σχήμα 4.7:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-G2"	94
<b>Σχήμα 4.8:</b> Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος, των δοκιμίων "OOP_WALL_W-X-I2"	96
<b>Σχήμα 4.9:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_W-X-I2"	97
<b>Σχήμα 4.10:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-B-I2"	98
<b>Σχήμα 4.11:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-B-I2"	98
<b>Σχήμα 4.12:</b> Καμπτική ρηγμάτωση του "OOP_WALL_GEO-G-I2"	99
<b>Σχήμα 4.13:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-B-I2"	99
<b>Σχήμα 4.14:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-G-I2"	100
<b>Σχήμα 4.15:</b> Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος, των δοκιμίων "OOP_WALL_W-X-1I1"	101
<b>Σχήμα 4.16:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_W-X-1I1"	102
<b>Σχήμα 4.17:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-B-1I1"	103
<b>Σχήμα 4.18:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-G-1I1"	103
<b>Σχήμα 4.19:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_GEO-G-1I1"	104
<b>Σχήμα 4.20:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-B-1I1"	104
<b>Σχήμα 4.21:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-G-1I1"	105
<b>Σχήμα 4.22:</b> Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP_WALL_CEM-G-1I1"	105

<b>Σχήμα 4.23:</b> Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμίων "OOP_WALL_CEM-B".....	107
<b>Σχήμα 4.24:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_CEM-B".....	108
<b>Σχήμα 4.25:</b> Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμίων "OOP_WALL_CEM-G".....	109
<b>Σχήμα 4.26:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_CEM-G".....	110
<b>Σχήμα 4.27:</b> Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμίων "OOP_WALL_GEO-B".....	111
<b>Σχήμα 4.28:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_GEO-B".....	112
<b>Σχήμα 4.29:</b> Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμίων "OOP_WALL_GEO-G".....	113
<b>Σχήμα 4.30:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_GEO-G".....	114
<b>Σχήμα 4.31:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_CEM".....	115
<b>Σχήμα 4.32:</b> Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP_WALL_GEO".....	116
<b>Σχήμα 4.33:</b> Συγκριτικό ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων με διάταξη θερμομόνωσης I2 και I1.....	117
<b>Σχήμα 4.34:</b> Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης στο κέντρο της τοιχοπλήρωσης του δοκιμίου "IF_REF_OOP_ND".....	118
<b>Σχήμα 4.35:</b> Ανάπτυξη ρωγμών στην τοιχοπλήρωση: (α) πρώτη οριζόντια ρηγματώση; (β) διαγώνια κλιμάκωση ρηγματώσης.....	120
<b>Σχήμα 4.36:</b> Παραμορφωμένη εικόνα τοιχοπλήρωσης: (α) πλάγια όψη; (β) πίσω όψη.....	121
<b>Σχήμα 4.37:</b> Τελική εικόνα της ρηγματωμένης τοιχοπλήρωσης.....	122

*Αφιερωμένη στις οικογένειές μας...*



## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### 1.1 Η ανάγκη ενίσχυσης τοιχοπληρώσεων

Με την πάροδο των χρόνων, καθίσταται ολοένα και πιο αναγκαία η αντισεισμική ενίσχυση και η ενεργειακή αναβάθμιση των υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ). Αίτια όπως η γήρανση των υλικών, οι απαιτήσεις δόμησης των νέων κανονισμών ο παλαιός, μη επαρκής πλέον αντισεισμικός σχεδιασμός και η φθορά λόγω έκθεσης σε καιρικές συνθήκες και έλλειψης συντήρησης, χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης και αποτελούν τους κυριότερους λόγους δομικής και ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτιρίου.

Ο σχεδιασμός κτιρίων στη χώρας μας με βάση σύγχρονες αντιλήψεις περί αντισεισμικού σχεδιασμού ξεκίνησε σχεδόν 35 χρόνια πριν. Μέχρι τότε, οι κατασκευές σχεδιάζονταν κυρίως για τα κατακόρυφα φορτία λαμβάνοντας πολύ μειωμένα οριζόντια σεισμικά φορτία. Συνέπειες αυτού αποτελούν ο ανεπαρκής οπλισμός του φέροντος οργανισμού, η έλλειψη πλαστιμότητας και λεπτομερειών όπλισης στα κρίσιμα σημεία των στοιχείων, όπως άκρα υποστυλωμάτων και κόμβους και η παρουσία εκκεντρότητας του κέντρου μάζας ως προς το κέντρο δυσκαμψίας σε κάτοψη (Koutas et al., 2015). Ως εκ τούτου ο φέρων οργανισμός σημαντικού αριθμού κτιρίων στην Ελλάδα είναι ευάλωτος στις σεισμικές δράσεις με αποτέλεσμα την προβληματική και πιθανότατα μη ασφαλή απόκριση του στις σεισμικές καταπονήσεις.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις των πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν πολύ σημαντικά στοιχεία στη σεισμική συμπεριφορά των κτιρίων. Δεδομένου ότι μία σεισμική δράση καταπονεί το σύνολο του κτιρίου, και συνεπώς όλα τα επιμέρους δομικά και μη στοιχεία του, γίνεται αντιληπτό ότι οι εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις των πλαισίων δέχονται και αυτές σεισμικές δυνάμεις. Παρατηρήθηκε ότι αναπτύσσουν σημαντικές βλάβες που μπορεί να γίνουν ακόμη και αιτία κατάρρευσης ενός κτιρίου. Μάλιστα, έχουν και σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο, καθώς το αντίκτυπο των

τοιχοπληρώσεων στα κόστη των μετασεισμικών επισκευών ενός κτιρίου υπολογίζεται ότι είναι περίπου το 50% του συνολικού κόστους επισκευής (De Risi et al., 2020).

Γεγονός αποτελεί ακόμη ότι στον σχεδιασμό ενός κτιρίου οπλισμένου σκυροδέματος στην Ελλάδα μέχρι πριν δύο δεκαετίες δεν λαμβάνονταν καθόλου υπόψη η ενεργειακή κλάση του κτιρίου και η επαρκής μόνωση του από τις καιρικές συνθήκες. Δεδομένου ότι τα περισσότερα κτίρια είναι κατασκευασμένα χωρίς μόνωση στα στοιχεία του κελύφους τους, όπως εξωτερικές τοιχοπληρώσεις και δώματα, τα καθιστά ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες και μη συμβατά στις σημερινές ενεργειακές απαιτήσεις. Απαραίτητη είναι λοιπόν η ενεργειακή αναβάθμιση των υφιστάμενων κατασκευών, έτσι ώστε να γίνουν φιλικές προς το περιβάλλον και να ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις βιώσιμης δόμησης.

Σε πολλές περιπτώσεις κτιρίων, η ανάγκη τόσο μίας αντισεισμικής ενίσχυσης όσο και μίας ενεργειακής αναβάθμισης θέτει το ζήτημα του συνδυασμού των δύο παραπάνω τεχνικών. Η ταυτόχρονη εφαρμογή δύο διαφορετικών τεχνικών με απώτερο στόχο την συνδυασμένη βέλτιστη απόδοση τους και το κατά δύναμιν χαμηλότερο κόστος, αποτελεί άλλη μία «πρόκληση» των σύγχρονων απαιτήσεων δόμησης. Συνεπώς γίνεται αντιληπτή η σημαντικότητα της σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης μιας κατασκευής, μέσω τεχνικών και μεθόδων εφαρμογής που αποσκοπούν στον βέλτιστο και οικονομικότερο συνδυασμό τους.

## **1.2 Η ανάγκη χρήσης των σύνθετων υλικών IAM**

Τα σύνθετα υλικά IAM (Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα), αποτελούνται από δύο επιμέρους υλικά, τη μήτρα την οποία απαρτίζει το κονίαμα και το πλέγμα ινών το οποίο “επικολλάται” στο κονίαμα. Οι έρευνες για την ενίσχυση με μανδύες IAM ξεκίνησαν με βραδείς ρυθμούς γύρω στη δεκαετία του 80 και μέχρι τα τέλη του 90 συνεχίζονταν με τον ίδιο τρόπο (Elsanadedy et al., 2019). Οι πρώτες έρευνες επικεντρώνονταν στην μικροδομή της συνάφειας μεταξύ του σύνθετου υλικού και της ανόργανης μήτρας με τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος (Kouris & Triantafyllou, 2018). Η εφαρμογή τους σε στοιχεία ΟΣ νέων κατασκευών και η παράλληλη συνεχής επιστημονική έρευνα πήρε ανοδική πορεία από το 2002 κι έπειτα. Παρά το σύντομο χρονικό διάστημα της εφαρμογής τους, σχεδόν είκοσι χρόνια, αξιοσημείωτα είναι τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους σε υφιστάμενες και νέες κατασκευές με το ενδιαφέρον για αυτά να τα καθιστά όλο και πιο προσιτά στο εμπόριο. Η εξειδικευμένη γνώση που υπάρχει έως τώρα γύρω από τα IAM

θεωρείται επαρκής, ωστόσο σίγουρα υπάρχουν περιθώρια εξέλιξης της, γεγονός που πραγματοποιείται μέσω πειραματικών εφαρμογών και σύγκρισης των προαναφερθέντων με υλικά παρόμοιων ιδιοτήτων όπως είναι τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) ή σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία Fiber Reinforced Plastic ή Polymer (FRP).

Η ανάγκη χρήσης των σύνθετων υλικών ΙΑΜ σε ενισχύσεις κατασκευών ΟΣ και όχι μόνο, έγκειται στην πληθώρα των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Τα πλεονεκτήματα αυτά τα οποία παρουσιάζονται στην ενότητα 2.1.1 καθιστούν τα ΙΑΜ μία καλή επιλογή σε εφαρμογές ενίσχυσης. Επίσης το γεγονός ότι εφαρμόζονται τόσο σε υφιστάμενες κατασκευές που χρήζουν ενίσχυσης, όσο και σε νέες κατασκευές (περισσότερη έμφαση δίνεται στην ενότητα 2.1) διευρύνει το πεδίο της εφαρμογής τους και τα καθιστά ολοένα και πιο δημοφιλή στην κατασκευαστική βιομηχανία.

### **1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας**

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αποδοτικότητας της ενίσχυσης τοιχοσωμάτων με ΙΑΜ, σε συνδυασμό με θερμομόνωση, σε εκτός επιπέδου φόρτιση. Τα τοιχοσώματα αποτελούν τμήμα τοιχοπληρώσεων εμφανιζόμενων σε πλαίσια ΟΣ. Στα πλαίσια μίας μεγαλύτερης έρευνας που διεξάγεται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, γίνεται η προσπάθεια σύνδεσης των αποτελεσμάτων από μικρούς τοχίσκους με αποτελέσματα τοιχοπληρωμένων πλαισίων. Ωστόσο, για την παρούσα διπλωματική εργασία δοκιμάστηκαν πειραματικά δώδεκα τοιχοσώματα ενισχυμένα με ινοπλέγματα βασάλτη ή υάλου εμβαπτισμένα είτε σε εμπορικά διαθέσιμο τσιμεντοκονίαμα είτε σε, κονίαμα γεωπολυμερούς το οποίο αναπτύχθηκε στο εργαστήριο. Σε ορισμένα δοκίμια, η παραπάνω δομική ενίσχυση ήταν συνδυασμένη με σύστημα ενεργειακής αναβάθμισης αποτελούμενο από διογκωμένη πολυστερίνη. Οι παράμετροι υπό διερεύνηση ήταν το υλικό του κονιάματος, το είδος του ινοπλέγματος, η παρουσία ή όχι θερμομονωτικού υλικού και το σύστημα ενίσχυσης, με σκοπό να σχολιαστούν και να συγκριθούν τα μεταξύ τους αποτελέσματα. Τέλος, δοκιμάστηκε σε εκτός-επιπέδου κάμψη και ένα τοιχοπληρωμένο πλαίσιο ΟΣ χωρίς ενίσχυση σε κλίμακα 1:2.5.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Ενισχύσεις κατασκευών με ανόργανη μήτρα (IAM)

Μια σχετικά νέα τεχνική ενίσχυσης κατασκευών ΟΣ φέρει την ονομασία «Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα» ή ως συντομογραφία «IAM», στη διεθνή βιβλιογραφία είναι γνωστά ως «Textile-Reinforced Mortar» ή «TRM» καθώς και με τις ονομασίες «Fiber Reinforced Cementitious Matrix» (FRCM) και «Textile Reinforced Concrete» (TRC). Πρόκειται για τον συνδυασμό δύο επιμέρους υλικών, ενός πλέγματος ινών υψηλής αντοχής (π.χ. άνθρακας, γυαλί, βασάλτης) και ενός κονιάματος ανόργανης σύστασης (συνήθως τσιμεντοκονιάματος) (Σχήμα 2.1). Τα προαναφερθέντα απαρτίζουν το σύνθετο υλικό IAM και επικολλώνται εξωτερικά των στοιχείων του κτιρίου που χρήζουν ενίσχυση (Koutas et al., 2015).



Σχήμα 2.1: Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα, (Koutas et al., 2015).

Τα Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα IAM άρχισαν να μελετώνται και να χρησιμοποιούνται ως τεχνική ενίσχυσης περίπου δύο δεκαετίες πριν. Μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε νέες κατασκευές είτε ως υλικό ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές (Koutas et al., 2015). Οι πρώτες εφαρμογές ενισχύσεων IAM πραγματοποιήθηκαν σε στοιχεία σκυροδέματος, ενώ ανερχόμενο είναι πλέον τον ενδιαφέρον για ενισχύσεις σε τυπικά ή ιστορικά κτίρια φέρουσας τοιχοποιίας καθώς και αντισεισμικές ενισχύσεις τοιχοπληρωμένων πλαισίων.

Όσον αφορά τις νέες κατασκευές, η χρήση τους συνδέεται με την ευμενή τους επίδραση στο περιβάλλον και τη συμβολή τους στην αειφορία των κατασκευών. Το παραπάνω πηγάζει από το γεγονός ότι με τη χρήση των IAM στα φέροντα μέλη μιας κατασκευής, προκύπτουν λεπτότερα πάχη διατομών και κατά συνέπεια λιγότερη απαίτηση ποσότητας σκυροδέματος που παρασκευάζεται από τσιμέντο τύπου Portland. Δεδομένης της υψηλής ρύπανσης που προκαλεί η παρασκευή του τσιμέντου τύπου Portland και της ιδιαίτερα αυξημένης ενεργειακής απαίτησης, η μείωση της χρήσης του συνδέεται άμεσα με την μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση μικρότερων διατομών σκυροδέματος, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με υλικά εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων, όπως τα IAM, είναι ωφέλιμη στο περιβάλλον. Συστηματικές έρευνες γύρω από αυτό γίνονται σε δύο ερευνητικά κέντρα στην Γερμανία, το 532 στο RWTH Aachen University και στο 528 στο Dresden University of Technology, στα οποία το υλικό φέρει την ονομασία «Textile Reinforced Concrete» (TRC) (Koutas et al., 2015).

Η χρήση των IAM ως υλικά ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Συγκριτικά με τη χρήση συμβατικών υλικών και τεχνικών, η χρήση των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα προσφέρει πλεονεκτήματα όπως τη ταχύτητα και την ευκολία εφαρμογής, τη μείωση της ποσότητας τσιμέντου, τη διατήρηση της γεωμετρίας της κατασκευής, τον υψηλό λόγο της εφελκυστικής αντοχής ως προς το βάρος, την ανθεκτικότητα σε διάβρωση και διάρκεια. Ακόμη, είναι ιδιαίτερως κατάλληλα για εφαρμογή σε ιστορικά κτίρια αρχιτεκτονικής σημασίας. Το κονίαμα που χρησιμοποιείται, το οποίο έχει ως βάση την άσβεστο, είναι συμβατό με κάποια σημαντικά κριτήρια διατήρησης, όπως φυσική/χημική συμβατότητα με το υπόστρωμα εφαρμογής, ικανότητα διαπνοής και αναστρεψιμότητα (De Santis et al., 2019b). Τέλος, σε σύγκριση με τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ), τα οποία αποτελούν τα συγγενή υλικά ενίσχυσης στα IAM όσον αφορά τις ιδιότητες τους, παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, με τα σημαντικότερα να σχετίζονται με την απουσία της ρητίνης (Koutas et al., 2015). Περισσότερη έμφαση στα ΙΟΠ και στη σύγκρισή τους με τα IAM θα δοθεί στην ενότητα 2.1.1.

Πέραν της ανάγκης αντισεισμικής ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών, σημαντική είναι και η ανάγκη ενεργειακής αναβάθμισης. Δεδομένης της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης των παλιών κτιρίων και του σημαντικού περιβαλλοντικού αντίκτυπου που αυτή συνεπάγεται, αναγκαία γίνεται η εύρεση αποτελεσματικών λύσεων για την ενεργειακή αναβάθμιση του κελύφους των υφιστάμενων κτιρίων. Συνδυάζοντας τις

βέλτιστες ιδιότητες των δύο τεχνικών, όπως, τη δυνατότητα ανάληψης υψηλού φορτίου των IAM και την θερμική μόνωση μιας εξωτερικής θερμοπρόσοψης, προκύπτει μία νέα ενιαία τεχνική ενίσχυσης που απευθύνεται στις ανάγκες των υφιστάμενων κτιρίων και προσφέρει ταυτόχρονα τόσο αντισεισμική κάλυψη όσο και ενεργειακή αναβάθμιση. Αυτό επιτυγχάνεται με το «πάντρεμα» του IAM και του υλικού της θερμομόνωσης σε ένα ενιαίο σύσσωμο υλικό που μπορεί να εφαρμοστεί στην επί τόπου διαδικασία ενίσχυσης (Triantafyllou et al., 2017). Η συνδυασμένη σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση θα αναλυθούν στην ενότητα 2.2 του παρόντος κεφαλαίου.

### **2.1.1 Γενικά για τα IAM**

#### «IAM» vs «ΙΟΠ»

Η πρώτη γενιά σύνθετων υλικών ενίσχυσης, που συνδυάζουν υφάσματα και συγκολλητικό υλικό (Σχήμα 2.2) είναι τα ΙΟΠ. Τα ΙΟΠ χρησιμοποιούνται από το 1970, ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες έγιναν πιο δημοφιλή, ειδικότερα στην ενίσχυση δομικών στοιχείων. Τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πολλά κοινά στοιχεία με τα IAM, αυτός είναι και ο λόγος που συχνά αναφέρονται σε αυτά τα δύο ως τα «δίδυμα αδέρφια». Η κύρια διαφορά τους έγκειται στο ότι τα ΙΟΠ, σε αντίθεση με τα IAM, για την επικόλληση των υφασμάτων (συνήθως γυαλιού, άνθρακα και αραμιδίου), στο στοιχείο που χρήζει ενίσχυση, χρησιμοποιούνται οργανικές ρητίνες (εποξειδικές, βινυλεστερικές ή πολυεστερικές ρητίνες) και όχι κονιάματα ανόργανης μήτρας (Elsanadedy et al., 2019) . Οι διαφορές όμως δεν σταματάνε εδώ, κάνοντας έτσι την επιλογή των ειδικών για το ποια μέθοδο θα χρησιμοποιήσουν πιο εύκολη, με αυτή συνήθως να είναι η ενίσχυση με τα Ινοπλισμένα πολυμερή σε Ανόργανη Μήτρα.

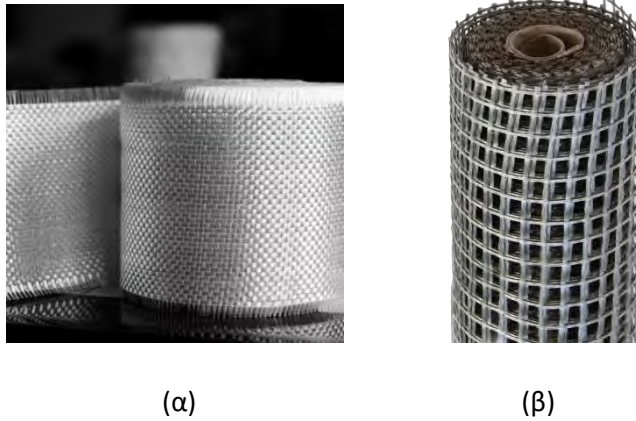


**Σχήμα 2.2:** Επικόλληση υφασμάτων με συγκολλητικό υλικό την ρητίνη, για την ενίσχυση δομικών στοιχείων.

Πολλά είναι τα πλεονεκτήματα των IAM σε σχέση με τα ΙΟΠ, ωστόσο τα δεύτερα εισήλθαν πρώτα στον χώρο ως μέσο αντισεισμικής ενίσχυσης, υφιστάμενων κατασκευών. Η όλο ένα και αυξανόμενη ζήτηση τους οφειλόταν στις ξεχωριστές ιδιότητες τους όπως είναι i) η μεγάλη τους αντοχή σε σχέση με το λιγιστό βάρος τους, ii) η αντοχή τους στη διάβρωση, iii) η ευκολία και η ταχύτητα στην εφαρμογή τους και τέλος iv) η γρήγορη και εύκολη αλλαγή στη γεωμετρία τους (Τ. Triantafyllou, 2011). Παρόλα αυτά η τεχνική της ενίσχυσης με τα ΙΟΠ φέρει και μειονεκτήματα τα οποία ενδεχομένως και υπό συνθήκες να καθιστούν την μέθοδο αυτή ως μη προτιμητέα.

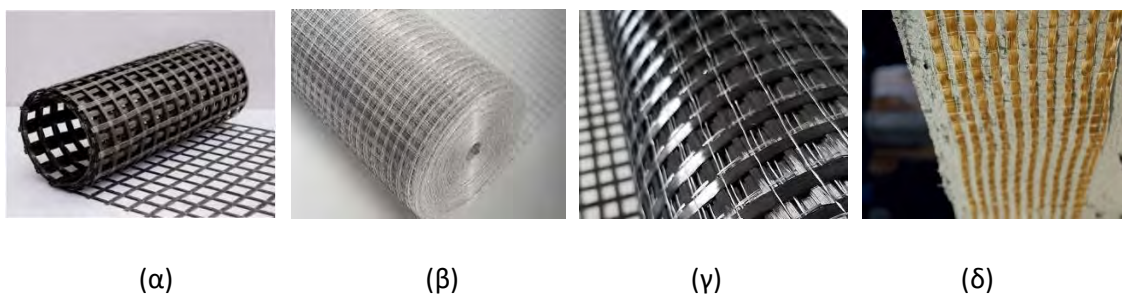
Τα μειονεκτήματα των ΙΟΠ απαριθμούνται ως εξής: i) οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται αποτελούν υλικά υψηλού κόστους, ii) τείνουν να μην αποδίδουν σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών (π.χ. φωτιά), iii) είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστούν σε υγρές επιφάνειες και δεν επιδεικνύουν καλή συνάφεια σε αυτές και iv) είναι αδύνατον να αντιστραφεί η επισκευή χωρίς να τραυματιστεί το εν λόγω δομικό στοιχείο (Elsanadedy et al., 2019).

Εξαιτίας των παραπάνω και προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα που προκαλούσε η χρήση οργανικών ρητινών θεωρήθηκε κατάλληλο να αντικατασταθούν με ανόργανα τσιμεντοκονιάματα. Η διείδυση του υφάσματος στο κονίαμα δεν γινόταν με τον βέλτιστο τρόπο καθώς το μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου ήταν αρκετά μεγάλο. Όταν τα υφάσματα αντικαταστάθηκαν από πλέγματα με βρόχους (κλώνοι ινών δύο διευθύνσεων με ενδιάμεσα κενά) (Σχήμα 2.3) τα αποτελέσματα που είχανε ήταν ορατά πιο βελτιωμένα (Koutas et al., 2019), «γεννώντας» έτσι τα νέα σύνθετα υλικά τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, ονομάστηκαν «Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα».



**Σχήμα 2.3:** Υφάσματα ενίσχυσης για: (α) ΙΟΠ; (β) ΙΑΜ.

Τα ΙΑΜ συνδυάζουν πλέγματα πολύ υψηλής αντοχής, από βασάλτη, γυαλί, άνθρακα και πολυβενζοξαζόλη (το λεγόμενο «polyphenylene benzobisoxazole» ή «PBO») (Σχήμα 2.4) τα οποία ξεχωρίζουν για την υψηλή τους αντοχή εν συγκρίσει με το βάρος τους και ανόργανες μήτρες όπως είναι το τσιμέντο και άλλα κονιάματα με βάση τον ασβέστη. Ο συνδυασμός αυτός τείνει να παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά με αποτέλεσμα i) να είναι ένα αρκετά διαχειρίσιμο υλικό και φιλικό προς τους εργάτες, ii) να εμφανίζει ανθεκτικότητα έναντι φωτιάς, iii) να έχει καλή συνάφεια με επιφάνειες όπως το τσιμέντο και η τοιχοποιία, iv) να μπορεί να εφαρμοστεί σε υγρές επιφάνειες ή σε χαμηλές θερμοκρασίες και τέλος v) να έχει χαμηλό κόστος (Koutas et al., 2019). Κατά συνέπεια όλα τα μειονεκτήματα των ΙΟΠ έχουν αντιμετωπιστεί με τη χρήση των ΙΑΜ. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται μια συνοπτική σύγκριση των δύο αυτών υλικών.



**Σχήμα 2.4:** Ινοπλέγματα που επικολλώνται με ανόργανη μήτρα: (α) βασάλτης; (β) γυαλί; (γ) άνθρακας; (δ) πολυβενζοξαζόλη ή «PBO».



**Πίνακας 2.1:** Σύγκριση «IAM» και «ΙΟΠ».

Ιδιότητες	«ΙΟΠ»	«IAM»
Μεγάλη αντοχή	✓	✓
Μικρό βάρος	✓	✓
Αντοχή στη διάβρωση	✓	✓
Εύκολη και ταχύρρυθμη τοποθέτηση	✓	✓
Εύκολη αλλαγή γεωμετρίας	✓	✓
Ανθεκτικότητα στη φωτιά	✗	✓
Καλές σχέσεις συνάφειας με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου	✗	✓
Εφαρμογή σε βρεγμένη επιφάνεια	✗	✓
Τοποθέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες	✗	✓
Χαμηλό κόστος	✗	✓

Σύνθεση IAM

Τα υλικά που απαρτίζουν τα IAM αποτελούνται από: i) πλέγματα ινών, τα οποία αποτελούνται από ίνες που είναι υφασμένες σε δύο κάθετες συνήθως μεταξύ τους διευθύνσεις. Τα κενά που υπάρχουν ανάμεσα στις ίνες (βρόγχοι) δημιουργούν κάποιου είδους μηχανικής εμπλοκής μεταξύ του πλέγματος και ii) της μήτρας, δηλαδή του δεύτερου υλικού, του κονιάματος. Η επικάλυψη μη μεταλλικών πλεγμάτων με πολυμερή βελτιώνει την σταθερότητα του πλέγματος και την μηχανική εμπλοκή του με τη μήτρα (Koutas et al., 2019). Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η τοποθέτηση ινοπλέγματος υάλου με τσιμεντοκονίαμα σε τοιχίσκο. Η ακριβής διαδικασία της τοποθέτησης θα αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 3.



**Σχήμα 2.5:** Ενίσχυση τοιχίσκου με εμπότιση υαλοπλέγματος σε τσιμεντοκονίαμα.

Η ανάμειξη της μήτρας πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά καθώς αυτή επηρεάζει τη τελική μορφή του σύνθετου υλικού. Προκειμένου το προαναφερθέν να έχει την ιδανική σύσταση πρέπει το μείγμα να περιέχει λεπτούς κόκκους. Το υλικό θα πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμο και να έχει επαρκή διατμητική αντοχή προκειμένου να αποφευχθεί η οποιαδήποτε αποκόλληση του από το υπόστρωμα. Τέλος είναι πολύ σημαντικό οι ίνες του υφάσματος να εμποτιστούν σωστά στο κονίαμα έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συνάφεια μεταξύ των δύο (Koutas et al., 2019).

### **2.1.2 Πεδίο εφαρμογών IAM στις ενισχύσεις κατασκευών**

Τα σύνθετα υλικά IAM, αποτελούμενα από υφάσματα ινών υψηλής αντοχής που επικολλώνται στα δομικά μέλη μέσω κονιάματος ανόργανης σύστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένας αποτελεσματικός τρόπος δομικής μετασκευής. Προσφέρουν ευελιξία, ευκολία και γρήγορη εγκατάσταση σε συνδυασμό με υψηλή αποδοτικότητα μηχανικών ιδιοτήτων, χάριν της αυξημένης αναλογίας αντοχής προς βάρος (De Santis et al., 2019a). Σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες, η χρήση τους ως υλικά ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές είναι ολοένα και πιο αυξανόμενη, σε σύγκριση με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ΙΟΠ (FRP).

Από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι μέχρι σήμερα, η έρευνα που έχει διεξαχθεί σχετικά με τη χρήση των IAM είναι σχετικά περιορισμένη. Ωστόσο το εύρος των πειραματικών εφαρμογών είναι μεγάλο και έχει δείξει την καλή έως εξαιρετική αποδοτικότητα των ενισχύσεων με μανδύες IAM. Αξιοσημείωτες είναι οι έρευνες που έχουν

πραγματοποιηθεί σε επίπεδο μηχανικής συμπεριφοράς των προαναφερθέντων, όπως η εφελκυστική, η καμπτική και η διατμητική φόρτιση (Koutas et al., 2015). Όσον αφορά την εφαρμογή μανδυνών IAM στην ενίσχυση δομικών στοιχείων, παρατίθενται στις επόμενες υποενότητες αποτελέσματα ερευνών και πειραμάτων σχετικά με τη χρήση αυτών σε ενισχύσεις κάμψης, διάτμησης, περίσφιγξης καθώς και σε μέλη τοιχοποιίας και τοιχοπληρωμένων πλαισίων.

#### 2.1.2.1 Ενίσχυση σε Κάμψη

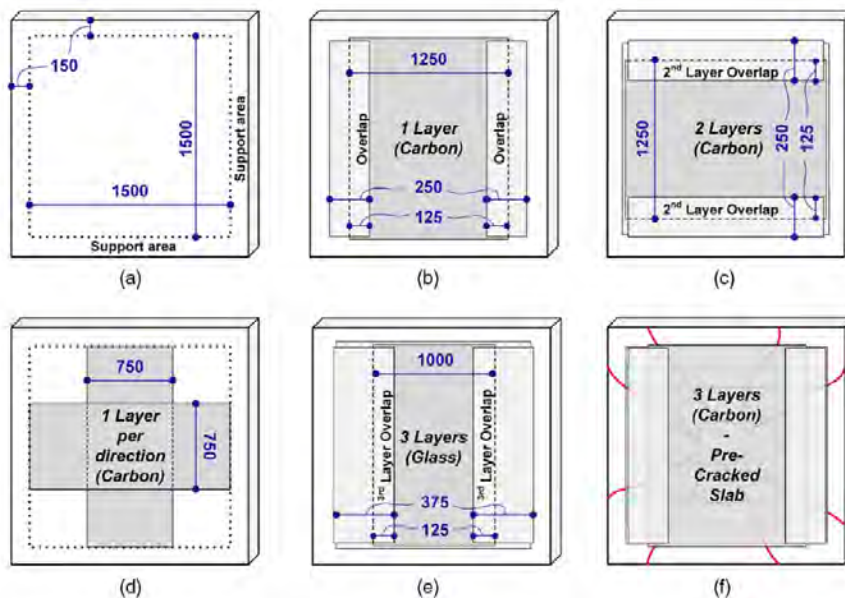
Μεταξύ των διαφόρων τύπων ενίσχυσης με IAM σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, η καμπτική ενίσχυση δοκών ΟΣ είναι μια μορφή ενίσχυσης που έχει ερευνηθεί εκτενώς την τελευταία δεκαετία. Ο Elsanadedy et al. (2013) ασχολήθηκαν με την ευμενή επίδραση των Ινοπλισμένων πολυμερών σε Ανόργανη Μήτρα στην αύξηση της καμπτικής αντοχής δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Στην έρευνα τους τέθηκαν υπό κάμψη τεσσάρων σημείων έξι δοκοί μικρής κλίμακας ΟΣ, οι δύο εκ των οποίων δεν ενισχύθηκαν. Οι τρεις δοκοί ενισχύθηκαν με IAM αποτελούμενο από τσιμεντοειδές κονίαμα και πλέγμα βασάλτη, ενώ μία δοκός ενισχύθηκε με μία στρώση CFRP. Τα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο τσιμεντοειδή κονιάματα εμπορίου, ένα απλό και ένα με πρόσθετα πολυμερή. Οι ενισχύσεις με IAM εφαρμόστηκαν στις τρεις δοκούς με σχήμα μορφής «U» και αριθμό στρώσεων πέντε και δέκα. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε συνδυασμό και με την ανάλυση σε λογισμικό που έγινε, οι ερευνητές καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα:

- Συγκρίνοντας τις δύο δοκούς με ίδιο αριθμό στρώσεων πλέγματος αλλά διαφορετικό κονίαμα και κρίνοντας από τον τρόπο αστοχίας της κάθε μίας, προκύπτει ότι το κονίαμα με τα πρόσθετα πολυμερή προσφέρει καλύτερη συνάφεια μεταξύ των στρώσεων ενίσχυσης και του σκυροδέματος και συνεπώς υψηλότερη καμπτική αντοχή, σε σύγκριση με τα απλά τσιμεντοειδή κονιάματα.
- Σε σύγκριση με την ενισχυμένη με CFRP δοκό, η οποία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει την ίδια καμπτική αντοχή με μία από τις δοκούς με IAM, η τελευταία έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με τις διαφορές να εντοπίζονται σε τρία σημεία: α) παρατηρήθηκε περισσότερο πλαστική συμπεριφορά, β) η διαρροή ξεκίνησε σε χαμηλότερο φορτίο και γ) το μέγιστο φορτίο ήταν ελαφρώς χαμηλότερο (7.2% χαμηλότερη καμπτική αντοχή).
- Οι μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στις δοκούς με IAM ήταν είτε αστοχία των ινών του πλέγματος είτε αποκόλληση του σύνθετου υλικού στην άκρη της δοκού.

Σύμφωνα με τον Elsanadedy et al. (2013) λοιπόν, η χρήση τσιμεντοειδών κονιαμάτων με συνθετικά πολυμερή φαίνεται να έχει ευμενή επίδραση στο σύστημα, με τη συνάφεια και την πλαστιμότητα να είναι τα κυριότερα πλεονεκτήματα, χωρίς να αγνοείται όμως και η βελτίωση της καμπτικής αντοχής.

Η ενίσχυση με χρήση IAM έχει επίσης επιχειρηθεί και σε στοιχεία πλακών ΟΣ. Οι Koutas και Bournas (2017) μελέτησαν πειραματικά την αποδοτικότητα των IAM σε πλάκες ΟΣ δύο διευθύνσεων, με τις βασικές παραμέτρους υπό εξέταση να είναι ο αριθμός των στρώσεων IAM (μία, δύο και τρεις), ο τρόπος εφαρμογής της ενίσχυσης (ολική και μερική κάλυψη επιφάνειας), το υλικό ενίσχυσης (άνθρακας και γυαλί) και ο ρόλος των αρχικών ρωγμών στην πλάκα.

Κατασκευάστηκαν συνολικά έξι τετραγωνικές πλάκες ίδιας γεωμετρίας, οι οποίες οπλίστηκαν με χαμηλό ποσοστό ( $\rho_s=0.17\%$ ) έτσι ώστε να έχουν χαμηλή καμπτική αντοχή. Από τις συνολικά έξι πλάκες, η μία πλάκα δεν ενισχύθηκε και χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα σύγκρισης, οι υπόλοιπες τέσσερις ενισχύθηκαν με διαφορετικό τρόπο η κάθε μία, ενώ η τελευταία ενισχύθηκε έχοντας ήδη ρηγματωθεί (Σχήμα 2.6).



**Σχήμα 2.6:** Τρόπος εφαρμογής ενίσχυσης στην επιφάνεια των πλακών (διαστάσεις σε mm) (Koutas & Bournas, 2017).

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένα τσιμεντοειδές κονίαμα με συνθετικά πολυμερή και δύο μη-επικαλυμμένα πλέγματα ινών άνθρακα και υάλου. Όλες οι πλάκες

τέθηκαν υπό κάμψη ως απλά εδραζόμενες και τα συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

- Η χρήση των IAM αύξησε σημαντικά την καμπτική αντοχή σε όλες τις περιπτώσεις συγκριτικά με την μη-ενισχυμένη πλάκα.
- Η αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης είχε ευμενή επιρροή και παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.
- Η κάλυψη όλης της επιφάνειας της πλάκας με μία στρώση είναι πιο αποτελεσματική στην αύξηση της καμπτικής αντοχής απ' ό τι η κάλυψη στη μορφή σταυροειδούς σχήματος.
- Η χρήση πλέγματος άνθρακα ή γυαλιού οδήγησε σε αύξηση της καμπτικής αντοχής ανάλογη με αυτή της αξονικής δυσκαμψίας των δύο επιμέρους πλεγμάτων.
- Στην περίπτωση της αρχικά ρηγματωμένης πλάκας, η αύξηση της καμπτικής αντοχής ήταν σχετικά χαμηλή. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας μετά τη ρηγμάτωση ανάλογη με τον αριθμό των στρώσεων ενίσχυσης.

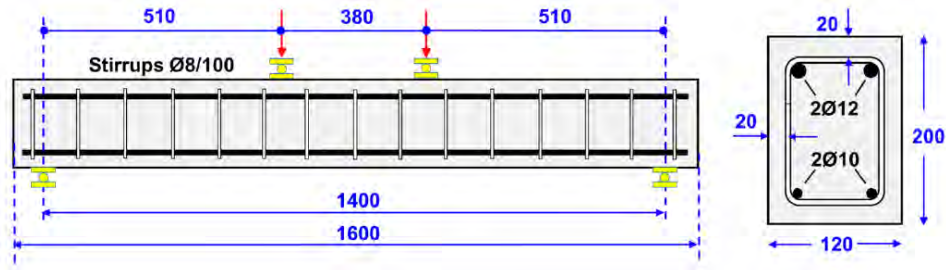
Καταλήγοντας, σύμφωνα με την έρευνα των Koutas και Bournas (2017), οι πλάκες αποτελούν ένα ακόμη δομικό στοιχείο στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν με αποτελεσματικότητα τα Ινοπλισμένα πολυμερή με Ανόργανη Μήτρα.

Όσον αφορά τις δοκούς και πάλι, η ενίσχυση τους έναντι κάμψης τους προσφέρει υψηλότερη καμπτική αντοχή και μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης, ιδιότητες κρίσιμης σημασίας για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους, τόσο ως μεμονωμένα στοιχεία όσο και ως μέλη του φέροντος οργανισμού ενός κτιρίου.

Σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με IAM έχει η μήτρα που θα χρησιμοποιηθεί ως συγκολλητικός παράγοντας μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας σκυροδέματος. Η επιλογή του υλικού της μήτρας και η επιρροή της στην απόδοση και τη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου αποτελεί μία βασική παράμετρο την οποία μελέτησαν οι Koutas και Parakonstantinou (2021), με τα αποτελέσματα τους να συμβαδίζουν με αυτά του Elsanadely.

Ερευνήθηκε πειραματικά η επιρροή του τύπου του κονιάματος στην ενίσχυση δοκών με IAM, αλλάζοντας ταυτόχρονα παραμέτρους όπως τον τύπο του ινοπλέγματος και τον αριθμό των στρώσεων του τελευταίου. Κατασκευάστηκαν στο σύνολο εννέα δοκοί μεσαίας κλίμακας από ΟΣ και τέθηκαν, ως απλά εδραζόμενες, υπό κάμψη τεσσάρων σημείων. Η

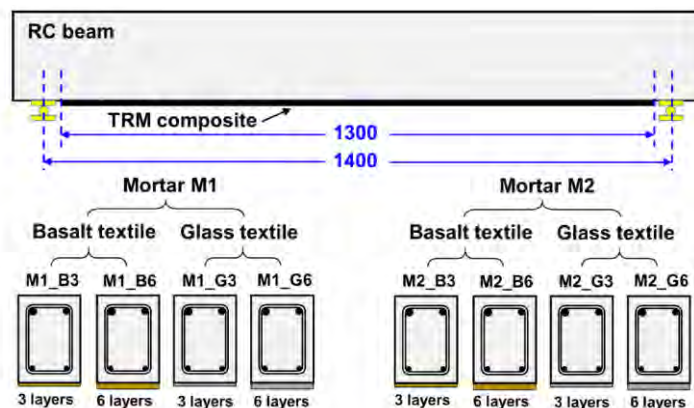
γεωμετρία και οι λεπτομέρειες όπλισης των δοκών φαίνονται στο Σχήμα 2.7. Οι βασικές παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν α) ο τύπος του κονιάματος, β) ο αριθμός των στρώσεων ενίσχυσης και γ) ο τύπος του ινοπλέγματος και τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχολιάστηκαν υπό το φάσμα της καμπτικής αντοχής, των τρόπων αστοχίας και της καμπτικής δυσκαμψίας που παρατηρήθηκαν.



**Σχήμα 2.7:** Γεωμετρία και λεπτομέρειες όπλισης της υπό ενίσχυσης δοκού ΟΣ (Koutas & Papakonstantinou, 2021).

Πιο αναλυτικά, το ένα εκ των δύο κονιαμάτων, συμβολιζόμενο ως M1, ήταν ένα έτοιμο τσιμεντοειδές κονίαμα που περιείχε ίνες πολυπροπυλενίου και το οποίο αναμείχθηκε με συνθετικά πολυμερή. Το δεύτερο κονίαμα, M2, ήταν επίσης ένα τσιμεντοειδές κονίαμα με ίνες πολυπροπυλενίου και ποζολανικά πρόσθετα. Η κύρια διαφορά τους ήταν η προσθήκη σύνθετων πολυμερών στο M1. Όσον αφορά τα πλέγματα ενίσχυσης, ήταν ένα από ίνες βασάλτη και ένα από ίνες υάλου, και τα δύο με επικάλυψη.

Οι δοκοί ενισχύθηκαν με διαφορετικούς τρόπους (Σχήμα 2.8), τέθηκαν υπό δοκιμή και τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:



**Σχήμα 2.8:** Απεικόνιση του συνδυασμού των ενισχύσεων (διαστάσεις σε mm) (Koutas & Papakonstantinou, 2021).

- Η ενίσχυση των δοκών αύξησε την καμπτική τους αντοχή σε όλες τις περιπτώσεις, με ποσοστό διακύμανσης από 7.4% έως 37.4%.
- Όλες οι δοκοί παρουσίασαν σημαντικά αυξημένη καμπτική δυσκαμψία σε σύγκριση με την μη ενισχυμένη, κυρίως στο στάδιο μετά την διαρροή του διαμήκους σπλισμού και λόγω της εφελκυστικής αντοχής του IAM.
- Οι δοκοί με το κονίαμα M1 με τα συνθετικά πολυμερή επέδειξαν υψηλότερη καμπτική αντοχή σε σύγκριση με αυτές με το M2, ενώ όσον αφορά την καμπτική δυσκαμψία, παρατηρήθηκε ότι οι δοκοί με το M2 παρουσίασαν περισσότερη δυσκαμψία, πιθανώς λόγω της πλαστικότερης συμπεριφοράς του M1 οφειλόμενη στα συνθετικά πολυμερή.
- Όσον αφορά τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος ενίσχυσης, η χρήση διπλής στρώσης (από 3 σε 6) αύξησε την καμπτική αντοχή στην περίπτωση του κονιάματος M1. Εν αντιθέσει, με το κονίαμα M2 παρατηρήθηκε μείωση της καμπτικής αντοχής διπλασιάζοντας τις στρώσεις του πλέγματος, γεγονός που αποδίδεται στην κακή συνάφεια του κονιάματος με το σκυρόδεμα σε συνδυασμό με την υψηλότερη αξονική ακαμψία του υλικού της διπλής στρώσης.
- Έντονη διαφορά στην καμπτική αντοχή του συστήματος στην περίπτωση του κονιάματος M1. Αντιθέτως τα δοκίμια ενισχυμένα με το υαλόπλεγμα και το M2 κονίαμα επέδειξαν υψηλότερη καμπτική αντοχή, γεγονός που υποδεικνύει την ιδιότητα του κονιάματος με τα συνθετικά πολυμερή να καταναίμει καλύτερα τις διατμητικές τάσεις εντός του πάχους του κονιάματος και κατά μήκος της διεπιφάνειας του τελευταίου με το σκυρόδεμα.

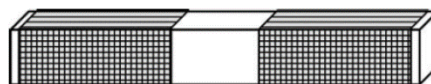
Εν κατακλείδι, σύμφωνα με τους ερευνητές η χρήση τσιμεντοειδών κονιαμάτων με πρόσθετα συνθετικά πολυμερή βελτιώνει σημαντικά, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά IAM. Με βάση τις πληροφορίες που αντλήθηκαν από τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση IAM ως υλικό ενίσχυσης έναντι κάμψης σε δομικά στοιχεία ΟΣ, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και προσφέρει μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη δομική συμπεριφορά των στοιχείων που εφαρμόζονται.

## 2.1.2.2 Ενίσχυση σε Διάτμηση

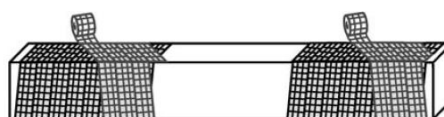
Εξίσου σημαντική και αναγκαία με την ενίσχυση σε κάμψη είναι και η ενίσχυση σε διάτμηση των δομικών στοιχείων. Η εκτενής πειραματική έρευνα που έχει γίνει γύρω από την ενίσχυση δομικών στοιχείων σε διάτμηση, με Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα, έχει αποδείξει την αξιοσημείωτη συνεισφορά αυτών στην διατμητική αντοχή των στοιχείων. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει αυτή τη μορφή ενίσχυσης σε διάφορα δομικά στοιχεία όπως δοκούς, πεδιλοδοκούς, υποστυλώματα κτλ.

Οι Triantafillou και Papanicolaou (2006) δημοσίευσαν την έρευνα τους, η οποία αφορούσε τη διατμητική ενίσχυση δοκών με ανόργανη και οργανική μήτρα. Συγκεκριμένα οι προαναφερθέντες ενίσχυσαν έξι συνολικά δοκούς (ελλιπή σε συμβατικό διατμητικό σπλισμό) με υφάσματα άνθρακα ινών δύο κάθετων διευθύνσεων, μίας ή δύο στρώσεων, (η περιτύλιξη έγινε είτε συμβατικά είτε σπειροειδώς σε γωνία  $\pm 10^\circ$  (Σχήμα 2.9)) σε ανόργανη αλλά και οργανική μήτρα. Τέσσερα από αυτά υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση ενώ τα υπόλοιπα δύο σε κυκλική (σε τέσσερα σημεία κάμψης). Τα συνοπτικά συμπεράσματα του πειράματος ήταν τα εξής:

- Τα δοκίμια των οποίων τα υφάσματα εμποτίστηκαν σε ανόργανη μήτρα εμφάνισαν αυξημένη διατμητική αντοχή.
- Οι δύο στρώσεις υφάσματος ήταν αρκετές για να αποτραπεί η διατμητική αστοχία, εν αντιθέσει με την μία που ήταν λιγότερο ισχυρή, αλλά παρόλα αυτά αρκετή για να προσφέρει μια μερικώς αυξημένη αντοχή.
- Ο διαμοιρασμός της βλάβης, εξαιτίας των ρωγμών στις δοκούς, ήταν διαφορετικός για κάθε τύπο υφάσματος.



(α)



(β)

**Σχήμα 2.9:** Τοποθέτηση του υφάσματος: (α) συμβατικά; (β) σπειροειδώς (Triantafillou & Papanicolaou, 2006).



Αντίστοιχα, λίγο αργότερα ο Escrig et al. (2015) σύγκριναν την μηχανική συμπεριφορά εννέα δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες υποβλήθηκαν σε διατμητική φόρτιση. Οι οχτώ ενισχύθηκαν με τέσσερις τύπους υφάσματος (βασάλτη, άνθρακα, γυαλιού και PBO) καθώς και τέσσερα είδη ανόργανου κονιάματος και φορτίστηκαν καμπτικά σε τρία σημεία, ενώ η μία χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο «control» προκειμένου να συγκριθούν με αυτήν τα αποτελέσματα των υπολοίπων.

Συνδυάζοντας με οχτώ διαφορετικούς τρόπους τα παραπάνω εξετάστηκε η απόδοση των συστημάτων ενίσχυσης στην αύξηση της διατμητικής αλλά και της καμπτικής αντοχής των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο διαφορετικός συνδυασμός των υλικών (υφάσματος και κονιάματος) οδήγησε στην αύξηση της διατμητικής αντοχής κατά 36%. Μάλιστα θεαματική ήταν και η αντοχή τους στην κάμψη καθώς και το ότι αστόχησαν πλαστικά, σε αντίθεση με το δοκίμιο «control» που αστόχησε ψαθυρά. Συνοπτικά τα διάφορα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν την εξής συμπεριφορά:

- Τα υφάσματα PBO απέδωσαν καλύτερα από όλα σε διατμητική και καμπτική αντοχή. Παρόλα αυτά το σύστημα αυτό ήταν το λιγότερο αποδοτικό στη σχέση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του και την συγκολλητική του συμπεριφορά. Τα IAM που συνδύαζαν είτε τον βασάλτη είτε το γυαλί είχαν παρόμοια διατμητική απόδοση.
- Τέλος τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με υφάσματα άνθρακα δεν αστόχησαν πλαστικά, ωστόσο αύξησαν την διατμητική τους αντοχή κατά 22%.

Καταλήγοντας, η διατμητική ενίσχυση πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα και να μην αμελείται όπως γινόταν στο παρελθόν. Ωστόσο, εάν αυτό συμβεί, οι νέες τεχνικές ενίσχυσης με IAM, αποτελούν εύκολη και οικονομική διαφυγή από την αστοχία.

### 2.1.2.3 Ενίσχυση σε Περίσφιγξη

Η χρήση των IAM ως υλικό ενίσχυσης για αύξηση της αξονικής αντοχής ενός στοιχείου σκυροδέματος, έχει επίσης διερευνηθεί αρκετά από τον επιστημονικό κλάδο. Η διαδικασία εφαρμογής αλληπάληλων στρώσεων υλικού περιμετρικά του υπό ενίσχυση στοιχείου, γνωστή και ως περίσφιγξη, έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα και οι πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με αυτήν έχουν δώσει αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Παρακάτω συνοψίζονται και συγκρίνονται κάποια από τα

προαναφερθέντα πειράματα και τα σημαντικότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά, όσον αφορά την χρήση των IAM σε περισφίγγεις στοιχείων σκυροδέματος.

Ο Triantafyllou et al. (2006) διερεύνησαν την αποδοτικότητα διαφόρων συστημάτων περίσφιγξης, με βάση τα υφάσματα από άνθρακα και τις ανόργανες μήτρες (τσιμεντοειδή κονιάματα). Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια και κοντά δοκίμια τετραγωνικής διατομής τύπου υποστυλώματα. Οι παράμετροι υπό διερεύνηση ήταν: ανόργανο κονίαμα και ρητινούχες μήτρες, η αντοχή του κονιάματος, ο αριθμός των στρώσεων των υφασμάτων και η παρουσία ή μη κονιάματος.

Το ύφασμα που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ήταν μορφής ορθογωνικού πλέγματος από άνθρακα. Τα κονιάματα ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης με διαφορετικές ποσότητες πολυμερών. Εκτελέστηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, απ' όπου λήφθηκαν το επιβαλλόμενο φορτίο και οι παραμορφώσεις μέσω LVDT's. Μέσω αυτών δημιουργήθηκαν οι καμπύλες τάσεις-παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο και συγκρίθηκαν μεταξύ τους.

Προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η περίσφιγξη με IAM προσφέρει σημαντική αύξηση στην θλιπτική αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης. Αυτό αυξάνεται με την αύξηση των στρώσεων περίσφιγξης και εξαρτάται από την αντοχή του κονιάματος, το οποίο καθορίζει και τον τρόπο αστοχίας του υλικού.
- Σε σύγκριση με τα ΙΟΠ, τα IAM στο συγκεκριμένο πείραμα αποδείχθηκαν λιγότερο αποτελεσματικά κατά 80% στη θλιπτική αντοχή και 50% στη μέγιστη παραμόρφωση. Σημειώνεται ότι αυτό οφείλεται στο είδος του κονιάματος και μπορεί να βελτιστοποιηθεί με κατάλληλες τροποποιήσεις.
- Η αστοχία στα δοκίμια με IAM έγινε με λιγότερο απότομο τρόπο σε σχέση με τα ΙΟΠ, γεγονός που οφείλεται στην πιο αργή και σταδιακή αστοχία των ινών του πρώτου.
- Η περίπτωση περίσφιγξης με ελικοειδή εφαρμογή και απουσία μήτρας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ο συγγραφέας προτείνει περαιτέρω έρευνα.

Ο Bournas et al. (2007) διερεύνησαν πειραματικά την αποδοτικότητα της περίσφιγξης με IAM και ΙΟΠ σε περιορισμένης αντοχής υποστυλώματα ΟΣ λόγω λυγισμού

του διαμήκους οπλισμού. Το πειραματικό πρόγραμμα περιελάμβανε κοντά δοκίμια που δοκιμάσθηκαν υπό ομόκεντρη θλίψη και σχεδόν κανονικής κλίμακας υποστυλώματα τα οποία τέθηκαν υπό κυκλική μονοαξονική κάμψη υπό συνεχώς επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την περίσφιγξη των δοκιμίων ήταν ινόπλεγμα και ύφασμα άνθρακα, τσιμεντοκονίαμα με πολυμερή και εποξειδική ρητίνη.

Ο σκοπός του πειράματος ήταν η σύγκριση των IAM έναντι των ΙΟΠ υπό τις παραμέτρους του εσωτερικού οπλισμού των δοκιμίων και των αριθμό των στρώσεων περίσφιγξης. Από τα δεδομένα του πειράματος διεξήχθησαν καμπύλες τάσεις-παραμόρφωσης και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα.

Η περίσφιγξη με IAM αυξάνει τη θλιπτική αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης αφού οι μανδύες παρεμποδίζουν τον λυγισμό του διαμήκους οπλισμού. Η βελτίωση αυτή προκύπτει με την αύξηση των στρώσεων του υλικού.

- Συγκρινόμενα με τα ΙΟΠ, τα IAM αποδείχθηκαν ελαφρώς λιγότερο αποτελεσματικά στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμόρφωσης κατά 10%.
- Όσον αφορά τα τρία υποστυλώματα υπό κυκλική φόρτιση, η περίσφιγξη με IAM είναι πολύ αποτελεσματική στην αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και στην κατανομή ενέργειας των υποστυλωμάτων με ελλiptή οπλισμό. Συγκρίνοντας με τα ΙΟΠ, τα IAM έχουν πρακτικά την ίδια αποδοτικότητα.
- Ο τρόπος αστοχίας των ΙΟΠ ήταν απότομος σε σχέση με τα IAM.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούμε να αποφανθούμε ότι η περίσφιγξη στοιχείων ΟΣ με IAM βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες ενός στοιχείου (αντοχή και παραμόρφωση) και σε συνδυασμό με παραμέτρους όπως, τύπος κονιάματος και αριθμός στρώσεων περίσφιγξης, μπορεί να δώσει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Εν κατακλείδι, αποτελεί μία μέθοδο ενίσχυσης που φαίνεται να είναι ιδιαίτερα «υποσχόμενη» σε ένα ευρύ φάσμα πεδίου εφαρμογών.

#### 2.1.2.4 Ενίσχυση τοιχοποιίας σε εντός-εκτός επιπέδου φόρτιση

Η φέρουσα τοιχοποιία αποτελεί ένα από τα παλαιότερα συστήματα δόμησης παγκοσμίως. Οι κατασκευές με αυτόν τον τύπο δόμησης συναντώνται ευρέως και η ανάγκη για την αποκατάσταση και την ενίσχυσή τους πηγάζει από το εύρος των προβλημάτων που έχουν παρατηρηθεί. Πρόσφατα καταστροφικά γεγονότα όπως οι σεισμοί L'Aquila (2009), Tohoku, Ιαπωνία (2011), Christchurch (2011), βόρεια Ιταλία (2012) και κεντρική Ιταλία (2016-2017) έχουν τονίσει τη σημαντικότητα της αποκατάστασης κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία τόσο για τη διατήρηση και προφύλαξη αυτών των κατασκευών όσο και για την προστασία των ανθρώπινων ζώων (Kariou et al., 2018).

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η φέρουσα τοιχοποιία που είναι σχεδιασμένη να παραλαμβάνει τα κατακόρυφα φορτία, υπόκειται επίσης σε πλευρική φόρτιση, είτε αυτή είναι παράλληλη (η λεγόμενη εντός επιπέδου φόρτιση) στο ισχυρό της επίπεδο, είτε είναι κάθετη σε αυτό (εκτός επιπέδου) ή πιθανώς να συνδυάζεται (ταυτόχρονη εντός και εκτός επιπέδου) (Ismail & Ingham, 2016). Το γεγονός ότι τέτοιες κατασκευές είναι επιρρεπείς στην γήρανση, η οποία επιταχύνεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως υψηλής ταχύτητας άνεμοι και δυνατές βροχοπτώσεις, επιφέρει δομική αλλοίωση και δυσχεραίνει την απόκριση τους σε σεισμικά επεισόδια (Kariou et al., 2018).

Εξαιτίας της ψαθυρής φύσης της φέρουσας τοιχοποιίας, η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της, θα βελτιώσουν την σεισμική συμπεριφορά και τον τρόπο μιας πιθανής κατάρρευσης της κατασκευής. Πολλές μέθοδοι ενίσχυσης έχουν προταθεί και εφαρμοστεί για να βελτιώσουν την ανθεκτικότητα τέτοιων κατασκευών, όπως η αρμολόγηση, η εφαρμογή μανδύων σκυροδέματος και τα σύνθετα υλικά FRP. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά εργαστηριακά πειράματα που αφορούν την ενίσχυση κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας ή τοιχοσωμάτων με υλικά TRM ή FRP υπό την δράση φόρτισης εντός και εκτός επιπέδου. Συνοψίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν και συγκρίνονται μεταξύ τους.

Ο Babaeidarabad et al. (2014) διερεύνησαν την χρήση του σύνθετου υλικού FRCM στην ενίσχυση τοίχων φέρουσας τοιχοποιίας με σκοπό την βελτίωση της εκτός επιπέδου απόκρισής τους. Οι τοίχοι ενισχύθηκαν με τρεις και τέσσερις στρώσεις FRCM, με πλέγμα από ίνες άνθρακα και τσιμεντοειδές κονίαμα. Υποβλήθηκαν σε οριζόντια κυκλική φόρτιση με ομοιόμορφη πίεση που ασκούταν μέσω αερόσακου.

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν, δημιουργήθηκε πίνακας που περιείχε τις μέγιστες τιμές της καμπτικής ροπής και της τέμνουσας δύναμης. Όσον αφορά την καμπτική αντοχή παρατηρήθηκε αύξηση 2.75 για τη μία στρώση FRCM και 7.52 για τις τέσσερις στρώσεις. Ακόμη, από τις καμπύλες ροπής-μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι η καμπτική αντοχή και η δυσκαμψία αυξάνονται με την αύξηση των στρώσεων του FRCM καθώς και η αποτελεσματικότητα του τελευταίου στην αύξηση της δυσκαμψίας και της ψευδοπλαστιμότητας. Να σημειωθεί ότι η τελευταία ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση λιγότερων στρώσεων FRCM, αφού με περισσότερες στρώσεις η πλαστιμότητα περιορίζεται από την διατμητική αστοχία. Οι δύο τρόποι αστοχίας που παρατηρήθηκαν ήταν οι ακόλουθοι: i) καμπτική αστοχία με οριζόντιες ρωγμές στο μέσον του ύψους του τοίχου και με ολίσθηση του υφάσματος και ii) διατμητική αστοχία με κάθετες ρωγμές στην περιοχή των στηρίξεων που συνεχίσθηκαν υπό κλίση 45 μοιρών.

Οι Yardim και Lalaj (2016) διερεύνησαν πειραματικά την συμπεριφορά τοιχίσκων φέρουσας τοιχοποιίας έναντι διαγώνιας θλίψης, ενισχυμένων με διαφορετικά συστήματα TRM. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν τρεις τύποι ενίσχυσης, αυτή με TRM, με πλέγμα πολυπροπυλενίου (PP-FRM) και το «ferrocement» (είδος ενισχυμένου σκυροδέματος). Τα υλικά ενίσχυσης ήταν ένα πλέγμα από ίνες υάλου και ένα τσιμεντοειδές κονίαμα. Για την ενίσχυση με ferrocement χρησιμοποιήθηκε συρμάτινο πλέγμα χάλυβα και για την ενίσχυση με PP-FRM αναμείχθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου με τσιμεντοειδές κονίαμα. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή διαγώνιας θλίψης και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα (Σχήμα 2.10).



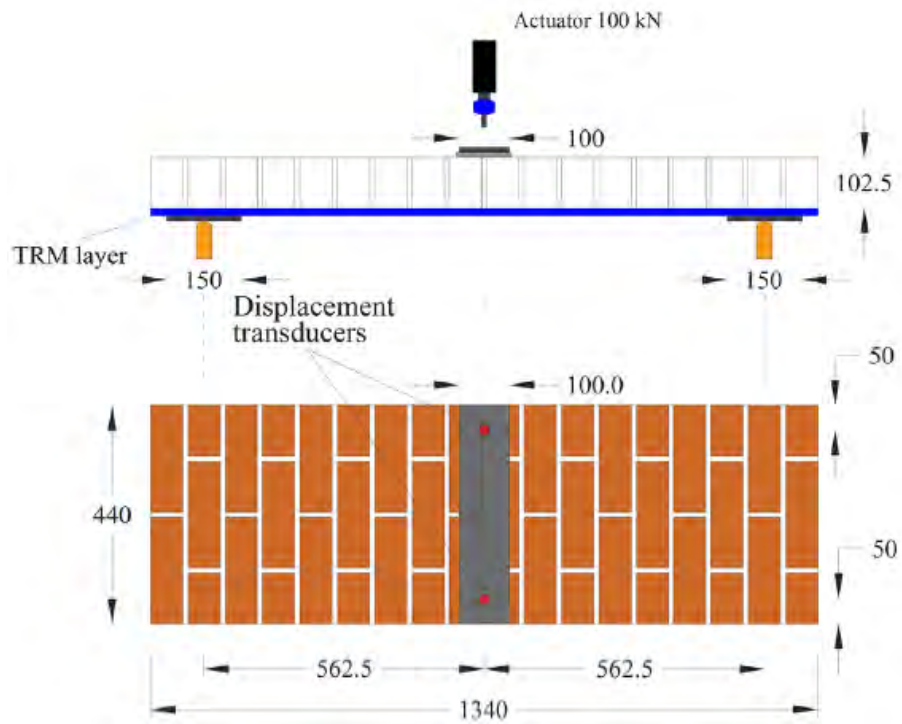
(α)

(β)

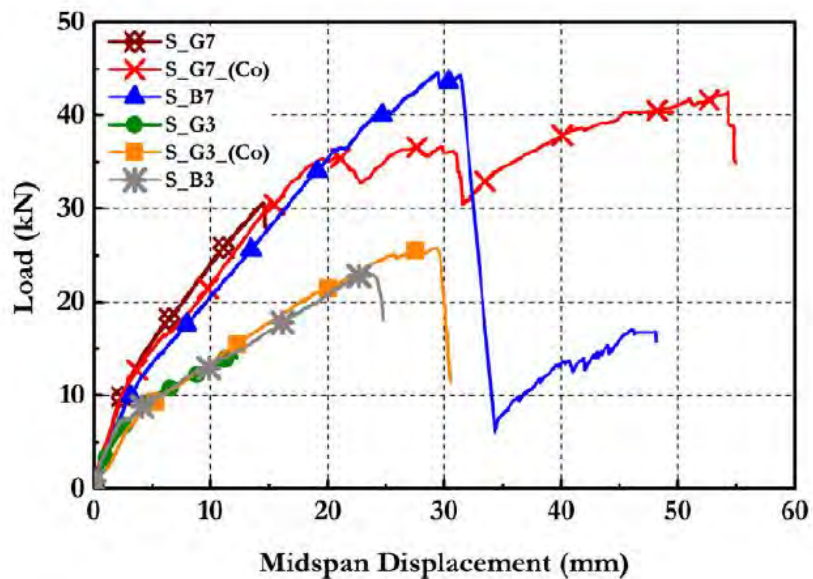
**Σχήμα 2.10:** Ενίσχυση τοιχίσκων με TRM: (α) έναρξη ρηγματώσης κατά μήκος της θλιπτικής διαγώνιου; (β) ολική αστοχία υλικού και αποκόλληση (Yardim & Lalaj, 2016).

- Όσον αφορά τους μη ενισχυμένους τοίχους, όλοι αστόχησαν με τον ίδιο τρόπο, απότομα, ψαθυρά και με ρηγμάτωση που ακολουθεί τον αρμό.
- Στους τοίχους με ενίσχυση μόνο στη μία όψη τους παρατηρήθηκε εκτός επιπέδου παραμόρφωση και ρηγμάτωση πριν την ρηγμάτωση της ενισχυμένης πλευράς.
- Η διατμητική δυσκαμψία αυξήθηκε σημαντικά στις περιπτώσεις με ενίσχυση ferrocement και PP-FRM, ενώ οι ενισχυμένοι και στις δύο πλευρές τοίχοι με TRM έδειξαν την μικρότερη αύξηση διατμητικής αντοχής. Οι ενισχυμένοι μόνο στη μία πλευρά τοίχοι, παρουσίασαν μικρή ή και καθόλου αύξηση δυσκαμψίας, γεγονός που οφείλεται στην εκτός επιπέδου αστοχία.

Η Kariou et al. (2018) διερεύνησαν πειραματικά την εκτός επιπέδου απόκριση τοιχίσκων φέρουσας τοιχοποιίας ενισχυμένων με TRM. Οι βασικές παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν η ποσότητα και το υλικό ενίσχυσης, η επικάλυψη του πλέγματος ενίσχυσης με εποξειδική ρητίνη και το πάχος των τοιχίσκων. Κατασκευάστηκαν συνολικά δεκαοκτώ τοιχίσκοι από συμπαγείς οπτόπλινθους. Τα υλικά ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν απαρτίζονταν από ινοπλέγματα άνθρακα, υάλου και βασάλτη και τσιμεντοκονίαμα με πολυμερή. Οι τοιχίσκοι τέθηκαν υπό κάμψη τριών σημείων μέσω υδραυλικού εμβόλου (Σχήμα 2.11) και για την μέτρηση της βύθισης χρησιμοποιήθηκαν δύο ποτενσιόμετρα στο μέσον του ανοίγματος. Από τις μετρήσεις που λήφθηκαν εξάχθηκαν καμπύλες φορτίου-βύθισης (Σχήμα 2.12) και ομαδοποιήθηκαν με βάση τις υπό διερεύνηση παραμέτρους για ευκολία συγκρίσεως των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.11: Τοιχίσκος υπό κάμψη τριών σημείων σε αστοχία (Kariou et al., 2018).



Σχήμα 2.12: Καμπύλες φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος (Kariou et al., 2018).

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα ακόλουθα:

- Η επικάλυψη των πλεγμάτων με εποξειδική ρητίνη οδήγησε σε αύξηση του φορτίου αντοχής σε σύγκριση με τους τοιχίσκους με μη επικαλυμμένο πλέγμα. Αυτό

οφείλεται i) στην καλύτερη συνάφεια μεταξύ του πλέγματος και του κονιάματος, λόγω των σκληρότερων ινών του και της τραχύτερης επιφάνειας του και ii) στην αύξηση της εφελκυστικής του αντοχής λόγω μεγαλύτερης τριβής των ινών μεταξύ τους.

- Η αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης έχει παρόμοια επίδραση με την εφαρμογή επικαλυμμένων πλεγμάτων, βελτιώνοντας την συμπλοκή των τελευταίων με το κονίαμα.
- Η παραμορφοσιμότητα του τοιχίσκου με τις επτά στρώσεις επικαλυμμένου υαλοπλέγματος ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από ότι αυτή με τις επτά στρώσεις βασάλτη. Αυτό δείχνει τις υποσχόμενες ιδιότητες του υαλοπλέγματος που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.
- Σε όλες τις περιπτώσεις η συνάφεια μεταξύ του TRM και επιφάνειας των τοιχίσκων ήταν η βέλτιστη, αφού αποκόλληση παρατηρήθηκε μόνο μετά το μέγιστο φορτίο.
- Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με TRM ήταν ποιο σαφής στην περίπτωση των τοιχίσκων με μία σειρά οπτόπλινθων σε σύγκριση με τους ποιο δύσκαμπτους με δύο σειρές.
- Στους τελευταίους, το μέγιστο φορτίο καθορίστηκε από την διατμητική τους αντοχή.

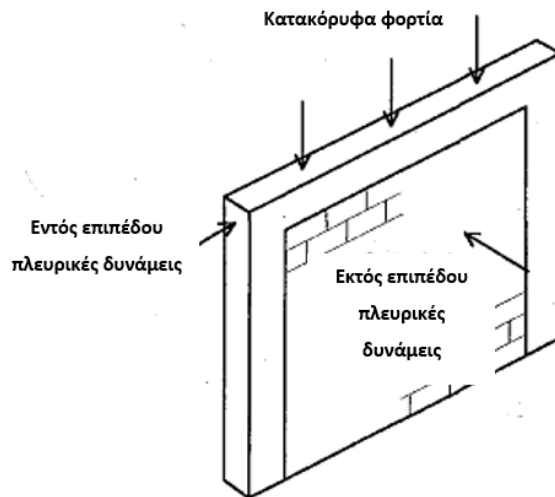
Συνεπώς και η παραπάνω έρευνα καταλήγει στη σημαντικότητα και την έμφαση που πρέπει να δίνεται στον συνδυασμό τοποθέτησης των σύνθετων υλικών καθώς ο βέλτιστος συνδυασμός θα προσφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

#### 2.1.2.5 Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ

Πρόσφατα εκτιμήθηκε, ύστερα από έρευνες μετά-σεισμών, πως οι εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις των πλαισίων ΟΣ αποτελούν πολύ σημαντικά στοιχεία στη σεισμική συμπεριφορά των κτιρίων. Αυτές επιδέχονται σημαντικές βλάβες που οφείλονται στην συνδυαστική εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα οικονομικές απώλειες, τραυματισμούς και στην έσχατη περίπτωση ανθρώπινες απώλειες. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να γίνει προτεραιότητα η κατάλληλη ενίσχυση των προαναφερθέντων με νέες τεχνικές προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόκριση του κτιρίου σε μελλοντικούς σεισμούς.



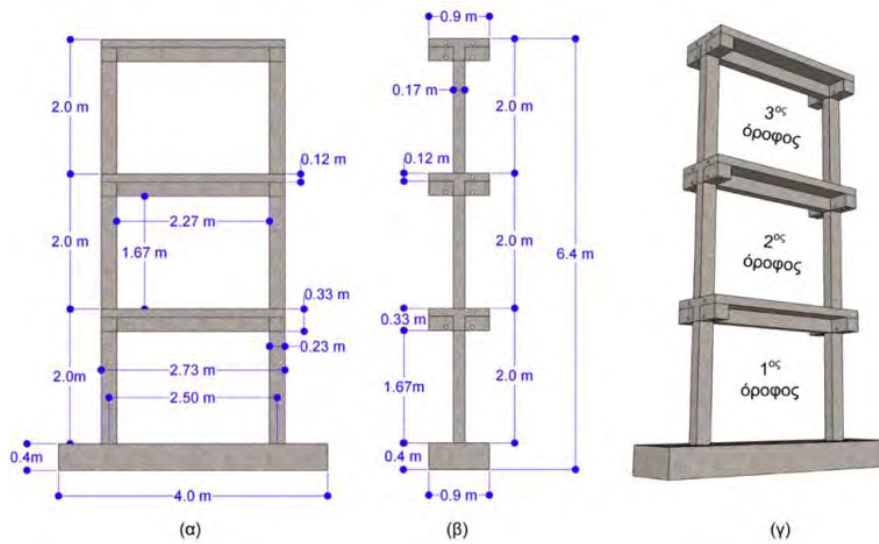
Η αναφορά στην «εντός» και «εκτός» επιπέδου βλάβη αφορά κτίρια των οποίων οι άοπλοι φέροντες τοίχοι υπόκεινται σε σεισμική δράση και κάμπτονται εντός και εκτός επιπέδου. Είναι σημαντικό να δίνεται έμφαση στην κατάλληλη εκτός αλλά και εντός επιπέδου ενίσχυση, καθώς εάν αγνοήσουμε την μία μπορεί να επιφέρει δυσχέρεια στην απόδοση της άλλης. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η διαφορά της εντός και εκτός επιπέδου φόρτισης ενός πλαισίου.



**Σχήμα 2.13:** Τοιχοπληρωμένο πλαίσιο ΟΣ που υπόκειται σε εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση.

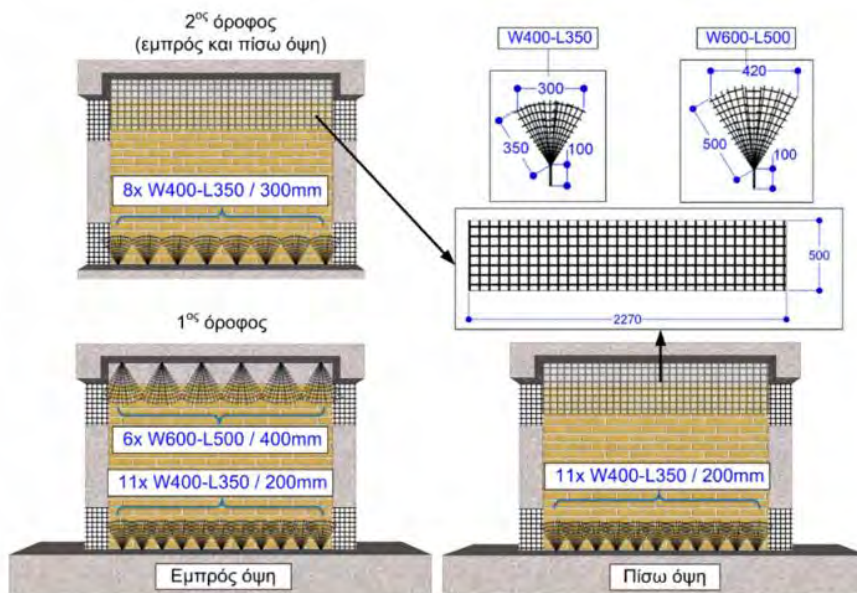
#### 2.1.2.6 Εντός επιπέδου ενίσχυση

Ο Koutas et al. (2015) εξέτασε την αποδοτικότητα της, τότε νέας, τεχνικής ενίσχυσης με IAM σε δύο τριώροφα τοιχοπληρωμένα πλαίσια ενός ανοίγματος (ελαφρά οπλισμένα) (Σχήμα 2.14), σχεδόν πλήρους γεωμετρικής κλίμακας (2/3). Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποδοτικότητά τους, το ένα εκ των δύο δοκιμών υποβλήθηκε σε φόρτιση χωρίς ενίσχυση. Τα δύο δοκίμια, με ύψος ορόφου στα 2m και θεωρητικό άνοιγμα πλαισίου 2.50m, καταπονήθηκαν σε κυκλική φόρτιση ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές ελεύθερης ταλάντωσης με σκοπό την αποτύπωση των δυναμικών χαρακτηριστικών τους.



**Σχήμα 2.14:** Γεωμετρία του γυμνού πλαισίου ΟΣ: (α) εμπρός όψη; (β) πλάγια όψη και (γ) προοπτική άποψη (Koutas et al., 2015).

Οι τοιχοπληρώσεις και των τριών ορόφων ήταν χωρίς ανοίγματα και αποτελούνταν από δύο δρομικές τοιχοποιίες με ενδιάμεσο κενό μεταξύ τους. Η ενίσχυση των δοκιμών επικεντρώθηκε στα (α) άκρα των υποστυλωμάτων του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> ορόφου (ανθρακοπλέγματα), (β) στις δύο πλευρές της τοιχοπλήρωσης κάθε ορόφου (ινοπλέγματα) και (γ) στη βάση των φατνωμάτων του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> ορόφου (αγκύρια ινών μορφής θυσάνου). Τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.15.



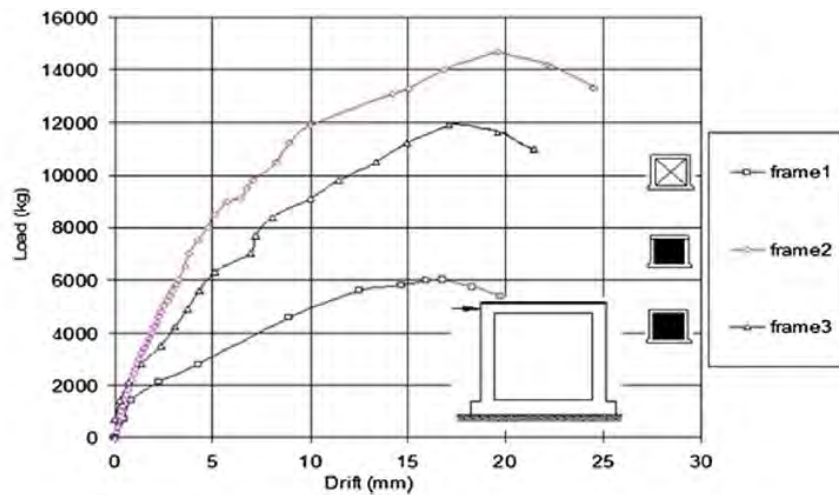
**Σχήμα 2.15:** Διάταξη και διαστάσεις ενίσχυσης (Koutas et al., 2015).

Μερικά από τα συμπεράσματα ήταν:

- Τα ελαστικά δυναμικά χαρακτηριστικά του πλαισίου επηρεάζονται τόσο από τις τοιχοπληρώσεις όσο και από τις στρώσεις της ενίσχυσης.
- Τα IAM βελτίωσαν καθολικά την απόκριση του τοιχοπληρωμένου πλαισίου, τόσο στις πλευρικές αντιστάσεις όσο και στην ικανότητα παραμόρφωσης.
- Το ενισχυμένο δοκίμιο ανάλωσε 22.5% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το δοκίμιο «control», για την ίδια διαδικασία φόρτισης.
- Τα IAM επέτρεψαν μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις μέσω της ανάπτυξης πολλαπλών ρηγματώσεων.
- Η χρήση κλειστών μανδύων IAM για την διατμητική ενίσχυση των άκρων στων υποστρωμάτων φάνηκε αναγκαία και καθοριστική για την αποφυγή διατμητικών βλαβών.

Η παραπάνω διατριβή αποδείχθηκε πολύ σημαντική για την ανάδειξη νέων πληροφοριών γύρω από την συμπεριφορά της ενίσχυσης με Ινοπλισμένα Πολυμερή. Ο Κούτας ανέλυσε σε βάθος τη συμπεριφορά των δοκιμίων, ωστόσο στην παρούσα διπλωματική είναι αδύνατον να γίνει εκτενής περιγραφή.

Όμοια, ο Abdel-Hafez et al. (2015) μελέτησαν την συμπεριφορά τοιχοπληρωμένων πλαισίων σε εντός επιπέδου φόρτιση. Το πειραματικό πρόγραμμα περιλάμβανε επτά στο σύνολο πλαίσια μήκους 1.80m και ύψους 1.60m, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιήθηκε ως έχειν, τα δύο ήταν τοιχοπληρωμένα με διαφορετικό τρόπο κατασκευής (χτίσιμο τοιχοπλήρωσης πριν και μετά την σκυροδέτηση) και τα υπόλοιπα τέσσερα τοιχοπληρωμένα και ενισχυμένα με διαφορετικούς τρόπους ενίσχυσης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν, ύφασμα υάλου με εποξειδική ρητίνη (GFRP), χρήση διατμητικών πείρων μεταξύ τοιχοπλήρωσης και πλαισίου με τοπική ενίσχυση με πλέγμα ferrocement και επικάλυψη όλης της επιφάνειας με κονίαμα. Διεξάχθηκαν οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (Σχήμα 2.16) και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα υπό το φάσμα των μέγιστων φορτίων αντοχής, τρόπων αστοχίας, παραμορφοσιμότητας και πλαστιμότητας.



Σχήμα 2.16: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (Abdel-Hafez et al., 2015).

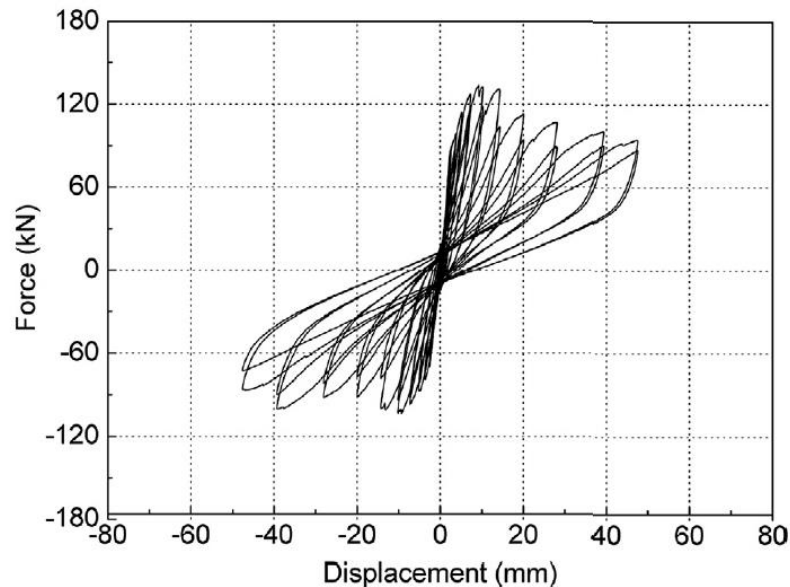
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Η ύπαρξη τοιχοπλήρωσης άλλαξε τη συμπεριφορά του πλαισίου, απέδωσε σχεδόν διπλάσια αντοχή και το μετέτρεψε σε διατμητικό τείχος.
- Η ενίσχυση με GFRP αύξησε σημαντικά την πλευρική αντοχή και η εφαρμογή πλέγματος ferrocement αύξησε το μέγιστο φορτίο, το φορτίο ρηγμάτωσης, την πλαστιμότητα και τη σκληρότητα του τοιχοπληρωμένου πλαισίου.
- Η αγκύρωση της τοιχοπλήρωσης στο περιβάλλον πλαίσιο μέσω των διατμητικών πείρων απέτρεψε την αποκόλλησή της από το πλαίσιο.
- Η ενίσχυση με ferrocement βελτίωσε την πλαστιμότητα και τα μέγιστα φορτία αντοχής.
- Σκυροδετώντας το πλαίσιο μετά το χτίσιμο της τοιχοπλήρωσης αύξησε το μέγιστο φορτίο αντοχής κατά 145% σε σύγκριση με το μη-τοιχοπληρωμένο. Επίσης αυτή η μέθοδος αύξησε την πλαστιμότητα και την δυσκαμψία κατά 33 και 195% αντίστοιχα.
- Η πλαστιμότητα παρατηρήθηκε η μέγιστη στην περίπτωση ενίσχυσης με ferrocement, ενώ το μέγιστο φορτίο αντοχής κατακτήθηκε με ενίσχυση με GFRP.

Οι Akhoundi et al. (2018) δημοσίευσαν μελέτη στην οποία εξετάζουν την συμπεριφορά τοιχοπληρωμένων πλαισίων σε εντός επιπέδου φόρτιση που συναντώνται σε κτίρια της νότιας Ευρώπης καθώς και την ενίσχυσή τους με IAM. Το πειραματικό πρόγραμμα περιλάμβανε τοιχοπληρωμένα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένα με εξωτερικά επικολλόμενα υλικά IAM. Τα πλέγματα ενίσχυσης ήταν ένα

εμπορικό υαλόπλεγμα και ένα σύνθετο πλέγμα που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο του πειράματος.

Πραγματοποιήθηκε κυκλική εντός επιπέδου φόρτιση μέσω υδραυλικού εμβόλου και οι μετακινήσεις στα διάφορα σημεία του πλαισίου λήφθηκαν μέσω LVDT's. Διεξάχθηκαν τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης (Σχήμα 2.17), σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα και αποδόθηκαν τα εξής συμπεράσματα:



**Σχήμα 2.17:** Βρόγχοι υστέρησης φορτίου-μετατόπισης (Akhoundi et al. 2018).

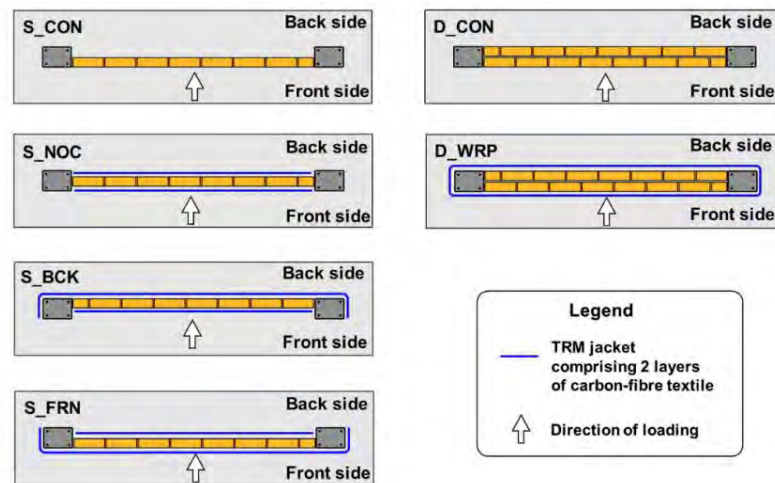
- Η παρουσία τοιχοπλήρωσης αύξησε την αρχική δυσκαμψία και την πλευρική αντοχή του πλαισίου κατά 5.2 έως 14 και 1.3 έως 1.9 φορές αντίστοιχα σε σύγκριση με το μη-τοιχοπληρωμένο πλαίσιο.
- Η μείωση της αντοχής των πλαισίων ξεκίνησε με την εμφάνιση ρωγμών και αυξήθηκε αφότου είχε επιτευχθεί η πλευρική αντοχή. Παρατηρήθηκε επίσης ότι ο ρυθμός μείωσης της δυσκαμψίας των τοιχοπληρωμένων πλαισίων ήταν σημαντικά μεγαλύτερος από ότι αυτός των μη-τοιχοπληρωμένων στα πρώτα στάδια της φόρτισης.
- Η παρουσία τοιχοπλήρωσης στο πλαίσιο περιόρισε σημαντικά την ποσότητα ζημιών που προκλήθηκαν από την εντός επιπέδου φόρτιση σε σύγκριση με το μη-τοιχοπληρωμένο.
- Η ενίσχυση με IAM αύξησε την πλευρική αντοχή και την αρχική δυσκαμψία των τοιχοπληρωμένων πλαισίων.

- Η χρήση των πλεγμάτων ενίσχυσης περιορίσε τις βλάβες στις τοιχοπληρώσεις, αφού παρατηρήθηκαν πολύ λιγότερες ρηγματώσεις στα πλαίσια ενισχυμένα με ΙΑΜ.
- Η αποτελεσματικότητα ενίσχυσης χρησιμοποιώντας το σύνθετο πλέγμα ήταν παρόμοια με αυτή με το εμπορικό υλικό, γεγονός το οποίο επικυρώνει τη χρήση του πρώτου ως υλικό ενίσχυσης.

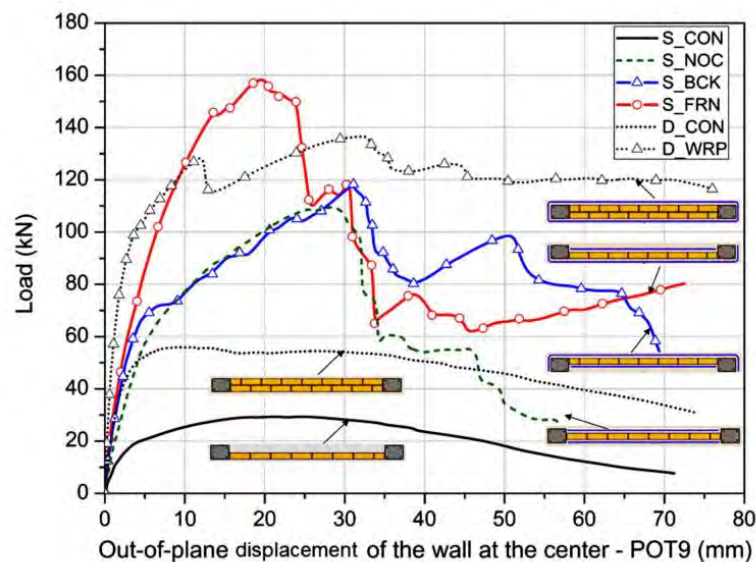
Όμοια με τους προηγούμενους ο Akhoundi αποδεικνύει τη σημαντικότητα των ενισχυμένων τοιχοπληρώσεων καθώς έτσι εξασφαλίζεται η αντοχή του καθολικού κτίσματος.

#### 2.1.2.7 Εκτός επιπέδου ενίσχυση

Εξίσου σημαντική είναι η ενίσχυση στην εκτός επιπέδου διεύθυνση. Οι Koutas και Bournas (2019) δημοσίευσαν την πειραματική τους έρευνα πάνω στην χρήση Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα σαν μέθοδος βελτίωσης της εκτός επιπέδου απόδοσης τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια ΟΣ, κατά τη διάρκεια φυσικών ή τεχνητών καταστροφικών γεγονότων (π.χ σεισμών, εκρήξεων). Το πειραματικό πρόγραμμα αποτελούνταν από έξι μονώροφα τοιχοπληρωμένα πλαίσια ΟΣ, μισής κλίμακας, εκ το οποίων και τα έξι δοκίμια καταπονήθηκαν σε εκτός επιπέδου μονοτονική φόρτιση με το φορτίο να διαμοιράζεται σε τέσσερα σημεία της τοιχοποιίας. Δύο από τα δοκίμια αποτέλεσαν δοκίμια «control», για το λόγο αυτό δεν ενισχύθηκαν, το ένα χτίστηκε με μονή στρώση οπτόπλινθων ενώ το δεύτερο με διπλή. Οι υπόλοιποι τέσσερεις ενισχύθηκαν πρώτα με υφάσματα άνθρακα (Σχήμα 2.18) και ύστερα φορτίστηκαν έως ότου επέλθει αστοχία. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν οι εξής: (1) η διατήρηση της σύνδεσης μεταξύ της τοιχοποιίας και των στοιχείων ΟΣ του πλαισίου και (2) το πάχος του τοίχου. Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται η συμπεριφορά του κάθε δοκιμίου.



**Σχήμα 2.18:** Οι διαφορετικοί τρόποι ενίσχυσης των τεσσάρων δοκιμών και η κατεύθυνση φόρτισης τους (Koutas & Bournas, 2019).



**Σχήμα 2.19:** Εκτός επιπέδου απόκριση των τοιχοπληρωμένων πλαισίων για έκκεντρη φόρτιση σε σχέση με τη μετατόπιση (Koutas & Bournas, 2019).

Μετά το πέρας των πειραμάτων αποδείχθηκε πως η απόδοση στην εκτός επιπέδου φόρτιση βελτιώθηκε δραματικά σε όλες τις περιπτώσεις των ενισχυμένων δοκιμών. Το ρίσκο περί αστοχίας μετριάστηκε από τη στιγμή που τα πλαίσια ΟΣ τοιχοπληρώθηκαν. Μερικά από τα συμπεράσματα ήταν:

- Ο προτεινόμενος τρόπος ενίσχυσης ήταν εξαιρετικά αποδοτικός στην αύξηση της εκτός επιπέδου αντοχής. Ο συντελεστής επιτυχίας της ενίσχυσης κυμαινόταν από το

3.79 στο 5.45 για τα δοκίμια με μονή στρώση οπτόπλινθων και κοντά στο 2.45 για τη διπλή στρώση.

- Η απορρόφηση ενέργειας των ενισχυμένων τοίχων αυξήθηκε από το 138% στο 261% σε σύγκριση με τα «control».
- Η υπολειπόμενη αντοχή των τοίχων μονής στρώσης αυξήθηκε μόνο όταν συνδέθηκαν με τα πλαίσια ΟΣ, περιορίζοντας ταυτόχρονα την πιθανότητα αστοχίας και ενισχύοντας την ελαστικότητα τέτοιων κατασκευών.

Συνεπώς η παραπάνω πειραματική έρευνα επέφερε θετικά αποτελέσματα για τα ενισχυμένα δοκίμια, παρέχοντας έτσι και στη βιβλιογραφία μία ακόμα πηγή πληροφοριών.

Η έρευνα των Furtado, Rodrigues, Arêde, et al. (2021), σχετιζόμενη με την εκτός επιπέδου ενίσχυση τοιχοπληρώσεων εμφανιζόμενων σε πλαίσια Ο.Σ, συνέβαλλε στην έμφαση της σημαντικότητας της ενίσχυσης των τοιχοπληρωμένων πλαισίων στις υφιστάμενες αλλά και νέες κατασκευές, καθώς και στην κατανόηση του πόσες δυσμενείς καταστάσεις μπορεί να αποφευχθούν χάριν αυτής.

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν 5 τοιχοπληρωμένα πλαίσια, μεγάλης κλίμακας, με σκοπό να εξεταστούν στην εκτός επιπέδου φόρτιση. Δύο από τα παραπάνω δεν ενισχύθηκαν (το ένα υποβλήθηκε σε αρχική φόρτιση ενώ το άλλο όχι), τα υπόλοιπα τρία ενισχύθηκαν με την τεχνική των IAM κάνοντας χρήση υαλοπλέγματος και τιμμεντοκονιάματος.

Δύο διαφορετικοί συνδυασμοί χρησιμοποιήθηκαν για τα τρία δοκίμια, οι διαφορές των οποίων είχαν να κάνουν με τον τύπο του υαλοπλέγματος (ισχυρό κι λιγότερο ισχυρό) και τα αγκύρια. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μια διαδικασία φόρτισης που ακολουθούσε το εξής μοτίβο «φόρτιση-αποφόρτιση-φόρτιση» στην εκτός επιπέδου κατεύθυνση. Το πέρας των πειραμάτων έφερε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Και οι δύο συνδυασμοί ενίσχυσης απέδωσαν πολύ καλά. Τα αγκύρια απέτρεψαν τις μετακινήσεις και την αστοχία μεταξύ του πλέγματος και του πλαισίου.
- Τα δοκίμια με το ισχυρό ύφασμα δεν εμφάνισαν μεγαλύτερη αντοχή από αυτά με το λιγότερο ισχυρό. Αυτό βέβαια δεν είναι απόλυτο καθώς χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τρόποι αγκύρωσης μεταξύ αυτών.
- Τα αποτελέσματα από τα ενισχυμένα δοκίμια έδειξαν ότι η ενίσχυση με την τεχνική των IAM αύξησε κατά 1.75-2.44 φορές τη μέγιστη αντοχή, 1.04-2.94 φορές το



μέγιστο φορτίο, μέχρι και 4 φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία, μέχρι και 2.72 φορές την ικανότητα παραμόρφωσης του πάνελ και βελτίωσε τη διασπορά της ενέργειας τουλάχιστον κατά 2 φορές, συγκρίνοντας με δείγματα που δοκιμάστηκαν σε παρόμοιες συνθήκες.

Γίνεται αντιληπτό, κρίνοντας από τις επιδόσεις και των δύο πειραμάτων, πως μια οικονομική ενίσχυση όπως είναι αυτή με τα IAM μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε κτίρια ΟΣ. Τα παραπάνω υποδεικνύουν πως τα σύνθετα υλικά μπορούν να διπλασιάσουν ή και να τριπλασιάσουν την αντοχή των τοίχων, ανάλογα φυσικά την ποιότητα των υλικών που θα κληθεί ο μηχανικός να επιλέξει και κρίνοντας πάντα από τη σημαντικότητα του προβλήματος που αντιμετωπίζει.

#### *2.1.2.8 Επιρροή της εντός επιπέδου βλάβης στην εκτός (ή το ανάποδο)*

Η αδυναμία των τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ έναντι εκτός επιπέδου φόρτισης μπορεί να επιφέρει ανυπολόγιστες ζημιές στα φέροντα στοιχεία και κατά συνέπεια στην κατασκευή. Αυτές θα προέλθουν από τις αδύναμες συνδέσεις μεταξύ της τοιχοποιίας και πλαισίου, τις χαμηλές μηχανικές ιδιότητες του ίδιου του τοίχου (κακής ποιότητας τσιμεντοκονίαμα, λανθασμένη κατασκευή κτλ.) ή εξαιτίας προηγούμενης φόρτισης του. Η τελευταία συνθήκη μπορεί να οφείλεται σε σεισμική διέγερση κατά την διεύθυνση του πλαισίου (εντός επιπέδου φόρτιση) και συνήθως εμφανίζεται στην βιβλιογραφία ως «εντός-εκτός επιπέδου αλληλεπίδραση». Όλες οι παραπάνω συνθήκες συνηθίζεται να παρουσιάζονται σε ήδη υπάρχοντα κτίρια ΟΣ, τα οποία χαρακτηρίζονται από λεπτούς τοίχους.

Πολύ πρόσφατα ξεκίνησε να ερευνείται πιο λεπτομερώς η επιρροή της εντός επιπέδου βλάβης στην εκτός. Στόχος είναι η έρευνα που αφορά την λεπτότητα του τοίχου, την σωστή αναλογία των διαστάσεων του, τα επίπεδα της βλάβης στην εντός επιπέδου φόρτιση (ή στην εκτός), τις οριακές συνθήκες, τους τεχνίτες, καθώς και άλλες παραμέτρους που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση.

Όσον αφορά την αποδοτικότητα των IAM έναντι της εκτός επιπέδου φόρτισης για τοιχοπληρώσεις οι βιβλιογραφικές αναφορές είναι λίγες και σχετικά πρόσφατες. Έως τώρα, μόνο λίγα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί, ειδικότερα εάν λάβουμε υπόψιν και την επιρροή της εντός επιπέδου βλάβης (ή το ανάποδο). Μάλιστα, εξαιτίας του μικρού αριθμού

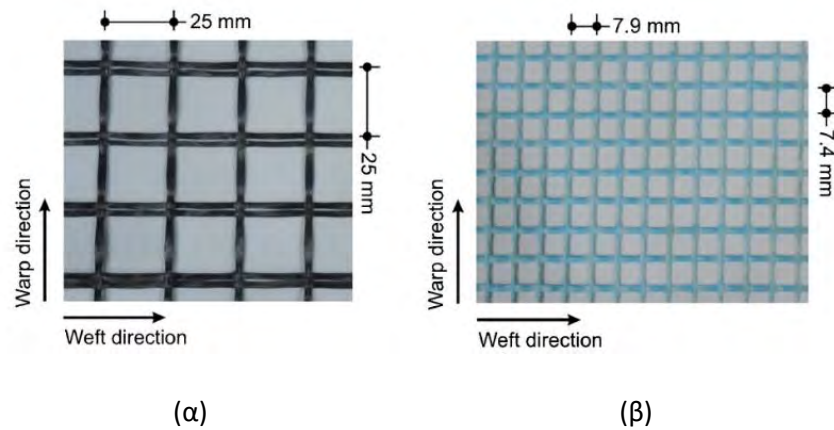
πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί είναι ελάχιστα και τα εργαλεία σχεδιασμού που υπάρχουν για αυτή την μέθοδο ενίσχυσης.

Οι Sagar et al. (2019) εξέτασαν την απόδοση έξι μονώροφων τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ, ενισχυμένων με ΙΑΜ και φορτισμένων στις δύο διευθύνσεις. Πέντε από τα δοκίμια ενισχύθηκαν με διαφορετικούς συνδυασμούς, διαφοροποιώντας τον τρόπο τοποθέτησης του υφάσματος (υαλόπλεγμα), την παρουσία αγκυρίων και τον προσανατολισμό του υφάσματος. Το έκτο δοκίμιο παρέμεινε δίχως ενίσχυση (δοκίμιο «control»). Στην συγκεκριμένη έρευνα ακολουθήθηκαν δύο τρόποι εφαρμογής των υφασμάτων: απευθείας εφαρμογή και εφαρμογή τύπου «sandwich». Για την φόρτιση των δοκιμίων ακολουθήθηκε ένα μοναδικό πρωτόκολλο κατά το οποίο εφαρμόστηκαν διαδοχικές και αργές κυκλικές μετατοπίσεις στην εντός επιπέδου διεύθυνση και κίνηση εδάφους κατά την εκτός επιπέδου διεύθυνση η οποία πραγματοποιήθηκε με τραπέζι ανακίνησης.

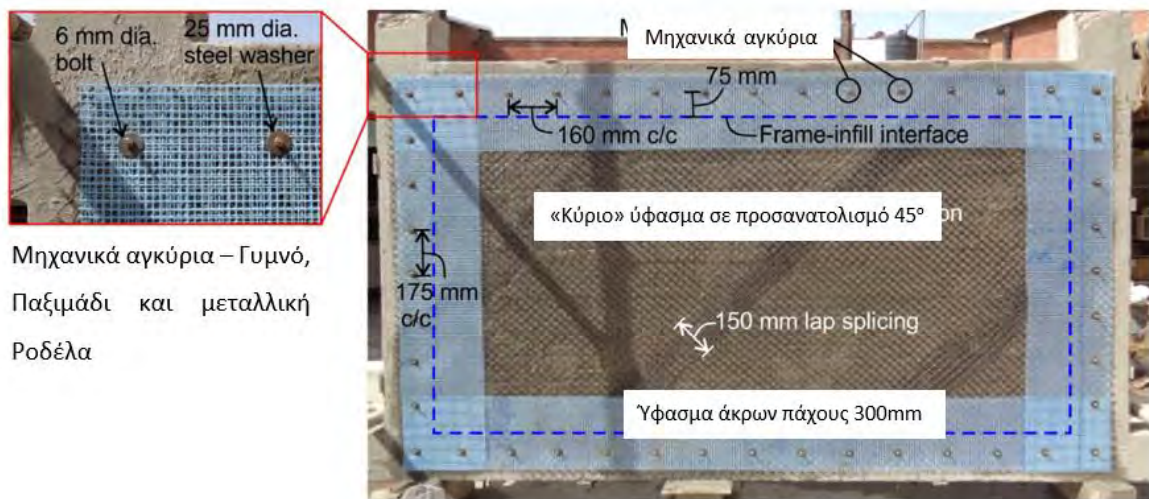
Η διαδικασία ενίσχυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20. Στο Σχήμα 2.21 απεικονίζονται οι δύο τύποι υφασμάτων (ένα «κύριο» για ολόκληρη την επιφάνεια και ένα για τις άκρες). Στο δοκίμιο του Σχήματος 2.22 παρουσιάζεται η τοποθέτηση των παραπάνω για προσανατολισμό του κύριου υφάσματος στις 45° και η διάταξη των μηχανικών αγκυρίων.



**Σχήμα 2.20:** Τοποθετήσεις υφάσματος: α) απευθείας και β) «sandwich» (Sagar et al., 2019).



**Σχήμα 2.21:** Υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν: α) σε όλη την επιφάνεια και β) στις άκρες (Sagar et al., 2019).



Μηχανικά αγκύρια – Γυμνό,  
Παξιμάδι και μεταλλική  
Ροδέλα

**Σχήμα 2.22:** Ενίσχυση με IAM ενός εκ των πέντε δοκιμίων (Sagar et al., 2019).

Οι καταπονήσεις των δοκιμίων ήταν επαναλαμβανόμενες από την εκτός στην εντός επιπέδου φόρτιση και ξανά από την αρχή έως ότου αστοχήσει το κάθε δοκίμιο. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά από τα αποτελέσματα του πειράματος:

- Το δοκίμιο «control» εμφάνισε πολλαπλές ρωγμές, λόγω της ψαθυρής του φύσης, κατά την εντός επιπέδου καταπόνηση και μεγάλες μετακινήσεις της τοιχοποιίας κατά την εκτός. Τα παραπάνω επιδεινώθηκαν από την απουσία μηχανικών αγκυρίων.

Στα ενισχυμένα δοκίμια:

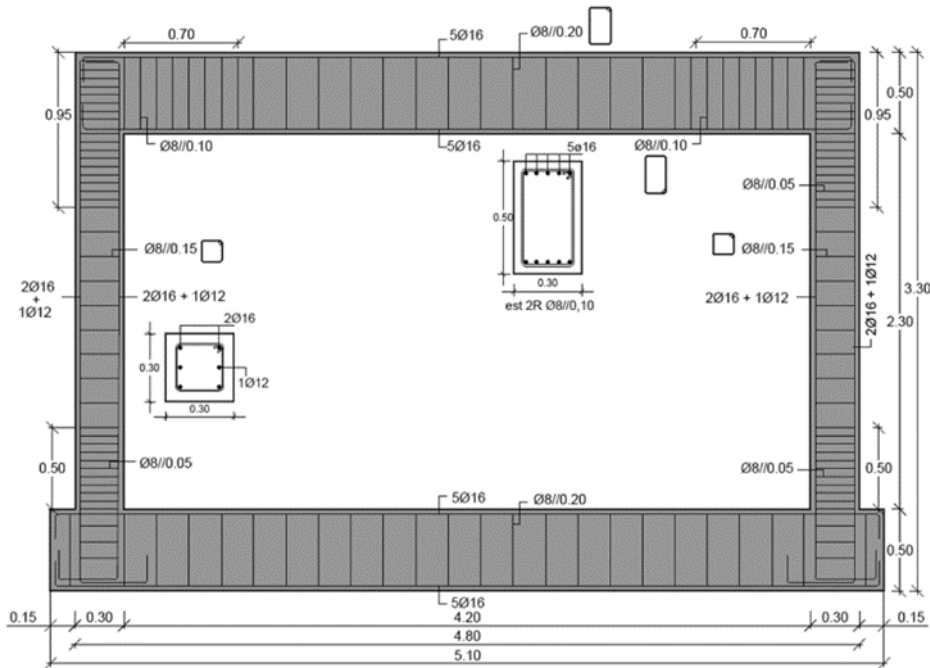
- Η απευθείας εφαρμογή εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα από την sandwich, καθώς το υαλόπλεγμα ενίσχυσε συνολικά την τοιχοποιία και δεν προσέφερε μονάχα αντοχή στο κονίαμα, όπως στην δεύτερη περίπτωση.
- Τα δοκίμια, στα οποία εφαρμόστηκε απευθείας το ύφασμα εμφάνισαν έως και 2.75% αντίσταση στις μετακινήσεις χωρίς να υποβαθμιστεί η αντοχή τους στην εντός επιπέδου φόρτιση.
- Τα δοκίμια που δεν αγκυρώθηκαν εμφάνισαν πρώιμη αστοχία, με αυτήν να επικεντρώνεται στις γωνίες τις τοιχοποιίας και τα άκρα των υποστυλωμάτων. Μάλιστα στα αγκυρωμένα δοκίμια η διάδοση της ενέργειας ήταν τρεις φορές περισσότερη σε σύγκριση με τα μη αγκυρωμένα.
- Οι τοιχοποιίες των τελευταίων εμφάνισαν και εξαιρετική εκτός επιπέδου σταθερότητα παρά την ήδη υπάρχουσα καταπόνηση τους κατά την εντός επιπέδου διεύθυνση, σε αντίθεση με τα μη αγκυρωμένα δοκίμια στα οποία εμφάνισαν μεγάλες μετακινήσεις, αστάθεια και μερική κατάρρευση.
- Τέλος η λοξή τοποθέτηση του υφάσματος σε σχέση με τις γωνίες του πλαισίου οδήγησε στην υπερβολική τάνυση του και κατά συνέπεια στην ελάττωση της συνολικής αντοχής του δοκιμίου, σε σύγκριση με τον ορθογώνιο προσανατολισμό του υφάσματος.

Για ακόμα μία φορά η έρευνα των Sagar et al. (2019) έκανε κατανοητό το γεγονός ότι σημασία δεν έχει μόνο η χρήση των κατάλληλων υλικών, αλλά και η σωστή εφαρμογή τους.

Οι De Risi et al. (2022) ερευνήσαν την επιρροή των IAM στην εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση πλαισιακών τοιχοπληρώσεων. Η μελέτη τους στόχευσε την βελτίωση των σημερινών πειραματικών δεδομένων και αφορά πειραματικές δοκιμές εκτός επιπέδου φόρτισης σε εμφανιζόμενη τοιχοποιία που έχουν ή όχι υποστεί προηγούμενη μερική εντός επιπέδου βλάβη, με ή χωρίς ενίσχυση με Ινοπλισμένα Πολυμερή.

Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τέσσερα δοκίμια: Τα δύο ήταν λεπτές τοιχοποιίες εμφανιζόμενες σε πλαίσια ΟΣ και τα άλλα δύο ήταν σαν τα προαναφερθέντα, ενισχυμένα όμως με τσιμεντοκονίαμα και εμποτισμένο ύφασμα υάλου δύο διευθύνσεων. Ένα ενισχυμένο κι ένα δοκίμιο χωρίς ενίσχυση υποβλήθηκαν σε εκτός επιπέδου φόρτιση,

ενώ η αντίστοιχη δυάδα φορτίστηκε πρώτα εντός και ύστερα εκτός επιπέδου. Οι διαστάσεις του πλαισίου καθώς και ο οπλισμός του παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.23.



**Σχήμα 2.23:** Οι διαστάσεις και οι λεπτομέρειες του πλαισίου ΟΣ (τα μήκη σε m; οι διάμετροι των οπλισμών σε mm) (De Risi et al., 2022).

Στα δοκίμια που πραγματοποιήθηκε εντός επιπέδου φόρτιση παρατηρήθηκε ότι τα IAM δεν επηρέασαν την αρχική δυσκαμψία των τοιχοπληρώσεων, πράγμα που μπορεί να αποδοθεί στην έκκεντρη τοποθέτηση του κονιάματος σε σχέση με το πλαίσιο. Από την άλλη, το μέγιστο φορτίο αυξήθηκε κατά 80%. Στα δύο δοκίμια παρατηρήθηκαν διαγώνιες ρωγμές και μετακίνηση της τοιχοποιίας από τη διεπαφή δοκού-τοιχώματος.

Όσον αφορά την εκτός επιπέδου φόρτιση, παρατηρήθηκε ότι οι μανδύες IAM αυξάνουν την αρχική δυσκαμψία έως και 5.33 φορές. Η μέγιστη εκτός επιπέδου αντοχή αυξήθηκε κατά 78% και 44%, για τα δοκίμια χωρίς προηγούμενη φόρτιση και με προηγούμενη φόρτιση, αντίστοιχα, με τη χρήση των σύνθετων υλικών. Η ενίσχυση με IAM παρείχε μεγαλύτερη ικανότητα στο διαμοιρασμό της ενέργειας, μάλιστα η διασπορά της ήταν από 50% έως 100% υψηλότερη από τα δοκίμια χωρίς ενίσχυση. Συνεπώς, η επιρροή της εντός επιπέδου βλάβης στην εκτός ήταν αναπόφευκτη, ωστόσο η ενίσχυση με το σύνθετο υλικό προσέδωσε στα δοκίμια την ανάλογη αντοχή και δυσκαμψία προκειμένου να αποφευχθεί η κατάρρευση.

Συνοπτικά η ενίσχυση των τοιχοπληρωμένων πλαισίων με μανδύες IAM λειτουργεί καταλυτικά στην βέλτιστη απόδοση των στοιχείων της κατασκευής κατά τις καταπονήσεις δύο διευθύνσεων. Η επιρροή της εκτός επιπέδου καταπόνησης στην εντός ή και το ανάποδο είναι εξαιρετικά επιβλαβής όταν το στοιχείο δεν φέρει την αντοχή και την πλαστιμότητα προκειμένου να απορροφήσει την ενέργεια που παράγεται κατά τη φόρτιση, με αποτέλεσμα αυτό να αστοχεί. Προς αποφυγή των παραπάνω λοιπόν δρουν τα συνθετικά υλικά και η ορθή τοποθέτηση τους. Ως διαπίστωση έρχεται πως με την πάροδο των χρόνων τα υλικά και οι τεχνικές πληθαίνουν προσφέροντας όχι μόνο αξιοπιστία προς τις νέες μεθόδους ενίσχυσης αλλά και το αίσθημα της ασφάλειας και της σιγουριάς για τις νέες, αλλά και τις παλαιότερες κατασκευές.

### **2.1.3 IAM με μήτρα γεωπολυμερούς**

Ως γνωστών, το τσιμέντο είναι ένα προϊόν το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως ως πρώτη ύλη στην κατασκευαστική βιομηχανία. Αποτελεί ένα από τα κύρια συστατικά του οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και των συνδετικών υλικών που συναντώνται στη βιομηχανία των κατασκευών, όπως τα κονιάματα. Το παραδοσιακό τσιμέντο τύπου Portland παράγεται χρησιμοποιώντας άσβεστο, πηλό κ.λπ. ως πρώτη ύλη, η επεξεργασία των οποίων γίνεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται διαπύρωση, η οποία απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες έως 1450°C. Η διαδικασία αυτή, έχοντας υψηλές απαιτήσεις ενέργειας και φυσικών πόρων, είναι μη φιλική προς το περιβάλλον και καθιστά την βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου μία από τις πλέον επιβλαβέστερες προς το περιβάλλον βιομηχανίες.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες μείωσης της διοχετευόμενης ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, με τις τιμές να αγγίζουν τα 640kg CO<sub>2</sub> για κάθε τόνο τσιμέντου. Σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση του υλικού, περίπου 4 δισεκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> και 7% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, εκτιμώνται ότι προέρχονται από την παραγωγή του τσιμέντου (Zhang et al., 2018). Είναι αναγκαίο επομένως να αναπτυχθεί ένα νέο υλικό, το οποίο θα αποτελεί υποκατάστατο του τσιμέντου και θα είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Κάποιοι ερευνητές έχουν δημιουργήσει νέα υλικά για αυτόν το σκοπό, με το γεωπολυμερές να αποτελεί αυτό με τις περισσότερες προοπτικές.

Ένα νέο αργιλοπυριτικό υλικό με τρισδιάστατη δικτυωτή δομή αναφέρθηκε αρχικά το 1979 από τον Davidovits, με το όνομα Γεωπολυμερές. Γενικά τα γεωπολυμερή σχηματίζονται ως παράγωγα των αλκαλικά ενεργοποιούμενων αλουμινο-πυριτικών υλικών, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου κ.λπ. Τα αλκαλικό διάλυμα που χρησιμοποιείται αποτελείται από πυριτικό νάτριο, υδροξείδιο του νατρίου και υδροξείδιο του καλίου. Η θερμοκρασία που απαιτείται για την ωρίμανση του υλικού είναι μεταξύ 60-100 °C για χρονικά διάστημα 24-28 ωρών, μετά το πέρας των οποίων το υλικό μπορεί να ωριμάσει σε θερμοκρασία δωματίου (Zhang et al., 2018).

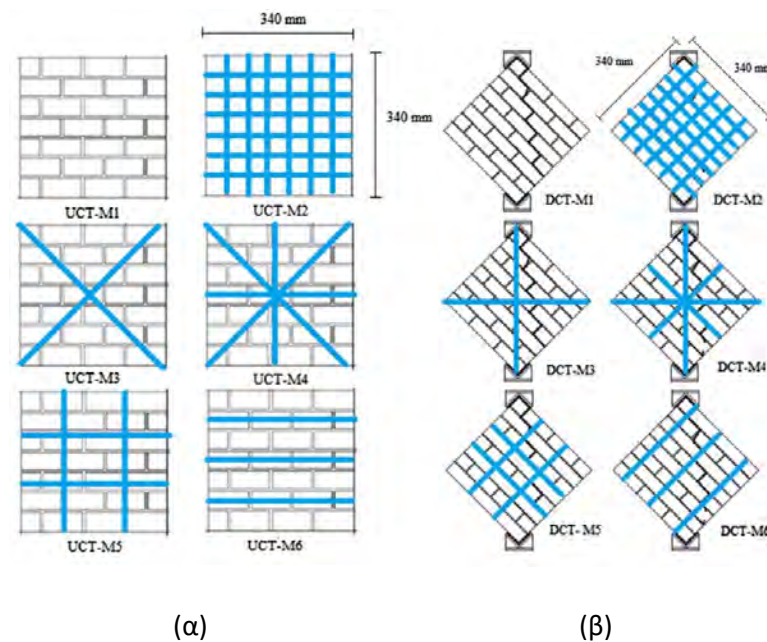
Σημαντικό είναι το γεγονός ότι υπάρχουν άφθονοι πόροι από τα υλικά που το απαρτίζουν καθώς και ότι η διαδικασία παραγωγής του έχει χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας και δεν προκαλεί υψηλή μόλυνση. Δεδομένης της συνεχόμενης αύξησης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, η ανάγκη για ένα βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό, όπως το γεωπολυμερές, είναι φανερή και επιτακτική. Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές έχουν στραφεί προς τη μελέτη του υλικού και την διερεύνηση των ιδιοτήτων του ως αντικατάστατο του τσιμέντου και των συναφών προϊόντων του, όπως τα τσιμεντοειδή κονιάματα.

Οι Zhang et al. (2018) δημοσίευσαν έρευνα στην οποία γίνεται ανασκόπηση, μέσα από 119 πρόσφατα και παρελθοντικά δημοσιεύματα, των ιδιοτήτων των γεωπολυμερών κονιαμάτων, σε υδαρή (εργασιμότητα, χρόνος ωρίμανσης, θερμοκρασία) και σκληρυσμένη φάση τα οποία είχαν παρασκευαστεί με ποικίλες πρώτες ύλες (ιπτάμενη τέφρα, μετακαολίνη, καολίνη, ηφαιστειακή τέφρα, αερόψυκτη σκωρία, σκωρία χάλυβα, αλεσμένος περλίτης, απόβλητα πυριτίου κ.α). Έγινε ανασκόπηση των φυσικών, μηχανικών ιδιοτήτων (θλιπτική, εφελκυστική, καμπτική αντοχή, ελαστικότητα, συνάφεια κ.α), των ιδιοτήτων ανθεκτικότητας (ανθεκτικότητα σε οξέα, σε υψηλές θερμοκρασίες, σε παγετό, απορρόφηση νερού και συρρίκνωση) καθώς επίσης αναλύθηκε και η μικροδομή του υλικού.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι το κονίαμα γεωπολυμερούς έχει σημαντικές προοπτικές εφαρμογής στην κατασκευαστική βιομηχανία, ως ένα υλικό φιλικό προς το περιβάλλον και κατάλληλο να αντικαταστήσει τα τσιμεντοειδή κονιάματα στο μέλλον.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από τις πειραματικές έρευνες που έχουν διεξαχθεί, στις οποίες το γεωπολυμερές αντικαθιστά το μέχρι τώρα συμβατό τσιμεντοκονίαμα στις ενισχύσεις κατασκευών με IAM.

Οι Maras και Kose (2021) διερεύνησαν πειραματικά την συμπεριφορά τοιχοσωμάτων φέρουσας τοιχοποιίας ενισχυμένων με γεώπλεγμα και κονίαμα γεωπολυμερούς, υπό θλιπτική καταπόνηση. Κατασκευάστηκαν στο σύνολο έξι τοιχοσώματα, με λίθους από ήδη υπάρχοντα ανακαινισμένα κτίρια. Τα υλικά ενίσχυσης ήταν, ένα κονίαμα γεωπολυμερούς, από ιπτάμενη τέφρα, αλκαλικό διάλυμα (NaOH) και ίνες πολυπροπυλενίου και ένα γεώπλεγμα πολυπροπυλενίου. Οι τοιχίσκοι ενισχύθηκαν με διαφορετικούς τρόπους εφαρμογής του πλέγματος και υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάθετη και διαγώνια μονοαξονικής θλίψης (Σχήμα 2.24). Από την κάθετη καταπόνηση αξιολογήθηκαν η αντοχή και η πλαστιμότητα των δοκιμίων, ενώ από την διαγώνια, η διατμητική τους αντοχή. Το φορτίο ασκήθηκε μέσω ενός υδραυλικού εμβόλου και οι μετατοπίσεις μετρήθηκαν από LVDT's τα οποία τοποθετήθηκαν στις όψεις των δοκιμίων και στις κατάλληλες θέσεις.



**Σχήμα 2.24:** Γεωμετρία και τρόποι ενίσχυσης δοκιμίων: (α) κάθετη και (β) διαγώνια δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Maras & Kose, 2021).

Από τα αποτελέσματα του πειράματος διεξάχθηκαν καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης και αντλήθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

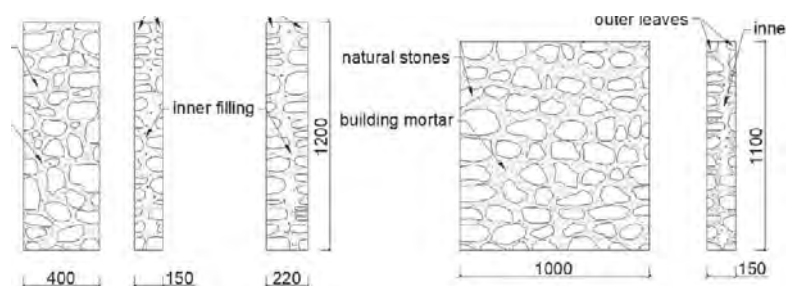
- Σε όλες τις περιπτώσεις ενίσχυσης, τα ενισχυμένα δοκίμια επέδειξαν υψηλότερη αντοχή, πλαστιμότητα και απορρόφηση ενέργειας.
- Η αντοχή ενός ενισχυμένου δοκιμίου σχεδόν διπλασιάστηκε σε σύγκριση με το μη ενισχυμένο.



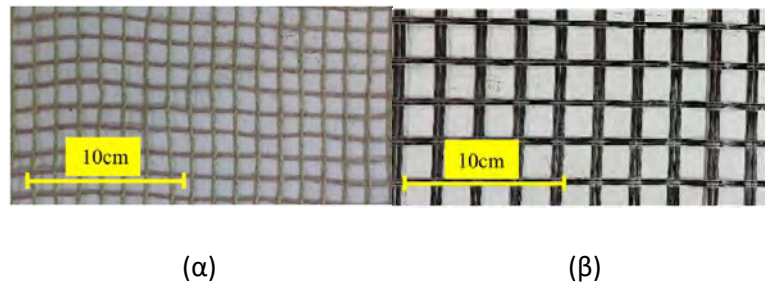
- Δεν παρουσιάσθηκαν απότομες ρηγματώσεις μετά το πέρας το μέγιστου φορτίου αντοχής.
- Η πλαστιμότητα των ενισχυμένων δοκιμίων αυξήθηκε σημαντικά και το σύνθετο υλικό “συγκρατούσε” τον τοιχίσκο μετά την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών.

Οι Maras & Kose (2021) προτείνουν την χρήση κωνιαμάτων γεωπολυμερικής σύστασης ως υλικά ενίσχυσης, στο πλαίσιο μίας εναλλακτικής λύσης για βιώσιμα κτίρια, καθώς βελτιώνουν σημαντικά την δομική απόδοση των κατασκευών και είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

Ο Gkournelos et al. (2022) μελέτησαν την ενίσχυση στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας με IAM και κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης σε εντός και εκτός επιπέδου φόρτιση. Κατασκευάσθηκαν στο σύνολο 14 διαφορετικών διαστάσεων τοίχοι φέρουσας τοιχοποιίας, από λίθους φυσικής προέλευσης και συμβατικό συνδετικό κονίαμα (Σχήμα 2.25). Τα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με τις διαστάσεις τους και υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση εντός ή εκτός επιπέδου τριών σημείων και σε εντός επιπέδου διατμητική καταπόνηση, με ταυτόχρονη επιβολή αξονικού φορτίου. Η ενίσχυση έγινε με δύο διαφορετικούς τύπους IAM. Ο πρώτος τύπος περιλάμβανε πλέγμα από ίνες λιναριού και υδραυλικό ασβεστοκονίαμα (NTRM), όντας υλικά φυσικής προέλευσης και ο δεύτερος τύπος ενίσχυσης αποτελούταν από κονίαμα μετακαολίνης και σκωρίας υψικαμίνου, όντας γεωπολυμερές και επικαλυμμένο πλέγμα από βασάλτη (AATRM) (Σχήμα 2.26). Το επιβαλλόμενο φορτίο ασκούταν μέσω υδραυλικού εμβόλου και οι μετατοπίσεις στα σημεία ενδιαφέροντος καταγράφονταν μέσω ενός βιντεοεκτενόμετρου και ποτενσιόμετρου.



**Σχήμα 2.25:** Γεωμετρία δοκιμίων (Gkournelos et al., 2022).



**Σχήμα 2.26:** Πλέγμα από ίνες: (α) λιναριού και (β) βασάλτη (Gkournelos et al., 2022).

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν δημιουργήθηκαν καμπύλες φορτίου-μετατόπισης, σχολιάσθηκαν τα μέγιστα φορτία αντοχής, οι μετατοπίσεις, η κατανάλωση ενέργειας και οι τρόπος αστοχίας και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Η ενίσχυση με AATRM αύξησε σημαντικά την αντοχή και την δυσκαμψία των δοκιμίων. Παρατηρήθηκε όμως αστοχία σε σύντομο χρονικό διάστημα λόγω αποδυνάμωσης του πλέγματος βασάλτη εξαιτίας της επαφής του με το αλκαλικό περιβάλλον του γεωπολυμερούς. Αυτό υποδεικνύει ότι η επικάλυψη του πλέγματος δεν επέφερε μεγάλη ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον και προτείνεται η χρήση πλεγμάτων με εγγυημένη αντοχή σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα.
- Η ενίσχυση με NTRM βελτίωσε αρκετά την αντοχή, τη δυσκαμψία και την απορρόφηση ενέργειας. Οι ίνες του πλέγματος δεν ενεργοποιήθηκαν πλήρως και παρατηρήθηκε ολίσθηση τους στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί με την επικάλυψη του πλέγματος με κάποιο κατάλληλο και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό.

Ο Gkournelos et al. (2022) καταλήγουν στο ότι η χρήση καινοτόμων υλικών φιλικών προς το περιβάλλον, όπως το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, στην ενίσχυση τοιχοποιίας με IAM, αποτελεί μία υποσχόμενη λύση και έχει σημαντικές προοπτικές για μελλοντική έρευνα

## 2.2 Συνδυασμένη σεισμική-ενεργειακή αναβάθμιση

Σύμφωνα με τον Pohoryles et al. (2020), οι κτιριακές κατασκευές ευθύνονται για το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης και το 38% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην

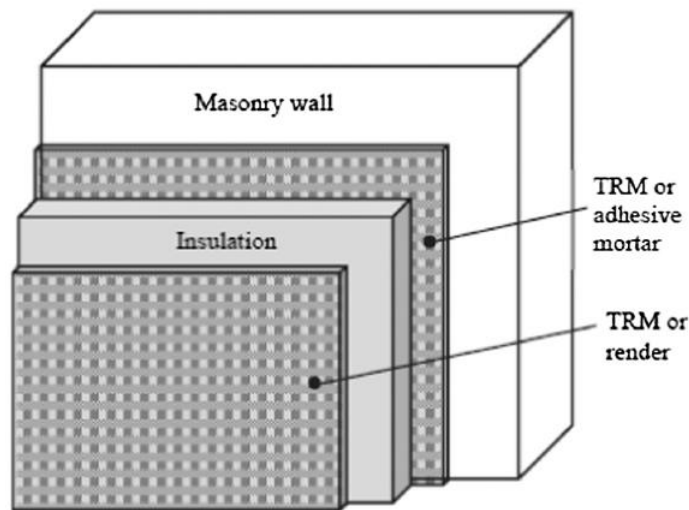
Ευρωπαϊκή Ένωση, με τα μεγαλύτερα ποσοστά αυτών των τιμών να προέρχονται από τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων. Δεδομένου ότι οι εξωτερικές τοιχοπληρώσεις αποτελούν το σημαντικότερο διαχωριστικό μέσο μεταξύ του εσωτερικού χώρου ενός κτιρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, είναι υπεύθυνες για την θερμική και ακουστική μόνωση αυτού. Η θερμομονωτική ικανότητα μιας τοιχοπλήρωσης επηρεάζει σημαντικά τις ανάγκες ψύξης και θέρμανσης ενός χώρου και επομένως την ποσότητα της ενέργειας που θα καταναλώσει. Συνεπώς, η ύπαρξη μιας μονωμένης τοιχοπλήρωσης με αποτελεσματική θερμομόνωση που να ανταποκρίνεται στις σημερινές ενεργειακές ανάγκες κρίνεται απαραίτητη για την βιωσιμότητα ενός κτιρίου.

Από την άλλη, έχει δειχθεί ότι οι τοιχοπληρώσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στην καθολική απόκριση ενός κτιρίου σε πλευρικές δράσεις, όπως ο σεισμός, με τα πιο κοινά χαρακτηριστικά να είναι η αύξηση της πλευρικής δυσκαμψίας του κτιρίου και η μείωση των απαιτήσεων παραμόρφωσης, η αύξηση της πλευρικής αντοχής των ορόφων κ.α. Από παρατήρηση των τοιχοπληρώσεων σε μεγάλα σεισμικά γεγονότα έχει αποδειχθεί ότι οι πρώτες είναι άμεσα υπεύθυνες για ζημιές και καταρρεύσεις κτιρίων Ο.Σ (Masi et al., 2019). Το αντίκτυπο των τοιχοπληρώσεων στα κόστη των μετασεισμικών επισκευών ενός κτιρίου υπολογίζεται ότι είναι περίπου το 50% του συνολικού κόστους επισκευής (De Risi et al., 2020). Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων έναντι σεισμού, είναι κρίσιμης σημασίας για ένα κτίριο.

Οι σύγχρονες απαιτήσεις ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων σε συνδυασμό με την ανάγκη για σεισμική προστασία και ενίσχυση, υποδεικνύουν μία συνδυασμένη ενεργειακή και δομική αναβάθμιση, η οποία μπορεί να επιτευχθεί από την εφαρμογή ήδη υπάρχοντων τεχνικών (Furtado et al., 2022). Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα έχει δείξει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτόν τον κλάδο και πολλές μελέτες διερευνούν την αποτελεσματικότητα, το κόστος, τη διαδικασία εφαρμογής, τα υλικά και άλλες σημαντικές παραμέτρους που αφορούν μεθόδους ταυτόχρονης σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες δημοσιεύσεις σχετικά με πειραματικές εφαρμογές συνδυαστικών τεχνικών ενίσχυσης με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

Οι Triantafyllou et al. (2017) υλοποίησαν πειραματικό πρόγραμμα, ο σκοπός του οποίου ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς τοιχοσωμάτων φέρουσας τοιχοποιίας, ενισχυμένων με TRM και ταυτόχρονη εφαρμογή θερμομόνωσης (Σχήμα 2.27).

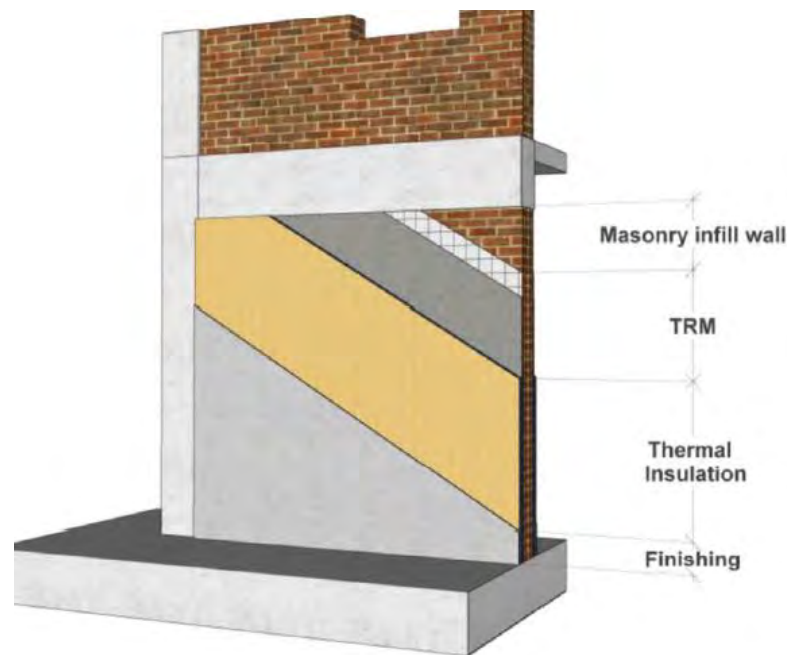
Κατασκευάστηκαν δεκαεπτά τοιχίσκοι διαστάσεων 1500x400x85mm (ύψοςxπλάτοςx πάχος). Τα υλικά ενίσχυσης ήταν επικαλυμμένο με ρητίνη υαλόπλεγμα, τσιμεντοειδές κονίαμα με πολυμερή και θερμομονωτικό υλικό. Ο συνδυασμός εφαρμογής πλέγματος και μονωτικού υλικού έγινε με βάση τις υπό διερεύνηση παραμέτρους: κονίαμα, ανθεκτικό ή μη στη φωτιά, αμφίπλευρη ή μονόπλευρη εφαρμογή μόνωσης και πλέγματος, τρόπος διαστρωμάτωσης μόνωσης και πλέγματος και το πάχος του μονωτικού υλικού. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική εκτός επιπέδου φόρτιση με τη μορφή κάμψης τριών σημείων. Η φόρτιση ασκούταν μέσω κάθετου υδραυλικού εμβόλου και οι βυθίσεις στο μέσον του ανοίγματος μέσω LVDT. Κάποια από τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή φωτιάς. Δημιουργήθηκαν καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης και προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα.



**Σχήμα 2.27:** Προτεινόμενη τοποθέτηση συνδυασμού μονωτικού υλικού με TRM (Triantafyllou et al., 2017).

Η συνδυαστική εφαρμογή TRM και μονωτικού υλικού αποδείχθηκε καλύτερη από την χρήση μόνο TRM, όσον αφορά την αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης των δοκιμίων που δεν υποβλήθηκαν σε τεστ φωτιάς. Στην περίπτωση φωτιάς, αποτελεσματικότερο είναι το πλέγμα να τοποθετηθεί πριν το μονωτικό υλικό. Το πάχος του μονωτικού υλικού επηρεάζει θετικά. Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η ενίσχυση με TRM μπορεί να συνδυαστεί αποτελεσματικά με θερμομόνωση, η οποία μπορεί να είναι και αντιπυρική και θεωρούν ότι αποτελεί μια εξαιρετικά υποσχόμενη λύση για συνδυασμένη σεισμική-ενεργειακή αναβάθμιση.

Ο Pohoryles et al. (2020) διεξήγαγαν έρευνα στην οποία διερευνούν την συνδυασμένη σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση διαφόρων κτιρίων (διαφορετικός τύπος, χρονολογία) σε είκοσι Ευρωπαϊκές πόλεις με διαφορετικές σεισμικές (5 ζώνες) και κλιματολογικές (4 ζώνες) συνθήκες. Συνδυάζονται ταυτόχρονα θερμική μόνωση (πολυστερίνη ή ορυκτοβάμβακας) και σύνθετα υλικά IAM (ινοπλέγματα άνθρακα, υάλου ή βασάλτη και τσιμεντοειδές κονίαμα) στο κέλυφος του κτιρίου (Σχήμα 2.28), με σκοπό να επιτευχθούν οι επιθυμητοί ενεργειακοί και δομικοί στόχοι.



**Σχήμα 2.28:** Συνδυασμός IAM και θερμομόνωσης (Pohoryles et al., 2020).

Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι με τους κατάλληλους ρυθμούς αναβάθμισης των κτιρίων, η απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη μπορεί να μειωθεί μέχρι και 32.5%, γεγονός που μπορεί να αποφέρει περίπου 30% μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> μέχρι το έτος 2030. Επίσης ο ταυτόχρονος συνδυασμός σεισμικής και ενεργειακής αναβάθμισης, ιδιαίτερα σε χώρες υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας, αποδείχθηκε οικονομικότερος σε σύγκριση με ξεχωριστές παρεμβάσεις.

Ο Furtado et al. (2022) διεξήγαγαν πειραματική έρευνα στην οποία διερεύνησαν την καμπτική συμπεριφορά ενεργειακά βελτιωμένων τοιχοπληρώσεων ενισχυμένων με IAM με εφαρμογή σε νέες κατασκευές. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν οκτώ τοίχοι

διαστάσεων 1000x600mm (ύψοςxπλάτος), από μπλοκ ελαφροσκυροδέματος με θερμομονωτικές ιδιότητες. Τα υλικά ενίσχυσης αποτελούνταν από υαλόπλεγμα, πλέγμα πολυπροπυλενίου, τσιμεντοκονίαμα καθώς χρησιμοποιήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις και μεταλλικοί πείροι ως μέσον αγκύρωσης του πλέγματος. Η εφαρμογή των τρόπων ενίσχυσης έγινε έτσι ούτως ώστε, να συγκριθούν τα δύο πλέγματα μεταξύ τους καθώς και να εξετασθεί η επιρροή της χρήση αγκύρωσης. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εκτός επιπέδου φόρτιση και χρησιμοποιήθηκαν LVDT's για την λήψη των μετακινήσεων.

Τα αποτελέσματα παρουσιάσθηκαν στην μορφή καμπύλων δύναμης-μετατόπισης και παρατηρήθηκαν οι μορφές αστοχίας. Τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν ήταν τα εξής:

- Η χρήση του ισχυρότερου πλέγματος ενίσχυσης (υαλόπλεγμα) αύξησε την αρχική δυσκαμψία του τοίχου από 3.59 έως 4.76 φορές σε σύγκριση με τον τοίχο με το λιγότερο ισχυρό πλέγμα (πολυπροπυλενίου). Η χρήση αγκυρώσεων αύξησε επίσης την δυσκαμψία.
- Η εκτός επιπέδου αντοχή αυξήθηκε χρησιμοποιώντας υαλόπλεγμα, κατά 51% και 130% σε σύγκριση με το πλέγμα πολυπροπυλενίου, χωρίς και με αγκυρώσεις, αντίστοιχα.
- Βελτιώθηκαν τα καμπτικά χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκιμίων από 35 έως 210% σε σύγκριση με τα μη ενισχυμένα.
- Η χρήση αγκυρώσεων μείωσε τις παραμορφώσεις στο στάδιο αστοχίας κατά 57%.
- Οι ρηγματώσεις ήταν κυρίως οριζόντιες καμπτικές και εμφανίστηκαν μόνο στην περιοχή των οριζόντιων αρμών. Παρατηρήθηκε αποκόλληση μεταξύ των οριζόντιων αρμών και των μπλοκ της τοιχοποιίας, ενώ η ολική απώλεια αντοχής επήλθε με την αστοχία του πλέγματος.

Από τα παραπάνω γίνονται αντιληπτά τα πλεονεκτήματα της συνδυαστικής εφαρμογής IAM και θερμομονωτικού υλικού, τόσο στις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που προσδίδουν, όπως αύξηση αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης, όσο και στο μακροχρόνιο οικονομικό όφελος που προσφέρουν.

## Κεφάλαιο 3 Πειραματικό πρόγραμμα

### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας. Το πειραματικό πρόγραμμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξήχθη στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, κατά το διάστημα Μάιος 2022-Ιανουάριος 2023. Αντικείμενο της εργασίας ήταν η διερεύνηση της εκτός επιπέδου συμπεριφοράς ενισχυμένων τοιχοσωμάτων και της εντός-εκτός επιπέδου απόκρισης τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ. Για τον σκοπό αυτό, ενισχύθηκαν μεμονωμένα τοιχοσώματα με τα σύνθετα υλικά ΙΑΜ και κατασκευάστηκε, υπό κλίμακα, τοιχοπληρωμένο πλαίσιο ΟΣ. Το πείραμα χωρίστηκε σε δύο μέρη:

- Διερεύνηση της αποδοτικότητας συστημάτων ενίσχυσης ΙΑΜ με βάση κονίαμα τιμμεντοειδούς και γεωπολυμερικής σύστασης, με παρουσία ή όχι θερμομονωτικού υλικού, σε τοιχοσώματα.
- Μελέτη της συμπεριφοράς τοιχοπληρωμένου πλαισίου σε εκτός επιπέδου φόρτιση. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε:
  - Εκτός επιπέδου φόρτιση τοιχοπλήρωσης.

### 3.2 Δοκιμές εκτός-επιπέδου κάμψης τοιχοσωμάτων

Σε αυτή την ενότητα του Κεφαλαίου 3 παρουσιάζονται αναλυτικά, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και ενίσχυση των τοιχοσωμάτων καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες, η διαδικασία προετοιμασίας και ενίσχυσης και η λεπτομερής πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε, με σκοπό την εκτός επιπέδου φόρτιση.

### 3.2.1 Παράμετροι υπό διερεύνηση και παρουσίαση δοκιμών

Σκοπός των δοκιμών ήταν η διερεύνηση της αποδοτικότητας διαφορετικών συστημάτων ενίσχυσης με ΙΑΜ, εφαρμοσμένων σε τοιχοσώματα τα οποία υποβλήθηκαν σε εκτός επιπέδου κάμψη τριών σημείων. Οι παράμετροι υπό διερεύνηση ήταν:

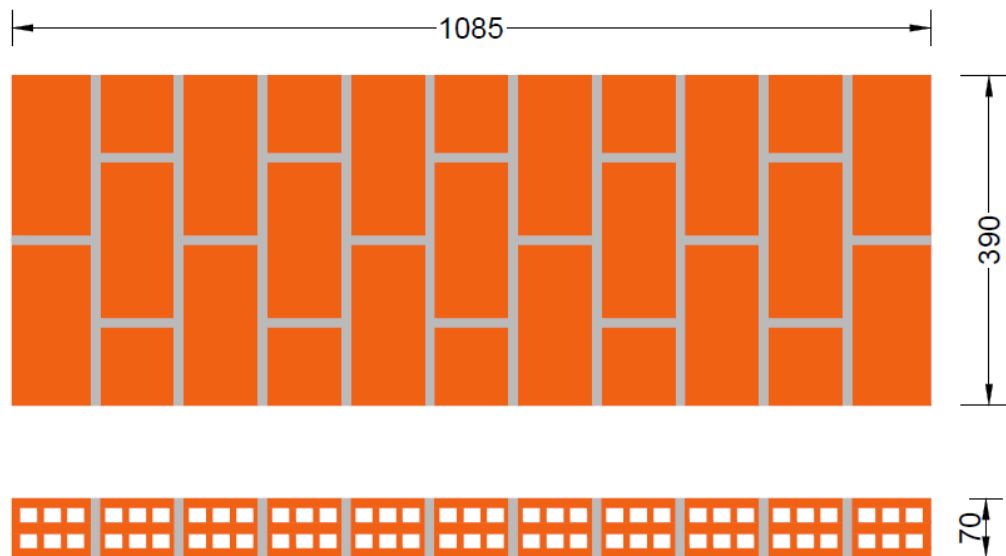
- Το κονίαμα ενίσχυσης, ένα τσιμεντοειδούς σύστασης και ένα γεωπολυμερικής.
- Τα ινοπλέγματα ενίσχυσης από δύο διαφορετικά υλικά, ένα από ίνες βασάλτη και ένα από ίνες υάλου.
- Η ύπαρξη θερμομονωτικού υλικού (γραφιτούχα διογκωμένη πολυστερίνη) σε συνδυασμό με τα παραπάνω κονιάματα και ινοπλέγματα.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα συνολικά τοιχοσώματα διαστάσεων 1085mmx390mmx70mm (μήκοςxπλάτοςxπάχος) (Σχήμα 3.1). Η ονοματολογία των δοκιμών έχει τη μορφή OOP\_WALL\_W-X-N, όπου:

- W δηλώνει το είδος του κονιάματος (CEM για το τσιμεντοειδές και GEO για το γεωπολυμερές),
- X το υλικό του πλέγματος ενίσχυσης (G για το υαλόπλεγμα και B για το πλέγμα από βασάλτη)
- N τον αριθμό των στρώσεων πλέγματος (2 για διπλή στρώση, 1/2 για μονωτικό υλικό και δύο στρώσεις πλέγματος, 1/1 για μία στρώση πλέγματος-μονωτικό υλικό-στρώση πλέγματος, αναφερόμενη και ως ενίσχυση τύπου *sandwich*).

Έτσι, το δοκίμιο με όνομα OOP\_WALL\_GEO-G-1/1 αναφέρεται σε τοιχίσκο ενισχυμένο με κονίαμα γεωπολυμερούς, 2 στρώσεις υαλοπλέγματος με ενδιάμεσο μονωτικό υλικό, ενώ αυτό με όνομα OOP\_WALL\_CEM-B2, σε ενίσχυση με τσιμεντοκονίαμα και πλέγμα από βασάλτη. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η ονοματολογία όλων των τοιχοσωμάτων και οι μορφές ενίσχυσης.





Σχήμα 3.1: Απεικόνιση τοιχοσωμάτων: α) κάτοψη; β) πλάγια όψη, διαστάσεις σε mm.

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμίων και μορφές ενίσχυσης.

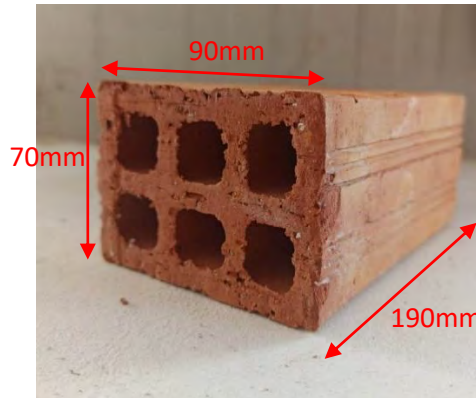
Αριθμός δοκιμίου	Ονομασία δοκιμίου	Ανόργανη μήτρα κονιάματος	Αριθμός στρώσεων IAM, τύπος ινοπλέγματος,	Εφαρμογή θερμομόνωσης
1	OOP_WALL_GEO-G2	Γεωπολυμερές	2 x υαλόπλεγμα	( - )
2	OOP_WALL_GEO-B2	Γεωπολυμερές	2 x βασάλτη	( - )
3	OOP_WALL_CEM-G2	Τσιμεντοειδές	2 x υαλόπλεγμα	( - )
4	OOP_WALL_CEM-B2	Τσιμεντοειδές	2 x βασάλτη	( - )
5	OOP_WALL_GEO-G-I2	Γεωπολυμερές	2 x υαλόπλεγμα	Πριν τις στρώσεις IAM
6	OOP_WALL_GEO-B-I2	Γεωπολυμερές	2 x βασάλτη	Πριν τις στρώσεις IAM
7	OOP_WALL_CEM-G-I2	Τσιμεντοειδές	2 x υαλόπλεγμα	Πριν τις στρώσεις IAM
8	OOP_WALL_CEM-B-I2	Τσιμεντοειδές	2 x βασάλτη	Πριν τις στρώσεις IAM
9	OOP_WALL_GEO-G-111	Γεωπολυμερές	2 x υαλόπλεγμα	Ενδιάμεσα των στρώσεων IAM
10	OOP_WALL_GEO-B-111	Γεωπολυμερές	2 x βασάλτη	Ενδιάμεσα των στρώσεων IAM
11	OOP_WALL_CEM-G-111	Τσιμεντοειδές	2 x υαλόπλεγμα	Ενδιάμεσα των στρώσεων IAM
12	OOP_WALL_CEM-B-111	Τσιμεντοειδές	2 x βασάλτη	Ενδιάμεσα των στρώσεων IAM

### 3.2.2 Υλικά

#### Οπτόπλινθοι

Για την κατασκευή των τοιχοσωμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάτρητοι εξάοποι οπτόπλινθοι με διαστάσεις 70mmx90mmx190mm (πάχοςxπλάτοςxμήκος) (Σχήμα 3.2) και μηχανικές ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 3.2 . Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε για το χτίσιμο τους ήταν από τσιμέντο, άμμο, ασβέστη και νερό σε αναλογίες 1:5:1:0.787 αντίστοιχα, κατά βάρος. Το πάχος των αρμών μεταξύ των οπτόπλινθων ήταν περίπου 10mm. Κατά το χτίσιμο του δοκιμίου λήφθηκε ποσότητα του κονιάματος και τοποθετήθηκε σε καλούπια

διαστάσεων 40x40x160mm. Τα πρισματικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων και τα δύο τεμάχια που προέκυψαν από την θραύση της πρώτης δοκιμής, σε δοκιμή θλίψης. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη και της θλιπτικής αντοχής των οπτόπλινθων και του κονιάματος χτισίματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.2: Διαστάσεις διάτρητου οπτόπλινθου έξι οπών.

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες οπτόπλινθων και κονιάματος.

Ιδιότητες	Οπτόπλινθοι		Κονίαμα
Θλιπτική αντοχή (MPa)	Κατά μήκος	15,5	8,2
	Κατά πλάτος	7,1	
Εφελκυστική αντοχή από κάμψη (MPa)	(-)		1,9

### Κονιάματα Ενίσχυσης

Για την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά κονιάματα, ένα τσιμεντοειδούς σύστασης και ένα γεωπολυμερικής. Το κονίαμα το οποίο αναφέρεται ως CEM στην ονοματολογία των δοκιμών, ήταν ένα εμπορικά διαθέσιμο, έτοιμο προς χρήση, ενός συστατικού, ινοπλισμένο τσιμεντοειδές κονίαμα με ποζολανικά συστατικά. Το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, το οποίο αναφέρεται ως GEO, αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και αποτελούταν από πυριτικό κάλιο και μετακαολίνη, ίνες πολυπροπυλενίου και διαβαθμισμένα θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή κοκκομετρίας μικρότερης του 1mm. Οι κατά βάρος αναλογίες ανάμειξης των δύο κονιαμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 και Πίνακα 3.4 αντίστοιχα. Η ανάμειξη και των δύο κονιαμάτων έγινε με τη βοήθεια μηχανικού αναδευτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Κατά την διαδικασία εφαρμογής της ενίσχυσης, λήφθηκε υλικό των δύο κονιαμάτων και τοποθετήθηκε σε καλούπια διαστάσεων 40x40x160mm. Τα πρισματικά δοκίμια

υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων και σε δοκιμή θλίψης. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη και της θλιπτικής αντοχής που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5 και Πίνακα 3.6.

**Πίνακας 3.3:** Αναλογίες ανάμειξης τσιμεντοειδούς κονιάματος.

Τσιμεντοειδές κονίαμα CEM	
Υλικά	Αναλογία κατά βάρος
Κονία	1
Νερό	0,23

**Πίνακας 3.4:** Αναλογίες ανάμειξης κονιάματος γεωπολυμερικής σύστασης.

Γεωπολυμερές κονίαμα GEO	
Υλικά	Αναλογία κατά βάρος
Πυριτικό κάλιο	2
Μετακαολίνη	1,5
Αδρανή 0.5-1mm	1,5
Αδρανή <0.5mm	4
Ίνες πολυπροπυλενίου	1% v/v
Νερό	0,3



**Σχήμα 3.3:** Ανάμειξη κονιάματος γεωπολυμερικής σύστασης.

**Πίνακας 3.5:** Εφελκυστική αντοχή από κάμψη και θλιπτική αντοχή τσιμεντοειδούς κονιάματος.

<b>Τσιμεντοειδές κονίαμα CEM</b>		
<b>Δοκίμιο</b>	<b>Εφελκυστική αντοχή από κάμψη (MPa)</b>	<b>Θλιπτική αντοχή (MPa)</b>
1	8,0	23,65
2	7,2	22,35
3	7,9	23,2
4	7,8	19,7
5	8,2	21,25
6	7,7	21,6
<b>Μέσος όρος</b>	<b>7,8</b>	<b>22,0</b>
<b>Μέση απόκλιση</b>	<b>0,3</b>	<b>1,1</b>

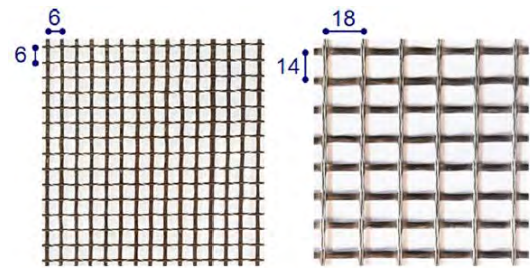
**Πίνακας 3.6:** Εφελκυστική αντοχή από κάμψη και θλιπτική αντοχή κονιάματος γεωπολυμερικής σύστασης.

<b>Κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης GEO</b>		
<b>Δοκίμιο</b>	<b>Εφελκυστική αντοχή από κάμψη (MPa)</b>	<b>Θλιπτική αντοχή (MPa)</b>
1	7,3	42,2
2	10,8	40,7
3	8,0	39,4
4	10,9	46,7
5	11,8	47,7
6	12,3	49,4
<b>Μέσος όρος</b>	<b>10,2</b>	<b>44,3</b>
<b>Μέση απόκλιση</b>	<b>1,7</b>	<b>3,6</b>

### Ινοπλέγματα ενίσχυσης

Για την ενίσχυση των τοιχίσκων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά εμπορικά ινοπλέγματα, από ίνες βασάλτη και υάλου. Τα πλέγματα ήταν συσκευασμένα σε ρολά μεγάλου μήκους και με τη βοήθεια κοπτικών εξαρτημάτων κόπηκαν στις διαστάσεις της υπό ενίσχυση επιφάνειας των τοιχοσωμάτων (1085mmx390mm). Το πλέγμα το οποίο συναντάται στην ονοματολογία με το αρχικό Β, ήταν ένα πλέγμα δύο διευθύνσεων ινών βασάλτη με επίστρωση ανθεκτική σε αλκάλια. Το πλέγμα με το αρχικό G, ήταν ένα πλέγμα

ινών υάλου δύο διευθύνσεων με ειδική επίστρωση, ανθεκτική σε αλκάλια. Οι μηχανικές ιδιότητες των δύο πλεγμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.



Υλικό ινών

Ιδιότητες πλέγματος		Βασάλτης	Γυαλί
Μέτρο ελαστικότητας	$E_f$ (GPa)	89	80
Εφελκυστική αντοχή (κύριας διεύθυνσης)	$f_{fu}$ (MPa)	1540	1375
Επιφανειακό βάρος (χωρίς επικάλυψη)	$m^*$ (g/m <sup>2</sup> )	214	280
Κατανομή βάρους	%	50-50	51,8-48,2
Ονομαστικό πάχος (κύριας διεύθυνσης)	$t_f$ (mm)	0,039	0,056
Διαστάσεις πλέγματος	mmxmm	6x6	18,1x14,2

**Σχήμα 3.4:** Μηχανικές ιδιότητες ινοπλεγμάτων υάλου και βασάλτη.

#### Θερμομονωτικό υλικό

Το θερμομονωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τα ΙΑΜ, ήταν γραφιτούχα διογκωμένη πολυστερίνη ιδανική για εξωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας, με ιδιότητες που αναγράφονται στο Σχήμα 3.5. Δημιουργήθηκαν πάνελ ιδίων διαστάσεων με την επιφάνεια των τοιχοσωμάτων (1085mmx390mm) και εφαρμόστηκαν στο σύστημα ενίσχυσης όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

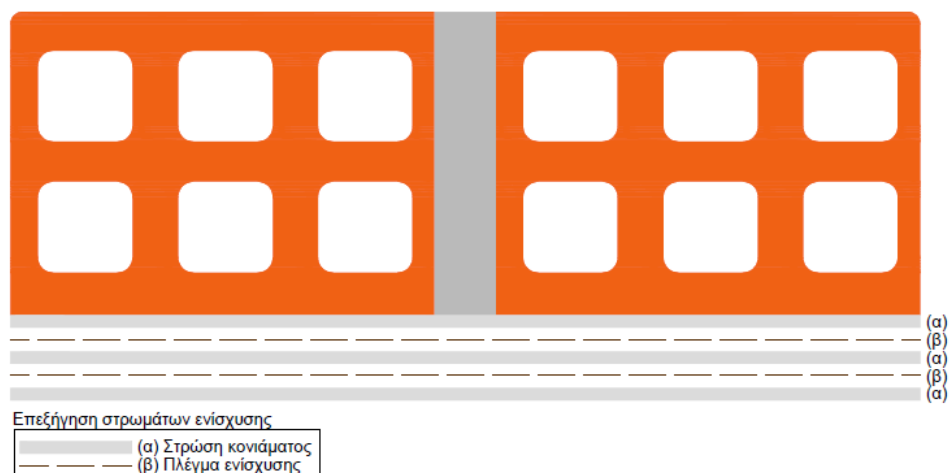


Διογκωμένη πολυστερίνη	
Ιδιότητες	Τιμές
Πάχος (mm)	30
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $\lambda_d$ (W/mK)	0,03
Καμπτική αντοχή $f_{tk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\geq 0,02$
Διατμητική αντοχή $G_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\geq 1$

**Σχήμα 3.5:** Γεωμετρία και ιδιότητες διογκωμένης πολυστερίνης.

### 3.2.3 Διαδικασία ενίσχυσης

Η διαδικασία εφαρμογής της ενίσχυσης των δοκιμίων, ήταν μία τυπική διαδικασία διαστρωμάτωσης των σύνθετων υλικών (Σχήμα 3.8). Πρώτα ενισχύθηκαν τα τοιχοσώματα στα οποία εφαρμόστηκαν μόνο κονίαμα και πλέγμα (απουσία θερμομονωτικού υλικού). Ονομαστικά ήταν οι OOP\_WALL\_GEO-G2, OOP\_WALL\_CEM-G2, OOP\_WALL\_GEO-B2, OOP\_WALL\_CEM-B2. Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η διαστρωμάτωση όλων των υλικών. Τα βασικά βήματα περιγράφονται παρακάτω:



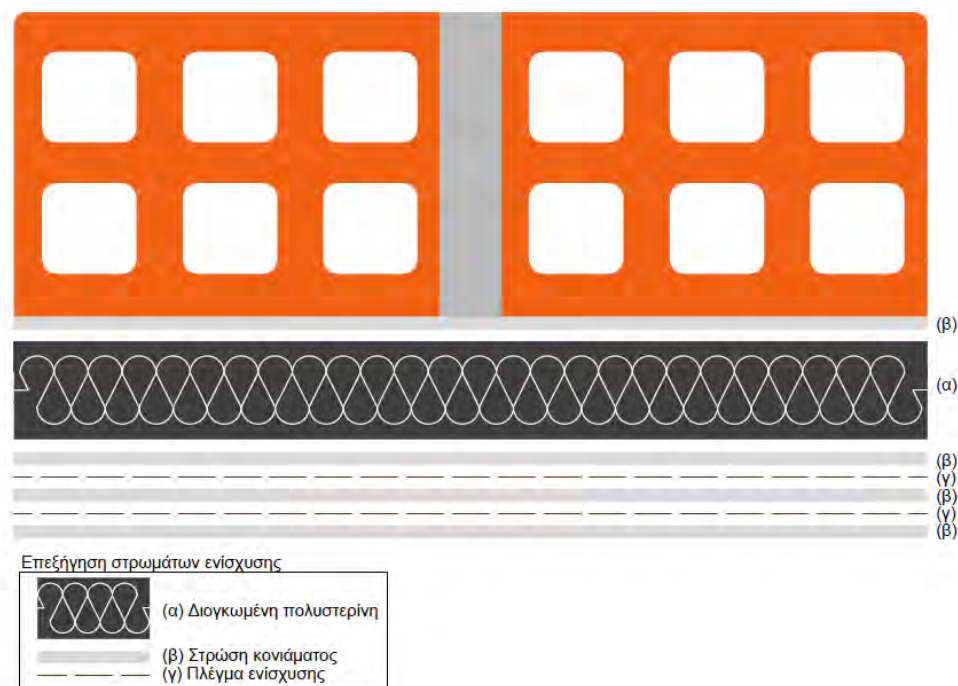
**Σχήμα 3.6:** Απεικόνιση διαστρωμάτωσης υλικών (απουσία θερμομόνωσης).

- i. Οριζόντια τοποθέτηση των τοιχοσωμάτων σε σταθερό και επίπεδο σημείο και εξομάλυνση της υπό ενίσχυσης επιφάνειας.
- ii. Διαβροχή της επιφάνειας των τοιχοσωμάτων στην οποία επρόκειτο να εφαρμοστεί το τσιμεντοειδές κονίαμα, λίγα λεπτά πριν την εφαρμογή της πρώτης στρώσης κονιάματος, προκειμένου να αποφευχθεί η απώλεια υγρασίας από το κονίαμα. Η διαβροχή δεν εφαρμόστηκε στα τοιχοσώματα με το γεωπολυμερές κονίαμα διότι από έρευνες έχει αποδειχθεί ότι έχει αρνητική επιρροή.
- iii. Εφαρμογή της πρώτης στρώσης κονιάματος με λείο μυστρί, πάχους 5mm.
- iv. Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης πλέγματος και ενσωμάτωσή του στο κονίαμα, πιέζοντάς το ελαφρά με το χέρι με κυκλικές κινήσεις.
- v. Επανάληψη των βημάτων (iii) και (iv).

- vi. Εφαρμογή τελευταίας στρώσης κονιάματος για φινίρισμα της επιφάνειας.

Τα δοκίμια έμειναν σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου για χρονικό διάστημα τριάντα ημερών περίπου και υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων.

Για την ενίσχυση των τοιχοσωμάτων με εφαρμογή θερμομονωτικού υλικού και δύο στρώσεις κονιάματος και πλέγματος, (Σχήμα 3.7), (OOP\_WALL\_GEO-B-I2, OOP\_WALL\_GEO-G-I2, OOP\_WALL\_CEM-B-I2, OOP\_WALL\_CEM-G-I2) ακολούθησε η παρακάτω διαδικασία:



**Σχήμα 3.7:** Απεικόνιση διαστρωμάτωσης υλικών (2 στρώσεις μετά τη θερμομόνωση).

- i. Επανάληψη των βημάτων (i) και (ii) της προηγούμενης διαδικασίας.
- ii. Εφαρμογή μίας πρώτης στρώσης κονιάματος ικανής ποσότητας να “κολλήσει” το θερμομονωτικό υλικό (Σχήμα 3.8α)
- iii. Τοποθέτηση του θερμομονωτικού υλικού (Σχήμα 3.8β) και εφαρμογή ομοιόμορφου βάρους προκειμένου να προσκολληθεί ικανοποιητικώς στην υποκείμενη στρώση κονιάματος. Να σημειωθεί ότι σε αυτό το σημείο, προκειμένου να σταθεροποιηθεί το θερμομονωτικό υλικό με το κονίαμα, η διαδικασία συνεχίστηκε την επόμενη ημέρα.
- iv. Εφαρμογή μιας λεπτής στρώσης κονιάματος (5mm) πάνω στο σταθεροποιημένο θερμομονωτικό υλικό.

- v. Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του πλέγματος και ενσωμάτωσή του στην υποκείμενη στρώση κονιάματος (3.8γ).
- vi. Επανάληψη των βημάτων (iv) και (v).
- vii. Εφαρμογή μίας τελειωτικής στρώσης κονιάματος (Σχήμα 3.8δ).



(α)



(β)



(γ)



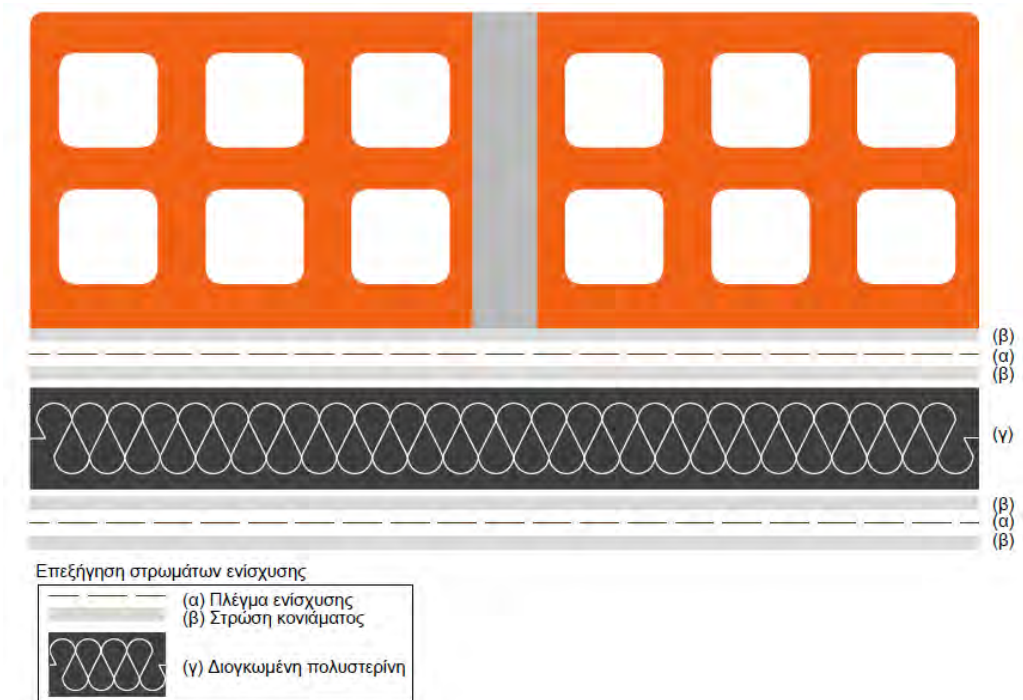
(δ)

**Σχήμα 3.8:** Διαδικασία ενίσχυσης: (α) Πρώτη στρώση κονιάματος; (β) τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού; (γ) ενσωμάτωση πλέγματος στο κονιάμα; (δ) τελευταία στρώση κονιάματος.

Για την ενίσχυση των τοιχοσωμάτων με δύο στρώσεις κονιάματος και πλέγματος και ενδιάμεση τοποθέτηση του θερμομονωτικού υλικού (ή αλλιώς εφαρμογή τύπου «sandwich» και ονομαστικά, OOP\_WALL\_GEO-B-1I1, OOP\_WALL\_GEO-G-1I1,



OOP\_WALL\_CEM-B-111, OOP\_WALL\_CEM-G-111) (Σχήμα 3.9), ακολούθησε η εξής διαδικασία:



**Σχήμα 3.9:** Απεικόνιση διαστρωμάτωσης υλικών (στρώσεις εκατέρωθεν της θερμομόνωσης).

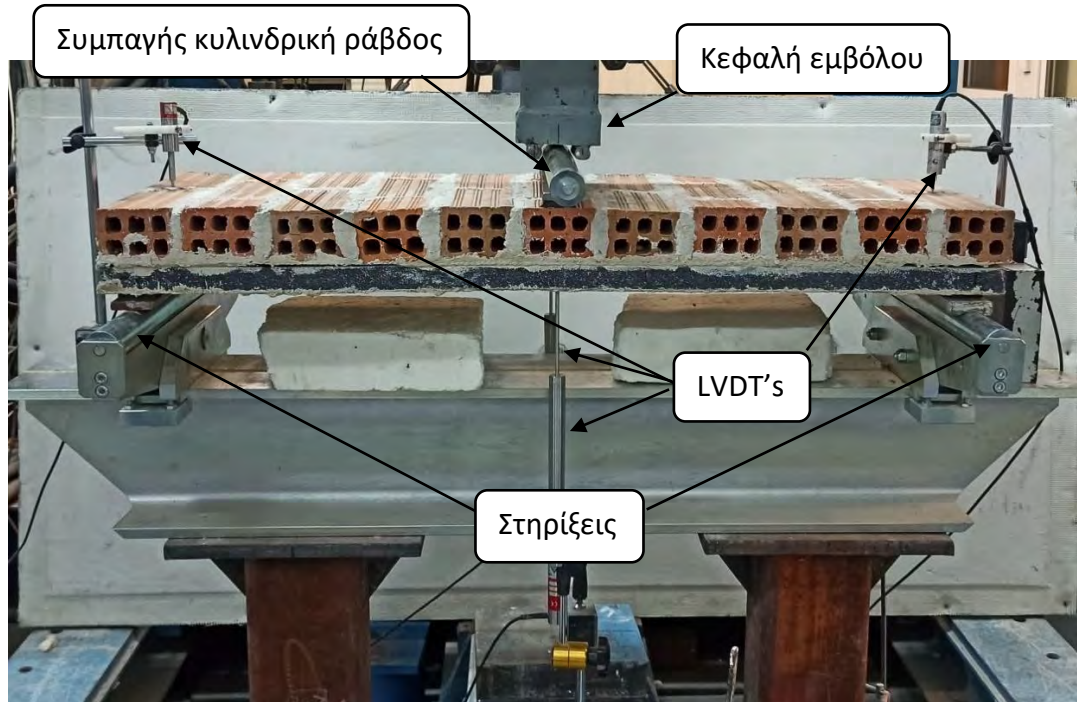
- i. Επανάληψη των βημάτων (i) και (ii) της αρχικής διαδικασίας.
- ii. Εφαρμογή μίας λεπτής στρώσης κονιάματος (5mm).
- iii. Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του πλέγματος και ενσωμάτωση του στην υποκείμενη στρώση κονιάματος.
- iv. Εφαρμογή ικανής ποσότητας κονιάματος προκειμένου να προσκολληθεί το επικείμενο θερμομονωτικό υλικό
- v. Τοποθέτηση του υλικού, εφαρμογή ομοιόμορφου βάρους και αναμονή μέχρις ότου σταθεροποιηθεί.
- vi. Εφαρμογή στρώσης κονιάματος.
- vii. Τοποθέτηση δεύτερης στρώσης πλέγματος.
- viii. Εφαρμογή μίας τελειωτικής στρώσης κονιάματος.

Τα τοιχοσώματα στα οποία εφαρμόστηκε ενίσχυση με θερμομονωτικό υλικό υποβλήθηκαν σε δοκιμή μετά το πέρας 10 περίπου εβδομάδων.

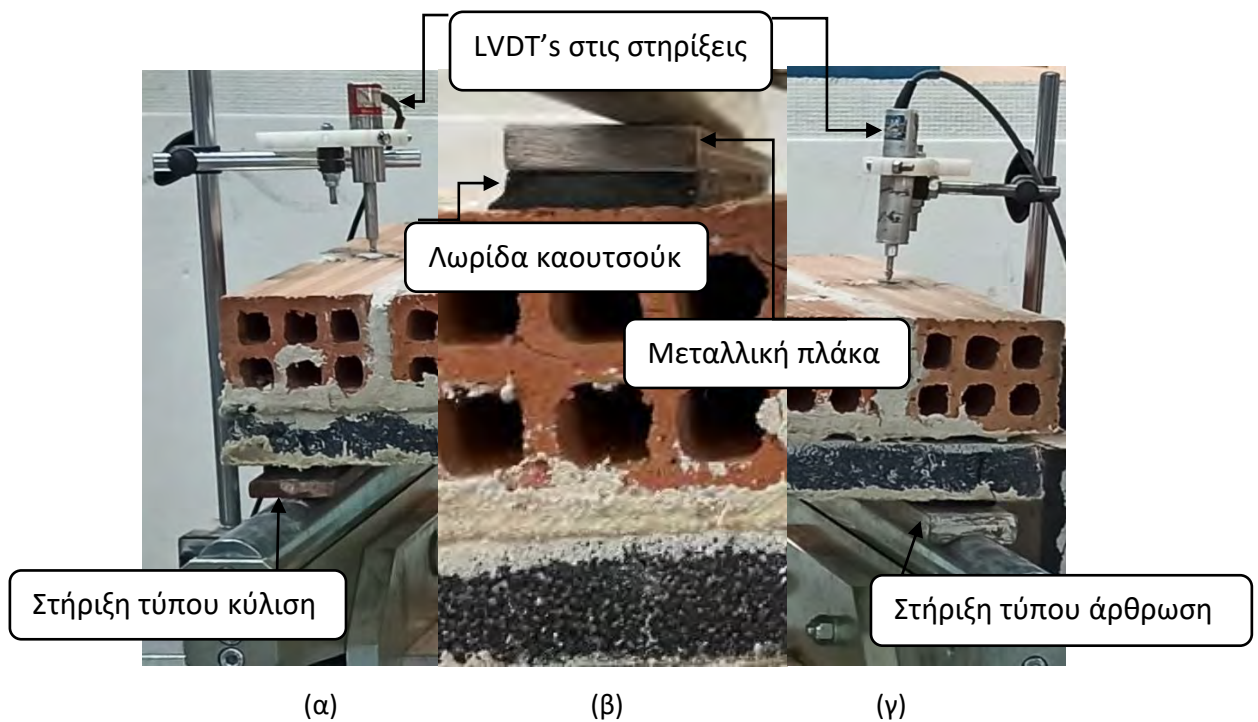
### 3.2.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη ήταν η ίδια για όλα τα τοιχοσώματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10, οι τοίχοι υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοτονικής κάμψης τριών σημείων ως απλά εδραζόμενοι, με θεωρητικό μήκος ανοίγματος 1000mm. Στα σημεία έδρασης με τις μεταλλικές πλάκες καθώς και στο σημείο επιβολής του φορτίου στο μέσον του ανοίγματος, τοποθετήθηκαν λεπτές λωρίδες καουτσούκ 40mmx5mm (πλάτοςxπάχος) μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών και της επιφάνειας του τοίχου (Σχήμα 3.11), έτσι ώστε να αποφευχθούν οι τοπικές ρηγματώσεις λόγω συγκεντρωμένων τάσεων. Το φορτίο εφαρμόστηκε μέσω ενός σερβοϋδραυλικού εμβόλου με ικανότητα +250kN, το οποίο ήταν στερεωμένο σε ένα άκαμπτο μεταλλικό πλαίσιο. Στην κεφαλή του εμβόλου τοποθετήθηκε σε απόλυτη ευθυγράμμιση, συμπαγής κυλινδρική ράβδος με σκοπό να τα κατανείμει ομοιόμορφα το φορτίο σε όλο το πλάτος του τοιχοσώματος, στο μέσον του ανοίγματος (Σχήμα 3.10). Το φορτίο ασκήθηκε με ρυθμό ελεγχόμενης μετατόπισης.

Οι καταγραφές των τιμών φορτίου-βύθισης έγιναν μέσω ειδικού καταγραφικού συστήματος. Η λήψη των τιμών των βυθίσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε από τέσσερις εξωτερικούς αισθητήρες τύπου LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Δύο από αυτούς τοποθετήθηκαν στο μέσον του ανοίγματος (ένας κοντά στην εμπροσθεν παρειά και ένας στην πίσω) και οι άλλοι δύο στα σημεία των στηρίξεων. Να σημειωθεί ότι αρχικά, οι δοκιμές τριών τοιχοσωμάτων (OOP\_WALL\_CEM-G-I2, OOP\_WALL\_CEM-B-I2, OOP\_WALL\_CEM-G-1I1), έγιναν χωρίς τα LVDT's στις στηρίξεις. Παρατηρήθηκε όμως ότι υπήρξε τοπική βύθιση στις περιοχές αυτές λόγω συμπίεσης της διογκωμένης πολυστερίνης. Έτσι, κρίθηκε αναγκαία η μέτρηση των βυθίσεων στις θέσεις των στηρίξεων προκειμένου να υπάρχει ακριβής εικόνα της βύθισης στο μέσον του ανοίγματος. Για τον λόγο αυτό, τοποθετήθηκαν τα επιπλέον δύο LVDT's στις θέσεις αυτές (Σχήμα 3.11α, γ) και τα υπόλοιπα τοιχοσώματα υποβλήθηκαν σε δοκιμή με βάση την τελευταία διάταξη.



Σχήμα 3.10: Τοιχόσωμα σε μονοτονική κάμψη τριών σημείων.



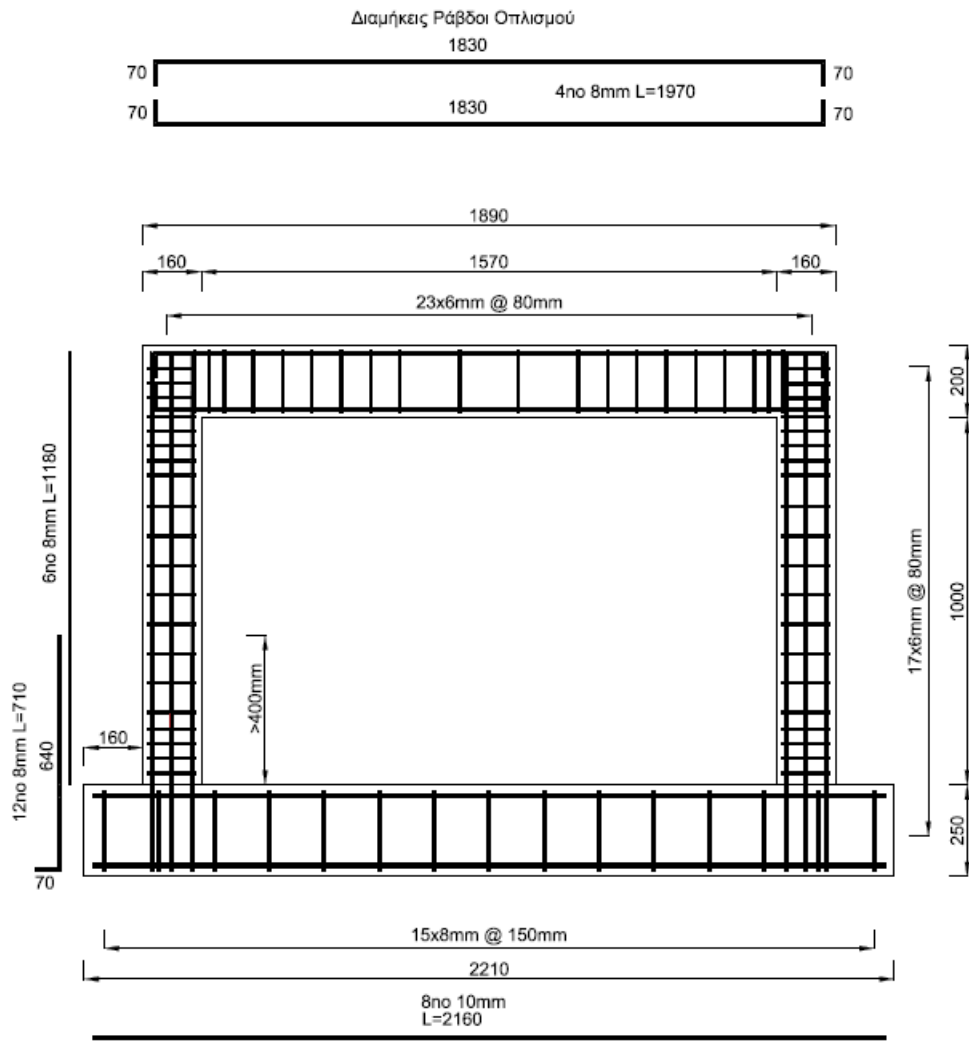
Σχήμα 3.11: Λεπτομέρειες στήριξης τοιχοσώματος και επαφής με το έμβολο: (α) αριστερή στήριξη; (β) μέσω ανοίγματος; (γ) δεξιά στήριξη.

### **3.3 Εκτός επιπέδου κάμψη τοιχοπλήρωσης εμφανιζόμενης σε πλαίσιο ΟΣ**

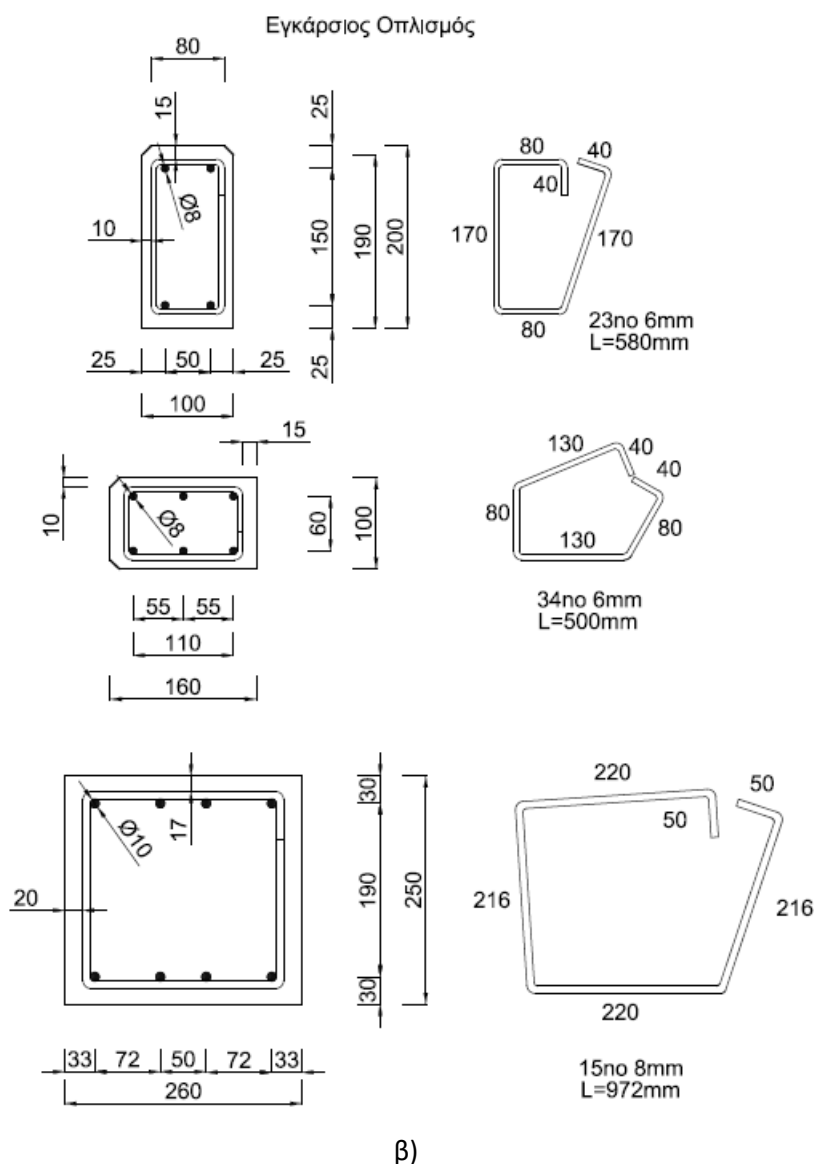
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η γεωμετρία του τοιχοπληρωμένου πλαισίου, οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του, η παρασκευή του δοκιμίου καθώς και η πειραματική διάταξη που στήθηκε. Τα πειραματικά δεδομένα που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία αποτελούν ένα τμήμα ενός μεγαλύτερου ερευνητικού προγράμματος, που αφορά την ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων με σύνθετα υλικά μικρού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Στη παρούσα διπλωματική θα παρουσιαστεί μόνο ένα δοκίμιο (FRAME\_1) το οποίο δεν έφερε εξωτερικές στρώσεις ενίσχυσης και δοκιμάστηκε για τον προσδιορισμό της εκτός επιπέδου αντοχής της τοιχοπλήρωσης.

#### **3.3.1 Γεωμετρία**

Για την υλοποίηση του πειράματος πρώτα κατασκευάστηκε η βάση με διαστάσεις (μήκοςπλάτοςχύψος) και ύστερα το πλαίσιο ΟΣ κλίμακας 1:2.5 με διαστάσεις (μήκοςπλάτοςχύψος) που αναγράφονται στο Σχήμα 3.12α. Το πλήθος των ράβδων οπλισμού στη βάση ήταν 8Φ10 και οι συνδετήρες έφταναν τους 15Φ10. Για τα υποστυλώματα χρησιμοποιήθηκαν 6 ράβδοι οπλισμού Φ8 και 20Φ8 συνδετήρες για το κάθε ένα, τέλος στη δοκό χρησιμοποιήθηκαν 4 ράβδοι και 20 συνδετήρες, Φ8 αντίστοιχα. Τα προαναφερθέντα τοποθετήθηκαν όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12β.



α)

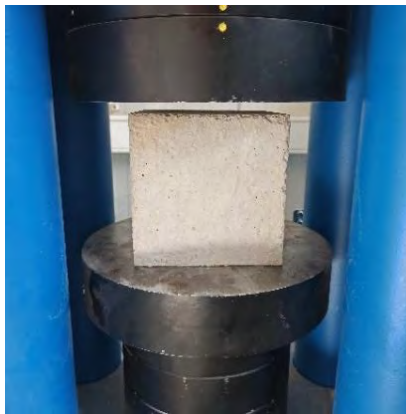


**Σχήμα 3.12:** Η γεωμετρία του πλαισίου και οι λεπτομέρειες οπλισμού: α) το οπλισμένο πλαίσιο; β) οι διαστάσεις των συνδετήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

### 3.3.2 Υλικά

#### Σκυρόδεμα

Λήφθηκαν 12 κυβικές μέτρες, έξι από το σκυρόδεμα της βάσης και έξι από του πλαισίου, έτσι ύστερα από τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη (Σχήμα 3.13) προέκυψαν οι τιμές των αντοχών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.



**Σχήμα 3.13:** Μονοαξονική θλίψη κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος.

### Χάλυβας

Ο οπλισμός όλων των στοιχείων του πλαισίου έγινε με χάλυβα οπλισμού κατηγορίας B500C. Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες και ράβδοι οπλισμού Φ8 και Φ10 για τη βάση, τη δοκό και τα υποστυλώματα.

### Οπτόπλινθοι

Το χτίσιμο της τοιχοπλήρωσης έγινε με τυπικά διάτρητα τούβλα έξι οπών με διαστάσεις 60mmx90mmx190mm (πάχοςxπλάτοςxμήκος). Λόγω κατασκευής του πλαισίου υπό κλίμακα, ήταν απαραίτητο να τροποποιηθούν οι διαστάσεις των τούβλων. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τούβλα διαστάσεων 60mmx90mmx140mm και 60mmx90mmx110mm (πάχοςxπλάτοςxμήκος) με τη χρήση ηλεκτρικού τροχού (Σχήμα 3.14).



**Σχήμα 3.14:** Ηλεκτρικός επιτραπέζιος τροχός νερού.

Κονιάμα

Το συνδεδειγμένο τσιμεντοκονιάμα για το χτίσιμο της τοιχοπλήρωσης παρασκευάστηκε στο εργαστήριο από τσιμέντο, άμμο, ασβέστη και νερό σε αναλογίες των τριών πρώτων 1:5:1 κατά βάρος. Το πάχος των οριζόντιων και κατακόρυφων αρμών ήταν 10mm. Κατά το χτίσιμο του δοκιμίου λήφθηκε δείγμα του κονιάματος και τοποθετήθηκε σε μήτρες διαστάσεων 40x40x160mm, οι οποίες αφέθηκαν να ωριμάσουν για 28 μέρες και υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων και μονοαξονικής θλίψης. Η αντοχή του τσιμεντοκονιάματος παρατίθεται στον Πίνακα 3.7.

**Πίνακας 3.7:** Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος βάσης, πλαισίου και τσιμεντοκονιάματος.

Ιδιότητες	Σκυρόδεμα Βάσης	Σκυρόδεμα Πλαισίου	Τσιμεντοκονιάμα
Θλιπτική αντοχή (MPa)	35,09	32,74	8,2
Εφελκυστική αντοχή από κάμψη (MPa)	(-)	(-)	1,9

**3.3.3 Διαδικασία κατασκευής**

Η κατασκευή του δοκιμίου είχε ως εξής:

Βάση

- i. Φτιάχτηκε καλούπι ανάλογης γεωμετρίας με τη βάση δοκιμίου.
- ii. Δέθηκαν δια χειρός οι συνδετήρες στις ράβδους οπλισμού και τοποθετήθηκαν στις προβλεπόμενες θέσεις. Προς τις άκρες της βάσης δέθηκαν κατακόρυφες αναμονές προκειμένου εν συνεχεία να δεθούν τα κολωνάκια. Επίσης εντός των καλουπιών τοποθετήθηκαν σωληνάκια διαμέτρου 3cm και ύψους λίγο μεγαλύτερου της βάσης προκειμένου να δημιουργηθούν κενά ώστε κατά τη πειραματική διαδικασία να αγκυρωθεί σωστά το δοκίμιο μέσω αυτών (Σχήμα 3.15α).



- iii. Έγινε έγχυση σκυροδέματος στο καλούπι, το οποίο στη συνέχεια δονήθηκε με ραβδάκια χάλυβα προκειμένου να διανεμηθεί ομοιόμορφα (Σχήμα 3.15β).
- iv. Η βάση σκεπάστηκε με νωπές λινάτσες και διαβρέχονταν συχνά για σχεδόν 7 ημέρες προκειμένου να αποκτήσει την επιθυμητή αντοχή.



α)



β)

**Σχήμα 3.15:** Κατασκευή βάσεων: α) το καλούπι της βάσης με τοποθετημένο οπλισμό; β) σκυροδετημένες βάσεις.

### Πλαίσια

- i. Φτιάχτηκε καλούπι για το πλαίσιο.
- ii. Δέθηκαν δύο κολωνάκια και μία δοκός από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες και τοποθετήθηκαν μέσα στο καλούπι (Σχήμα 3.16α).
- iii. Ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία σκυροδέτησης και συντήρησης με αυτή της βάσης (Σχήμα 3.16β).



α)



β)

**Σχήμα 3.16:** Κατασκευή πλαισίων: α) τοποθέτηση οπλισμού εντός των καλουπιών; β) σκυροδέτηση πλαισίου.

#### Τοιχοπληρώσεις

- iv. Κόπηκαν 200 περίπου οπτόπλινθοι και για τα δύο δοκίμια σε επιτραπέζιο τροχό διαστάσεων 60mmx90mmx140mm και 60mmx90mmx110mm.
- v. Αναμείχθηκε τσιμεντοκονίαμα αρκετό για το χτίσιμο δύο στρώσεων οπτόπλινθων.
- vi. Διαβράχθηκαν 10 περίπου οπτόπλινθοι.
- vii. Χτίστηκαν δύο στρώσεις οπτόπλινθων.
- viii. Επαναλήφθηκε η διαδικασία χτίσιματος από v-vii έως ότου είχε χτιστεί σχεδόν ολόκληρος ο τοίχος πέραν της τελευταίας στρώσης, η οποία χτίστηκε την επόμενη μέρα με τα τούβλα να έχουν μπει σε ελαφριά κλίση (Σχήμα 3.17). Όμοια συνέβη και στο δεύτερο δοκίμιο.



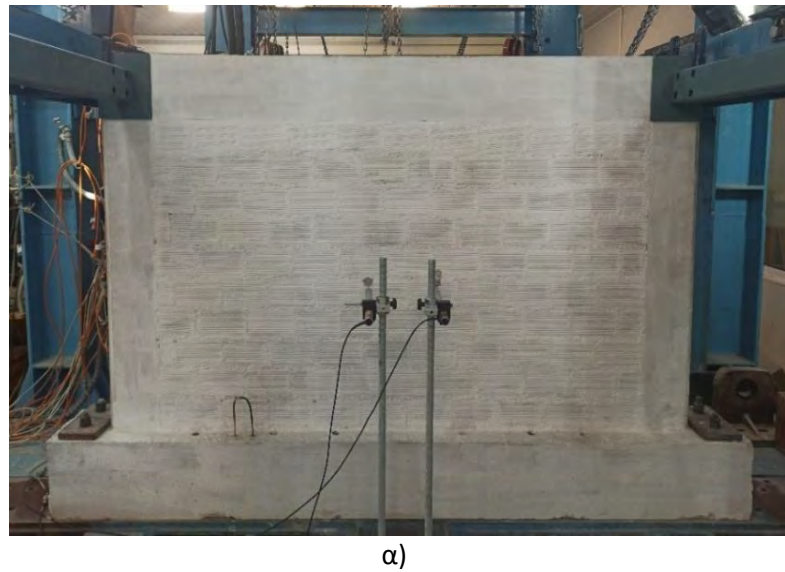
Σχήμα 3.17: Τοιχοπληρωμένο πλαίσιο (FRAME\_1).

### 3.3.4 Πειραματική Διάταξη

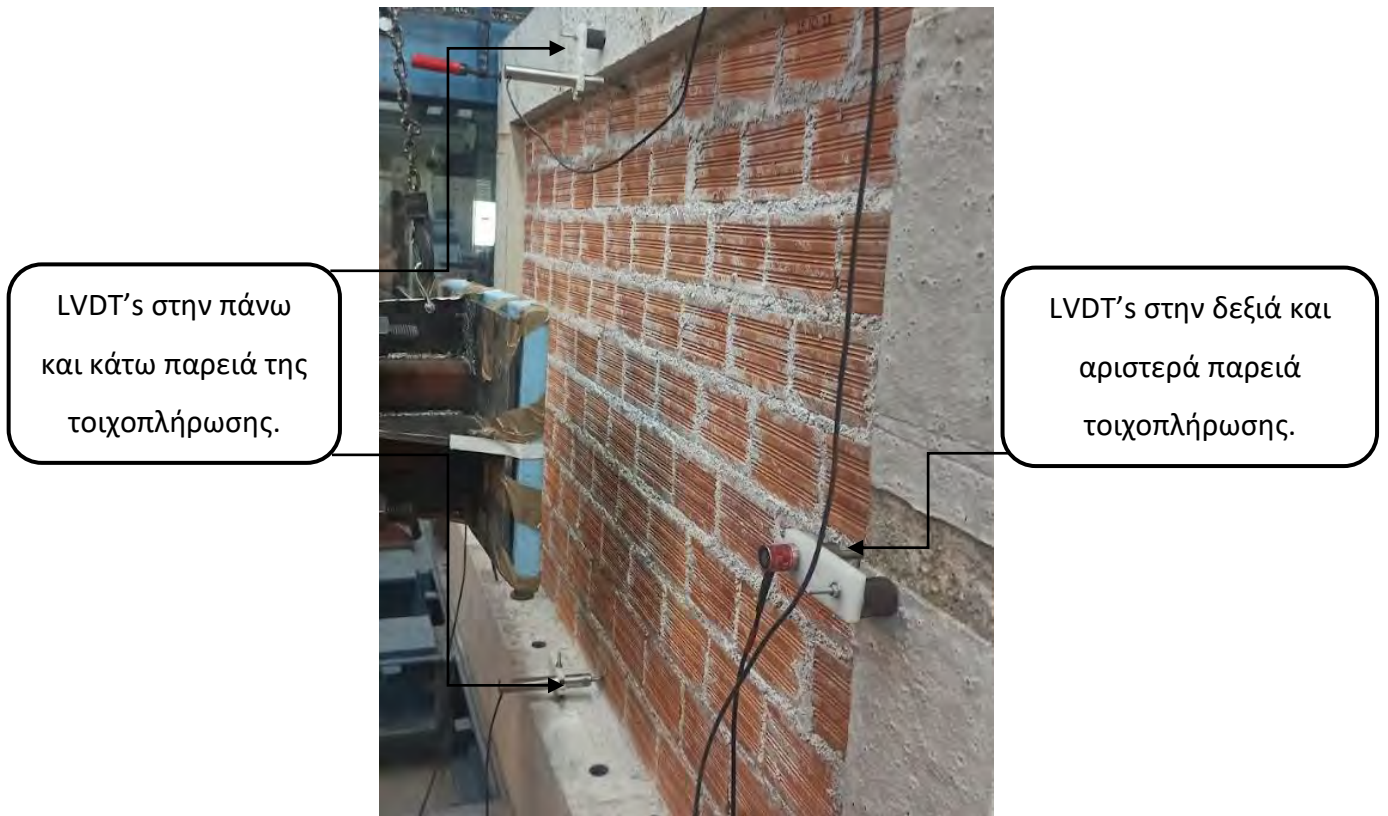
Αφού το δοκίμιο έμεινε σε θερμοκρασία δωματίου για περίπου 7 βδομάδες τοποθετήθηκε εντός της μεταλλικής κατασκευής όπου και έγινε το πείραμα. Αγκυρώθηκε περιμετρικά η βάση του και χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταλλικοί δοκοί οι οποίες εμπόδιζαν την εκτός επιπέδου μετακίνηση των κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Ακόμα, «βάφτηκε» η πρόσοψη του δοκιμίου με νερωμένο ασβέστη προκειμένου να γίνουν διακριτές οι ρωγμές του κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η μεταλλική κυρτή επιφάνεια επιβολής φόρτισης διαστάσεων 530mmx330mmx190mm (μήκοςxπλάτοςxβάθος) (Σχήμα 3.18) που χρησιμοποιήθηκε για την εκτός επιπέδου φόρτιση κρεμάστηκε και βιδώθηκε επάνω στο σερβουΐδραυλικό έμβολο, ενώ η επιφάνεια του καλύφθηκε με ένα κομμάτι εξηλασμένης πολυστερίνης, η γεωμετρία της οποίας ήταν λίγο μεγαλύτερη της μεταλλικής επιφάνειας. Χρησιμοποιήθηκαν έξι LVDT's, από τα οποία τα δύο τοποθετήθηκαν στο κέντρο της τοιχοποιίας από την μπροστινή πλευρά της και τα άλλα τέσσερα στην πίσω. Συγκεκριμένα τα πίσω τοποθετήθηκαν ως εξής: δύο κεντρικά πάνω και κάτω στη διεπαφάνεια με το πλαίσιο και τα άλλα δύο δεξιά και αριστερά επίσης στη διεπιφάνεια με το πλαίσιο (Σχήμα 3.20). Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη.



**Σχήμα 3.18:** Μεταλλική κυρτή επιφάνεια επιβολής φορτίου: α) πλάγια όψη; β) κάτοψη.



**Σχήμα 3.19:** Η πειραματική διάταξη για τη φόρτιση του (FRAME\_1): α) πρόσοψη; β) πλάγια όψη.



Σχήμα 3.20: LVDT's στην πίσω όψη του πλαισίου.

## **Κεφάλαιο 4 Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός**

### **4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων των τοιχοσωμάτων**

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης των τοιχοσωμάτων και συγκρίνονται τα μεταξύ τους αποτελέσματα, με σκοπό τον γενικότερο σχολιασμό της συμπεριφοράς των διαφορετικών συστημάτων ενίσχυσης. Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.1, οι τιμές των φορτίων και των βελών κάμψης, στα στάδια της πρώτης ρηγμάτωσης του δοκιμίου και της αστοχίας του (αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο). Αναγράφονται επίσης οι τιμές της δυσκαμψίας και οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων. Σημειώνεται πως οι τιμές των δυσκαμψιών ισούνται με τις κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων των καμπυλών φορτίου-βύθισης, οι οποίες προέκυψαν με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

**Πίνακας 4.1:** Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων όλων των δοκιμών.

Όνομασία δοκιμίου	Φορτία (kN)		Βύθιση (mm)		Δυσκαμψία (kN/mm)	Μορφή Αστοχίας
	P <sub>cr</sub>	P <sub>u</sub>	δ <sub>cr</sub>	δ <sub>u</sub>		
OOP_WALL_GEO-G2	1,1	4,2	0,7	8,2	1,58	Καμπτική
OOP_WALL_GEO-B2	2,0	5,8	1,2	14,1	1,89	Διατμητική
OOP_WALL_CEM-G2	1,7	7,7	0,8	19,1	2,3	Διατμητική
OOP_WALL_CEM-B2	1,8	6,0	0,9	16,9	2,05	Διατμητική
OOP_WALL_GEO-G-12	1,7	6,8	1,4	8,9	1,23	Καμπτική
OOP_WALL_GEO-B-12	4,1	10,2	3,4	17,1	1,26	Καμπτική και συνάφειας θερμομόνωσης - κονιάματος
OOP_WALL_CEM-G-12	2,1	5,3	0,9	7,3	2,46	Καμπτική και συνάφειας θερμομόνωσης - κονιάματος
OOP_WALL_CEM-B-12	2,9	9,0	1,0	17,8	2,83	Καμπτική και συνάφεια θερμομόνωσης και κονιάματος
OOP_WALL_GEO-G-111	5,2	6,1	7,4	11,5	0,72	Καμπτική και αστοχία κονιάματος
OOP_WALL_GEO-B-111	1,2	10,8	0,6	21,6	1,87	Διατμητική
OOP_WALL_CEM-G-111	2,0	11,8	0,9	23,7	2,64	Διατμητική και αποκόλληση πλέγματος
OOP_WALL_CEM-B-111	3,3	9,5	1,1	15,7	3,05	Διατμητική

Σε αυτό το πειραματικό πρόγραμμα δεν υποβλήθηκε σε 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 τους. 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 0,51 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 **Εξ. (4.1-4.3)** αντίστοιχα. Η **Εξ. (4.2)** χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης του δοκιμίου.

$$M_{cr}=w*ft \text{ (4.1)}$$

Όπου

ft: Εφελκυστική αντοχή διεπιφάνειας, σε MPa

w: Ροπή αντίστασης του δοκιμίου, σε mm<sup>3</sup>

$$w=(b*h^2)/6 \quad (4.2)$$

Όπου

b: Πλάτος δοκιμίου, σε mm

h: Πάχος δοκιμίου, σε mm

$$Me=(P*L)/4 \quad (4.3)$$

Όπου

P: Ασκούμενο φορτίο, σε N

L: Μήκος δοκιμίου, σε mm

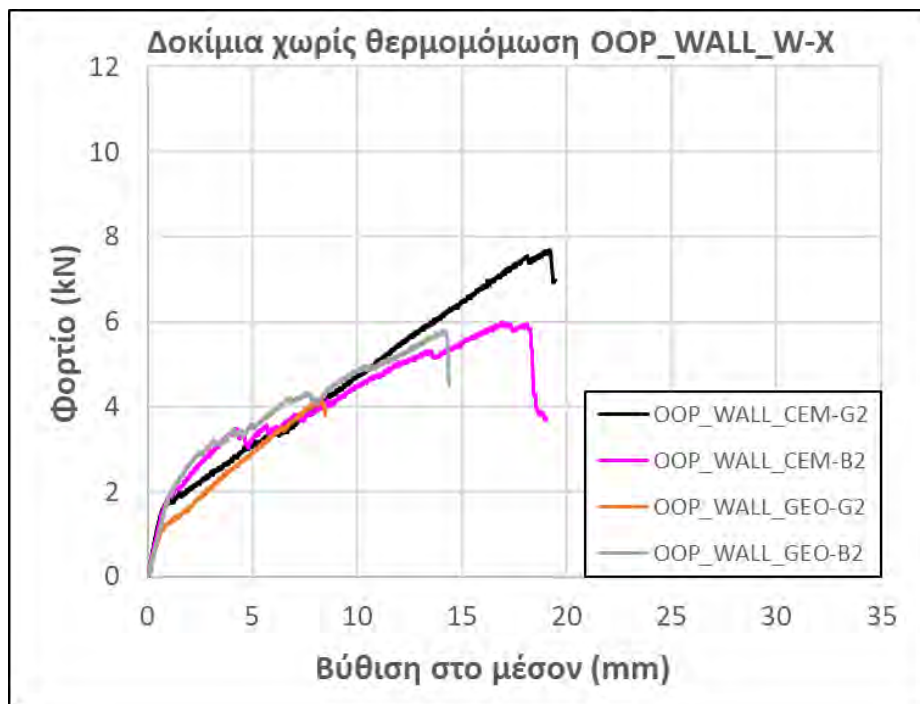
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές των τοιχοσωμάτων, ομαδοποιημένα σε τρεις κατηγορίες. Πρώτα παρουσιάζονται τα δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με κονίαμα και δύο στρώσεις ινοπλέγματος, απουσία θερμομόνωσης (ονομαστικά τα OOP\_WALL\_GEO-B2, OOP\_WALL\_GEO-G2, OOP\_WALL\_CEM-B2, OOP\_WALL\_CEM-G2). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις κονιάματος και πλέγματος και εφαρμογή θερμομονωτικού υλικού (ονομαστικά τα OOP\_WALL\_GEO-B-I2, OOP\_WALL\_GEO-G-I2, OOP\_WALL\_CEM-B-I2, OOP\_WALL\_CEM-G-I2). Τέλος παρουσιάζονται αυτά τα οποία ενισχύθηκαν δύο στρώσεις κονιάματος και πλέγματος και ενδιάμεση τοποθέτηση του θερμομονωτικού υλικού, ή αλλιώς εφαρμογή τύπου *sandwich* (και ονομαστικά, OOP\_WALL\_GEO-B-1I1, OOP\_WALL\_GEO-G-1I1, OOP\_WALL\_CEM-B-1I1, OOP\_WALL\_CEM-G-1I1). Όλα τα δοκίμια σχολιάζονται με βάση τις καμπύλες φορτίου-βύθισης στο μέσον, οι οποίες διακριτοποιήθηκαν σε δύο επιμέρους μέρη: το Στάδιο I, από το σημείο μηδέν έως τη στιγμή της πρώτης ρηγμάτωσης και το Στάδιο II, από το σημείο της πρώτης ρηγμάτωσης μέχρι τη στιγμή της αστοχίας. Η διακριτοποίηση αυτή έγινε με σκοπό την εύρεση των φορτίων ρηγμάτωσης και αστοχίας των δοκιμίων και την σύγκριση των καμπτικών δυσκαμψιών των



δύο σταδίων. Σημειώνεται ότι οι τιμές των καμπτικών δυσκαμψιών ισούνται με τις κλίσεις των αντίστοιχων ευθύγραμμων τμημάτων, τα οποία προέκυψαν με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

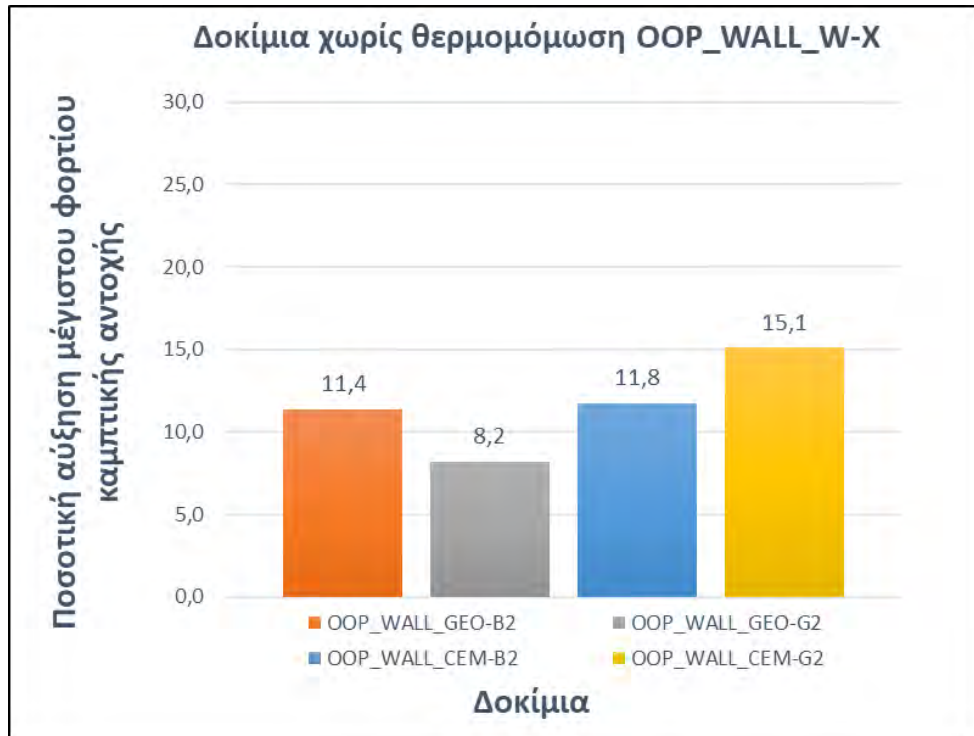
#### **4.1.1 Ομάδα δοκιμών “OOP WALL GEO-B2, OOP WALL GEO-G2, OOP WALL CEM-B2, OOP WALL CEM-G2”**

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των παραπάνω τεσσάρων ομαδοποιημένων δοκιμών. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G2, παρουσίασε το υψηλότερο φορτίο αστοχίας, με τιμή ίση με 7,7 kN και αντίστοιχη βύθιση στο μέσον ίση με 19,1 mm. Ακολουθεί το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B2 με φορτίο αστοχίας 6 kN και αντίστοιχη βύθιση 16,9 mm. Στη συνέχεια το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO-B2 αστόχησε στα 5,8 kN με βύθιση στο μέσον στα 14,1 mm και τέλος το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO\_G2 με φορτίο αστοχίας ίσο με 4,2 kN και αντίστοιχη βύθιση στα 8,2 mm. Κατά το Στάδιο I μέχρι την πρώτη ρηγμάτωση, όλα τα δοκίμια έδειξαν γραμμική συμπεριφορά με την ελαστική δυσκαμψία να κυμαίνεται από 1,58 έως 2,3 kN/mm. Μέχρι τη στιγμή της πρώτης ρηγμάτωσης, τα επιβαλλόμενα φορτία αυξάνονταν με σταθερό ρυθμό και οι κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων ήταν σταθερές. Τα φορτία ρηγμάτωσης των δοκιμών κυμάνθηκαν από 1,1 έως 2 kN με τις αντίστοιχες βυθίσεις στο μέσον να παίρνουν τιμές από 0,7 έως 1,2 mm. Με την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών έγινε ανακατανομή των εντάσεων στα δοκίμια και παρατηρήθηκε πτώση των τιμών των δυσκαμψιών, με τιμές να κυμαίνονται από 0,23 έως 0,41 kN/mm. Έτσι, με την εισαγωγή στο Στάδιο II, οι κλίσεις των καμπύλων μειώθηκαν και συνέχισαν σταθερή ανοδική πορεία μέχρι τη στιγμή της αστοχίας των δοκιμών. Οι τιμές των μέγιστων φορτίων αστοχίας που καταγράφηκαν διακυμάνθηκαν από 4,2 έως 7,7 kN και οι αντίστοιχες τιμές των βυθίσεων καταγράφηκαν από 8,2 έως 19,1 mm.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος, των δοκιμών "OOP\_WALL\_W-X".

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμών, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου. Φαίνεται πως η ενίσχυση των τοιχίσκων αύξησε σημαντικά την αντοχή τους και συγκεκριμένα από 8,2 έως 15,1 φορές.



**Σχήμα 4.2:** Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP\_WALL\_W-X".

Όσον αφορά τους τρόπους αστοχίας των δοκιμίων παρατηρήθηκαν οι εξής:

#### Δοκίμιο "OOP WALL GEO-B2"

Στο δοκίμιο αυτό, το οποίο ενισχύθηκε με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και δύο στρώσεις ινοπλέγματος βασάλτη παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία, με τη μορφή διατμητικής ολίσθησης. Αναλυτικότερα, η ρηγμάτωση ξεκίνησε από την άνω επιφάνεια του τοιχοσώματος, στην αριστερή παρειά του μεσαίου οπτόπλινθου, τον διαπέρασε διαγώνια και κατέληξε στην κάτω παρειά του τοιχοσώματος, αποκολλώντας ολόκληρη την στρώση ενίσχυσης από την επιφάνεια των οπτόπλινθων (Σχήμα 4.3). Η φόρτιση συνεχίστηκε μέχρι τη στιγμή που ο οπτόπλινθος διασχίστηκε ολοκληρωτικά, χωρίς όμως να επέλθει κατάρρευση του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται στην εφελκυστική αντοχή της στρώσης ενίσχυσης, η οποία παρεμπόδισε τη ρηγμάτωση και δεν επέτρεψε την κατάρρευση του τοιχοσώματος.



**Σχήμα 4.3:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-B2".

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_GEO-G2"

Σε αυτό το δοκίμιο, το οποίο ενισχύθηκε με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και δύο στρώσεις υαλοπλέγματος, παρατηρήθηκε απότομη αστοχία καμπτικού τύπου, με κάθετες ρωγμές στις περιοχές των αρμών μεταξύ των οπτόπλινθων και πλήρη αστοχία στα σημεία αυτά. Η εμφάνιση των ρωγμών ήταν απότομη, με άμεσο επακόλουθο την θραύση του τοιχοσώματος σε τρία σημεία κατά μήκος των αρμών και τη θραύση του ινοπλέγματος (Σχήμα 4.4 και Σχήμα 4.5).



**Σχήμα 4.4:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-G2".



**Σχήμα 4.5:** Θραύση ινών του υαλοπλέγματος του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-G2".

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_CEM-B2"

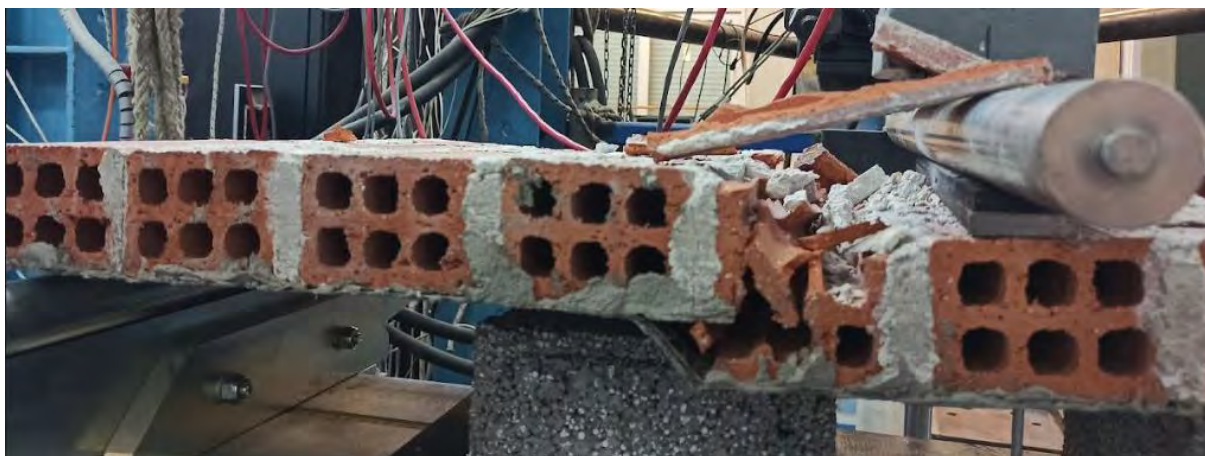
Στο δοκίμιο αυτό, το οποίο ενισχύθηκε με τσιμεντοκονίαμα και δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη, παρατηρήθηκε αστοχία διατμητικής μορφής με διαγώνιες ρηγματώσεις και διατμητική ολίσθηση στην περιοχή των αρμών. Οι πρώτες εμφανείς ρωγμές ήταν κάθετες, αρκετά μικρές και παρατηρήθηκαν στην αριστερή και δεξιά παρειά του μεσαίου οπτόπλινθου, στις περιοχές των αρμών. Στη συνέχεια, εμφανίζονταν σταδιακά, διαγώνιες ρωγμές στους οπτόπλινθους, οι οποίες μεγάλωναν με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου και μέχρι τη στιγμή της αστοχίας (Σχήμα 4.6). Η ομαλή πορεία των ρηγματώσεων μέχρι τη στιγμή της αστοχίας, υποδεικνύει την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων εντός του πλέγματος βασάλτη και την καλή συνάφεια του τελευταίου με τη μήτρα του τσιμεντοειδούς κονιάματος.



**Σχήμα 4.6:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-B2".

#### Δοκίμιο "OOP WALL CEM-G2"

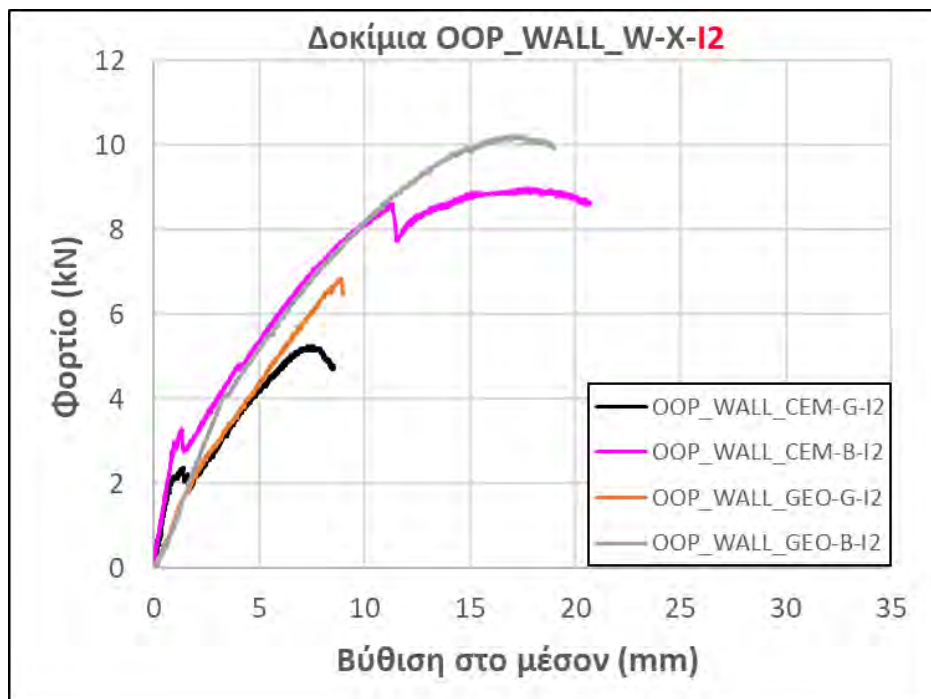
Στο δοκίμιο αυτό, το οποίο ενισχύθηκε με τσιμεντοκονίαμα και δύο στρώσεις υαλοπλέγματος, παρατηρήθηκε απότομη διατμητική αστοχία με ολοκληρωτική θραύση του τοιχοσώματος, στην περιοχή αριστερά του σημείου φόρτισης. Στο σημείο αυτό το πλέγμα αποκολλήθηκε τοπικά από την επιφάνεια του τοιχοσώματος και οι οπτόπλινθοι διασχίστηκαν κάθετα και θραύτηκαν (Σχήμα 4.7).



**Σχήμα 4.7:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-G2".

#### **4.1.2 Ομάδα Δοκιμών “OOP WALL GEO-B-I2, OOP WALL GEO-G-I2, OOP WALL CEM-B-I2, OOP WALL CEM-G-I2”**

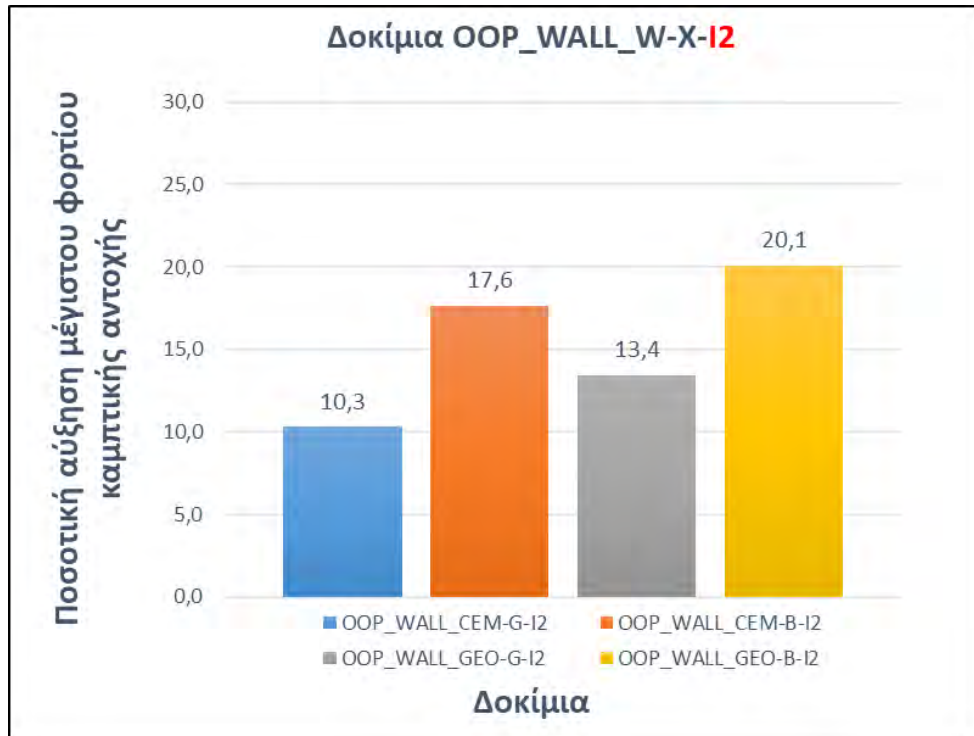
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των δοκιμών OOP\_WALL\_GEO-B-I2, OOP\_WALL\_GEO-G-I2, OOP\_WALL\_CEM-B-I2, OOP\_WALL\_CEM-G-I2, για φορτίο στο μέσον του ανοίγματος. Είναι φανερό πως το OOP\_WALL\_GEO-B-I2 εμφάνισε το υψηλότερο φορτίο αστοχίας στα 10,2 kN και αντίστοιχη βύθιση ίση με 17,1 mm. Έπειτα το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B-I2 αστόχησε στα 9,0 kN και η αντίστοιχη βύθιση του ήταν 17,8 mm. Το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO-G-I2 αστόχησε αρκετά νωρίτερα από τα δύο προηγούμενα, υπομένοντας μόλις φορτίο ίσο με 6,8 kN πρώτου αστοχήσει, έχοντας σε αυτό το σημείο βύθιση ίση με 8,9 mm. Τέλος το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-I2 έδειξε την μικρότερη αντοχή φτάνοντας μόλις μέχρι τα 5,2 kN με τη βύθιση του να αγγίζει τα 7,3 mm. Όμοια με την προηγούμενη ομάδα δοκιμών κι εδώ τα δοκίμια εμφάνισαν ελαστική συμπεριφορά μέχρι την πρώτη ρηγμάτωση (Στάδιο I) με τις ελαστικές δυσκαμψίες να παίρνουν τιμές από 1,23 έως 2,46 kN/mm. Κατά το Στάδιο I τα φορτία αυξάνονται με αργό και σταθερό ρυθμό, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα οι κλίσεις των καμπυλών στην ελαστική περιοχή είναι σταθερές. Τα φορτία ρηγμάτωσης των δοκιμών κυμαίνονται από 1,7 έως 4,1 kN/mm με τις αντίστοιχες βυθίσεις στο μέσον να παίρνουν τιμές από 0,7 έως 3,4mm. Οι πρώτες ρωγμές επέφεραν, όπως είναι φυσιολογικό, ανακατανομές των εντάσεων στα δοκίμια με αποτέλεσμα οι δυσκαμψίες να εμφανίσουν πτώση με τις τιμές τους να κυμαίνονται από 0,45 έως 0,69 kN/mm. Επομένως οι καμπύλες στο Στάδιο II, είχαν φανερά μειωμένες κλίσεις, συνεχίζοντας όμως την ανοδική τους πορεία έως ότου αστοχήσουν τα δοκίμια. Τα φορτία αστοχίας κυμάνθηκαν από 5,3 έως 10,2 kN και οι βυθίσεις στις αντίστοιχες θέσεις είχαν τιμές από 7,3 έως 17,8 mm.



**Σχήμα 4.8:** Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος, των δοκιμών "OOP\_WALL\_W-X-12".

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμών, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου. Φαίνεται πως η ενίσχυση των τοιχίσκων αύξησε σημαντικά την αντοχή τους και συγκεκριμένα από 10,3 έως 20,1 φορές.



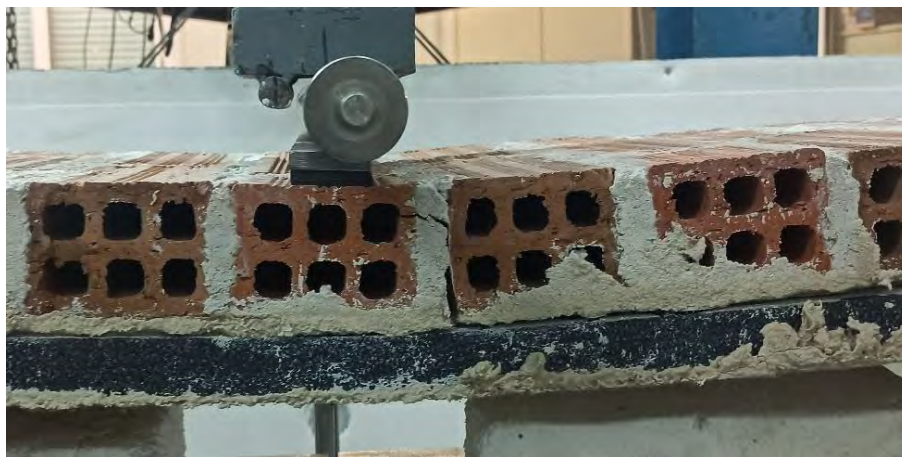


**Σχήμα 4.9:** Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP\_WALL\_W-X-I2".

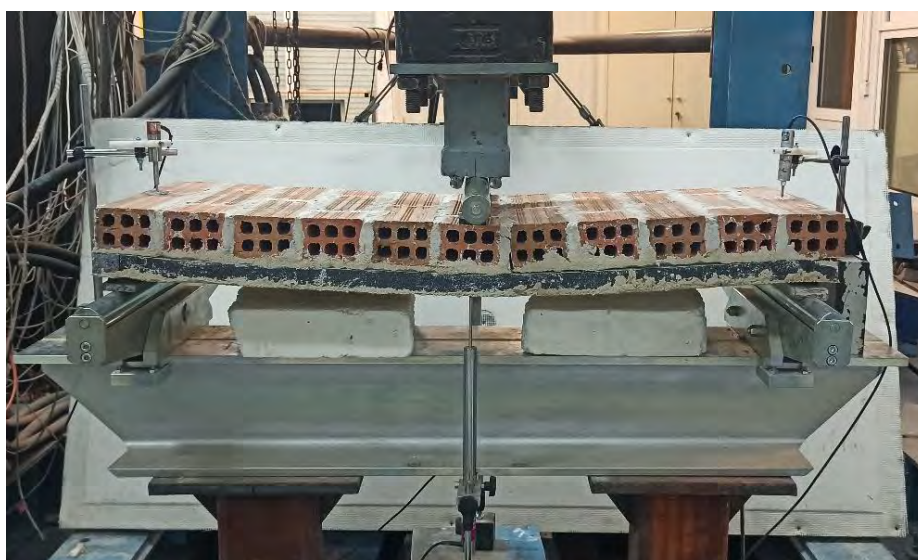
Όσον αφορά τους τρόπους αστοχίας των δοκιμίων παρατηρήθηκαν οι εξής:

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_GEO-B-I2"

Η ενίσχυση που χρησιμοποιήθηκε για το δοκίμιο, δηλαδή το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, η θερμομόνωση και το διπλό ύφασμα βασάλτη οδήγησε σε μια καμπτική αστοχία καθώς και αστοχία στη συνάφεια μεταξύ των οπτόπλινθων και της θερμομόνωσης. Στο Σχήμα 4.10 είναι ευδιάκριτη η κατακόρυφη ρωγμή στο τσιμεντοκονίαμα, στο κέντρο του ανοίγματος του τοιχοσώματος, όπως και η αποκόλληση της θερμομόνωσης. Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η μεγάλη παραμόρφωση ύψους 17,1 mm, κάνοντας έτσι τον συνδυασμό ενίσχυσης με γεωπολυμερές κονίαμα, πλέγμα βασάλτη πάνω από το θερμομονωτικό υλικό, έναν από τους πιο επιτυχημένους του πειράματος, λόγω της αρκετά μεγάλης πλαστικής περιοχής που ανέπτυξε και της υψηλής του αντοχής, φτάνοντας σε φορτίο αστοχίας ύψους 10,2 kN.



Σχήμα 4.10: Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-B-I2".



Σχήμα 4.11: Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-B-I2".

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_GEO-G-I2"

Το δοκίμιο αυτό, το οποίο ενισχύθηκε με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, θερμομόνωση και δύο στρώσεις πλέγματος υάλου, αστόχησε καμπτικά. Οι ρηγματώσεις του εμφανίστηκαν στην αριστερή πλευρά του μεσαίου οπτόπλινθου, διαπερνώντας όλα τα στρώματα ενίσχυσης και σχίζοντας μέρος του τσιμεντοκονιάματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Το δοκίμιο αστόχησε σε φορτίο 6,8 kN εμφανίζοντας βύθιση ίση με 8,9 mm, δεν κατέρρευσε καθώς η εφελκυστική αντοχή της ενίσχυσης εμπόδισε την κατάρρευση του δοκιμίου. Ο συνδυασμός των παραπάνω υλικών δεν λειτούργησε ευεργετικά, καθώς το φορτίο αστοχίας δεν ήταν υψηλό και η πλαστική περιοχή ήταν αρκετά μικρή.



**Σχήμα 4.12:** Καμπτική ρηγμάτωση του "OOP\_WALL\_GEO-G-I2".

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_CEM-B-I2"

Το συγκεκριμένο δοκίμιο ενισχύθηκε με τσιμεντοειδές κονίαμα, θερμομόνωση και δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη. Το συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσίασε αρκετές πτώσεις στο διάγραμμα φορτίου-βύθισης πρώτου τελικά αστοχήσει καμπτικά για φορτίο ίσο με 9,0 kN και αντίστοιχη βύθιση ίση με 17,8 mm. Η κατακόρυφη ρωγή που διαπέρασε τον μεσαίο οπτόπλινθο και στη συνέχεια οδήγησε σε αποκόλληση της θερμομόνωσης από την επιφάνεια των οπτόπλινθων οδήγησε σε καμπτική αστοχία καθώς και σε αστοχία συνάφειας μεταξύ θερμομόνωσης και οπτόπλινθων (Σχήμα 4.13).

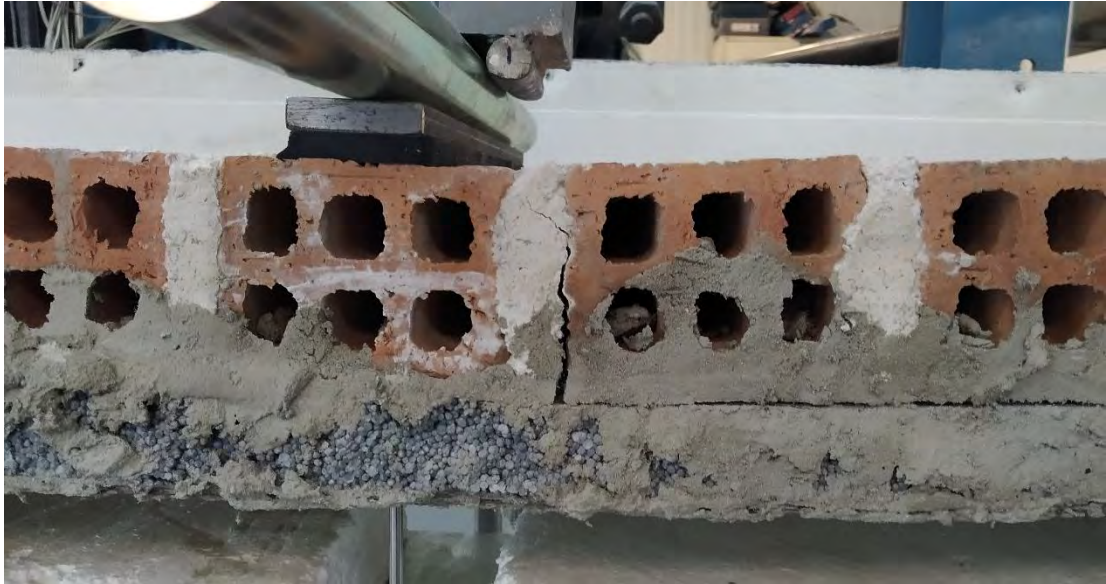


**Σχήμα 4.13:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-B-I2".

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_CEM-G-I2"

Αυτό το δοκίμιο ενισχύθηκε με τσιμεντοειδές κονίαμα, θερμομόνωση και διπλή στρώση υαλοπλέγματος. Εμφάνισε καμπτική αστοχία, με εμφανή τη κατακόρυφη ρηγμάτωση στη δεξιά παρειά του μεσαίου οπτόπλινθου, καθώς και αστοχία στη διεπιφάνεια (Σχήμα 4.14).

Το συγκεκριμένο δοκίμιο εμφάνισε τη μικρότερη αντοχή από όλα τα παραπάνω, με φορτίο αστοχίας στα 5,3 kN και βύθιση ίση με 7,3 mm, ενώ η πρώτη ρωγμή εμφανίστηκε για φορτίο ίσο με 2,1 kN.

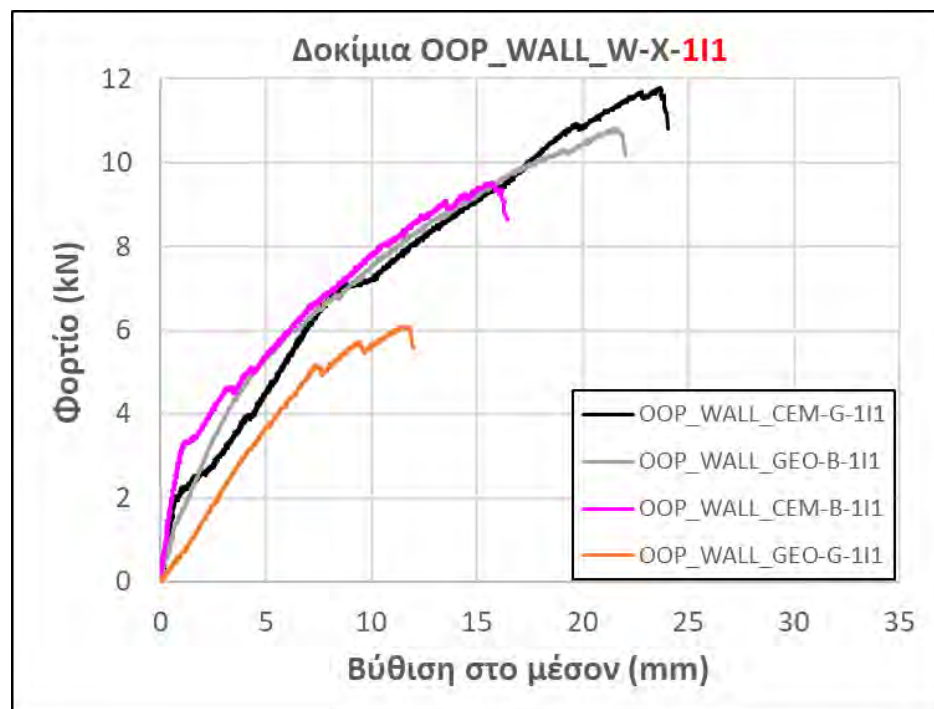


Σχήμα 4.14: Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-G-12".

#### **4.1.3 Ομάδα Δοκιμών "OOP\_WALL GEO-B-111, OOP\_WALL GEO-G-111, OOP\_WALL CEM-B-111, OOP\_WALL CEM-G-111"**

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των παραπάνω τεσσάρων ομαδοποιημένων δοκιμών. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-111, παρουσίασε το υψηλότερο φορτίο αστοχίας, με τιμή ίση με 11,8 kN και αντίστοιχη βύθιση στο μέσον ίση με 23,7 mm. Ακολουθεί το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO-B-111 με φορτίο αστοχίας 10,8 kN και αντίστοιχη βύθιση 21,6 mm. Στη συνέχεια το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B-111 αστόχησε στα 9,5 kN με βύθιση στο μέσον στα 15,7 mm και τέλος το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO\_G-111 με φορτίο αστοχίας ίσο με 6,1 kN και αντίστοιχη βύθιση στα 11,5 mm. Κατά το Στάδιο I μέχρι την πρώτη ρηγμάτωση, όλα τα δοκίμια έδειξαν γραμμική συμπεριφορά με την ελαστική δυσκαμψία να κυμαίνεται από 0,72 έως 3,05 kN/mm. Μέχρι τη στιγμή της πρώτης ρηγμάτωσης, τα επιβαλλόμενα φορτία αυξάνονταν με

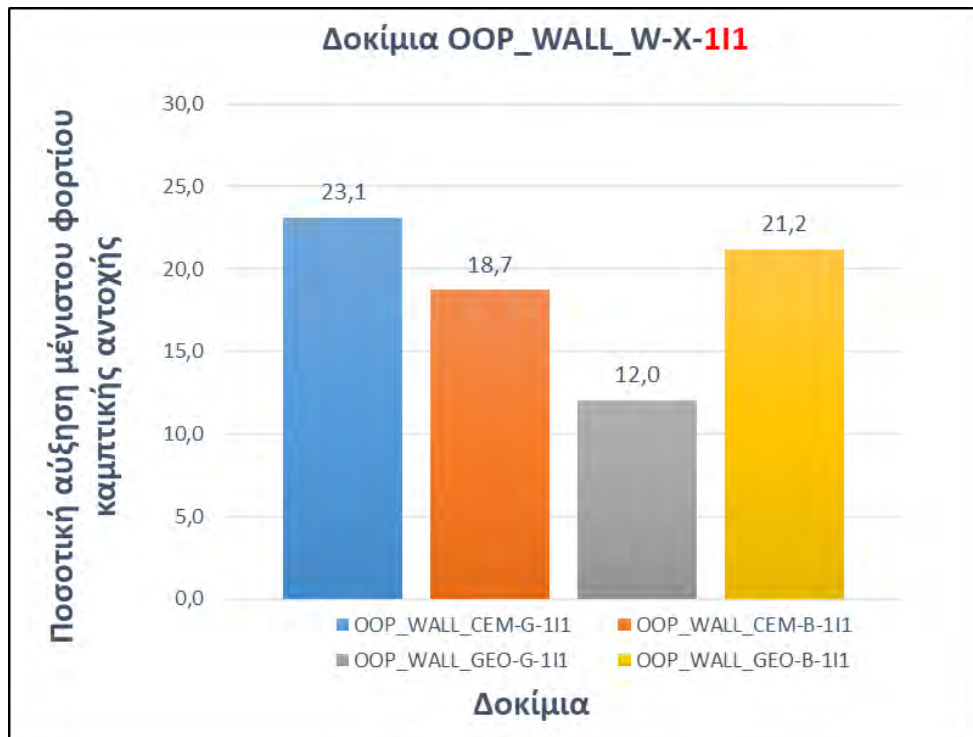
σταθερό ρυθμό και οι κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων ήταν σταθερές. Τα φορτία ρηγμάτωσης των δοκιμών κυμάνθηκαν από 1,2 έως 5,2 kN με τις αντίστοιχες βυθίσεις στο μέσον να παίρνουν τιμές από 0,6 έως 7,4 mm. Με την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών έγινε ανακατανομή των εντάσεων στα δοκίμια και παρατηρήθηκε πτώση των τιμών των δυσκαμψιών, με τιμές να κυμαίνονται από 0,25 έως 0,43 kN/mm. Έτσι, με την εισαγωγή στο Στάδιο II, οι κλίσεις των καμπύλων μειώνονταν σταδιακά και συνέχισαν σταθερή ανοδική πορεία μέχρι τη στιγμή της αστοχίας των δοκιμών. Οι τιμές των μέγιστων φορτίων αστοχίας που καταγράφηκαν διακυμάνθηκαν από 6,1 έως 11,8 kN και οι αντίστοιχες τιμές των βυθίσεων καταγράφηκαν από 11,5 έως 23,7 mm.



**Σχήμα 4.15:** Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος, των δοκιμών "OOP\_WALL\_W-X-111".

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμών, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου. Φαίνεται πως η ενίσχυση των τοιχίσκων αύξησε σημαντικά την αντοχή τους και συγκεκριμένα από 12 έως 23,1 φορές. Σημειώνεται ότι το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-111 σημείωσε την υψηλότερη αύξηση καμπτικής αντοχής σε σύγκριση με όλα τα υπόλοιπα,

καθιστώντας έτσι τον συγκεκριμένο συνδυασμό ενίσχυσης τον πιο αποτελεσματικό του συγκεκριμένου πειράματος.



**Σχήμα 4.16:** Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμών "OOP\_WALL\_W-X-111".

Όσον αφορά τους τρόπους αστοχίας των δοκιμών παρατηρήθηκαν οι εξής:

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_GEO-B-111"

Σε αυτό το δοκίμιο, το οποίο ενισχύθηκε με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη και τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού, παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία, με διαγώνια ρηγμάτωση. Η ρωγμή εμφανίστηκε μετά την πτώση της δυσκαμψίας και αναπτύχθηκε ομαλά μέχρι τη στιγμή της αστοχίας. Συγκεκριμένα, ξεκίνησε από τον μεσαίο οπτόπλινθο και διαπέρασε διαγώνια τον αρμό, τον διπλανό οπτόπλινθο, την πρώτη στρώση ενίσχυσης και το θερμομονωτικό υλικό και σταμάτησε πριν την τελευταία στρώση χωρίς να την διαπεράσει. Δεν παρατηρήθηκε καμία ρωγμή στην κάτω επιφάνεια του τοιχοσώματος (Σχήμα 4.17).



**Σχήμα 4.17:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-B-111".

#### Δοκίμιο "OOP\_WALL\_GEO-G-111"

Σε αυτό το δοκίμιο, το οποίο ενισχύθηκε κονιάμα γεωπολυμερικής σύστασης, δύο στρώσεις υαλοπλέγματος και τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού, παρατηρήθηκε αστοχία καμπτικής μορφής. Συγκεκριμένα εμφανίστηκε κάθετη ρηγμάτωση στον αρμό της αριστερής παρειάς του μεσαίου οπτόπλινθου, με σύντομη επακόλουθη ολική αστοχία, λόγω αστοχίας του κονιάματος (Σχήμα 4.18). Η ρωγμή διαπέρασε όλο το πάχος του δοκιμίου και έγινε ορατή στην κάτω πλευρά του (Σχήμα 4.19).



**Σχήμα 4.18:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-G-111".



**Σχήμα 4.19:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-G-111".

#### Δοκίμιο "OOP WALL CEM-B-111"

Σε αυτό το δοκίμιο, το οποίο ενισχύθηκε με τσιμεντοειδές κονίαμα, δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη και τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού, παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία, με διαγώνια ρηγμάτωση. Συγκεκριμένα η ρωγμή ξεκίνησε από τον οπτόπλινθο στα δεξιά του μεσαίου, στην δεξιά κάτω γωνία του. Αναπτύχθηκε διαγώνια και προς τις δύο κατευθύνσεις, διαπερνώντας ολόκληρο τον οπτόπλινθο και το θερμομονωτικό υλικό (Σχήμα 4.20). Δεν παρατηρήθηκε ρηγμάτωση στην κάτω επιφάνεια του τοιχοσώματος.



**Σχήμα 4.20:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-B-111".



Δοκίμιο "OOP\_WALL\_CEM-G-111"

Σε αυτό το δοκίμιο, το οποίο ενισχύθηκε με τσιμεντοειδές κονίαμα, δύο στρώσεις πλέγματος βασάλτη και τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού, παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία, με διαγώνια ρηγμάτωση. Συγκεκριμένα η ρωγμή ξεκίνησε από τον οπτόπλινθο δεξιά του μεσαίου, αναπτύχθηκε διαγώνια προς τις δύο κατευθύνσεις, θραύοντας τον οπτόπλινθο και διαπερνώντας τις στρώσεις ενίσχυσης και το θερμομονωτικό υλικό (Σχήμα 4.21). Παρατηρήθηκε τοπικά, αποκόλληση του πλέγματος από το κονίαμα (Σχήμα 4.22).



**Σχήμα 4.21:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-G-111".



**Σχήμα 4.22:** Εικόνα αστοχίας του δοκιμίου "OOP\_WALL\_CEM-G-111".

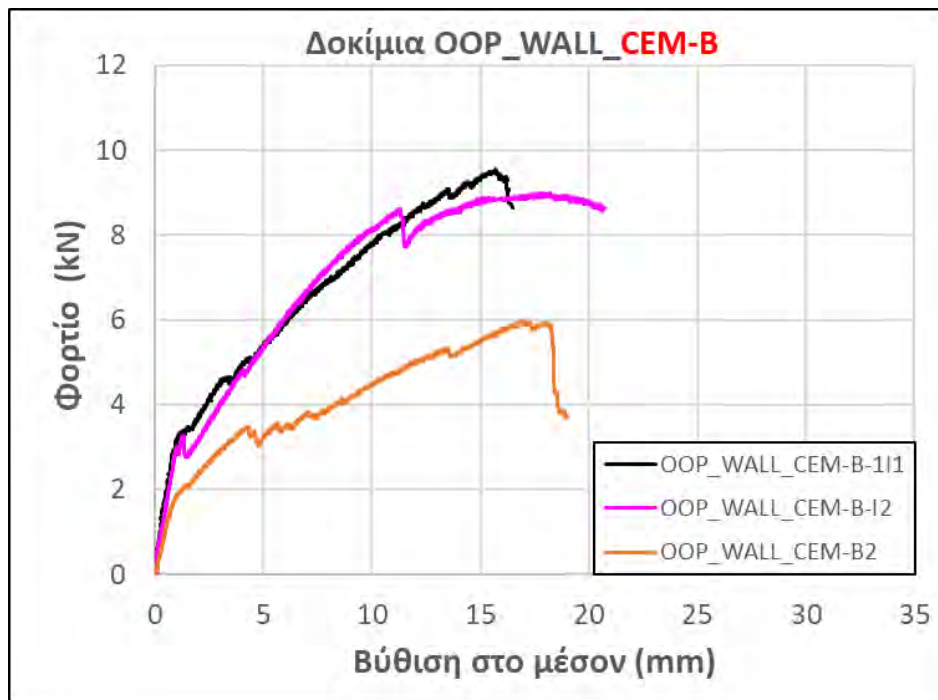
## 4.2 Σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των τοιχοσωμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται ομαδοποιημένα με βάση τις παραμέτρους του πειράματος, τα αποτελέσματα των δοκιμών των δώδεκα τοιχοσωμάτων. Σκοπός είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που αντλήθηκαν από τα διάφορα συστήματα ενίσχυσης και η ανάδειξη των εκάστοτε βέλτιστων λύσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον των δοκιμών, ομαδοποιημένα κατά κονίαμα, πλέγμα ενίσχυσης και διάταξη θερμομόνωσης. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με τσιμεντοειδές κονίαμα (CEM) και πλέγμα βασάλτη (B) ή υάλου (G) και αυτά που ενισχύθηκαν με το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης (GEO) και πλέγμα βασάλτη ή υάλου. Επίσης παρατίθενται τα συγκριτικά ραβδογράμματα των δοκιμών που ενισχύθηκαν είτε με τσιμεντοειδές κονίαμα είτε με το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, καθώς και τα ραβδογράμματα των διαφορετικών διατάξεων θερμομόνωσης.

### 4.2.1 Δοκίμια με τσιμεντοειδές κονίαμα και πλέγμα βασάλτη "OOP WALL CEM-B"

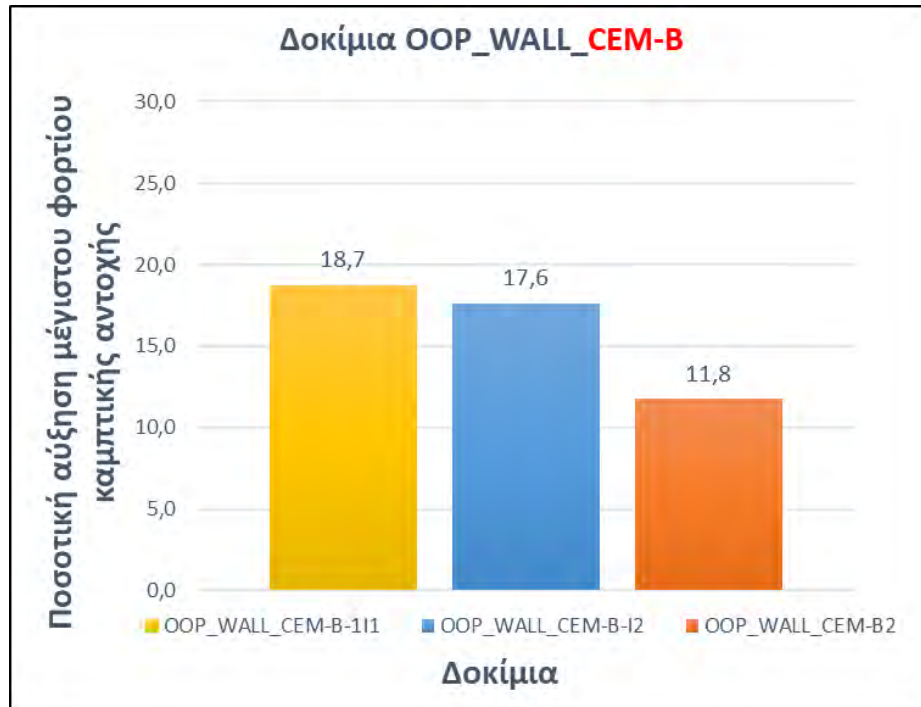
Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης των τριών δοκιμών "OOP\_WALL\_CEM-B-111", "OOP\_WALL\_CEM-B-12" και "OOP\_WALL\_CEM-B2". Με βάση τα μέγιστα φορτία αστοχίας που καταγράφηκαν, φαίνεται πως το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B-111 με τον συνδυασμό ενίσχυσης με τσιμεντοειδές κονίαμα, πλέγμα βασάλτη και ενδιάμεση τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού είχε τη βέλτιστη απόδοση, με φορτίο αστοχίας ίσο με 9,5 kN και αντίστοιχη βύθιση ίση με 15,7 mm. Ακολουθεί το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B-12 με ελαφρά μικρότερο φορτίο αστοχίας στα 9,0 kN αλλά λίγο μεγαλύτερη αντίστοιχη βύθιση στα 17,8 mm. Η πορεία των καμπυλών των δύο δοκιμών, από την έναρξη της δοκιμής μέχρι την αστοχία, ήταν παρόμοια. Αυτό φανερώνει τον παρόμοιο τρόπο λειτουργίας των δύο συστημάτων ενίσχυσης με θερμομονωτικό υλικό. Αντιθέτως, το δοκίμιο χωρίς θερμομονωτικό υλικό είχε διαφορετική απόκριση στην δοκιμή, με περισσότερες πτώσεις του επιβαλλόμενου φορτίου και φανερά χαμηλότερες αντοχές. Το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B2 έδειξε την χαμηλότερη απόδοση από τον συγκεκριμένο συνδυασμό, με φορτίο αστοχίας ίσο με 6,0 kN και βύθιση ίση με 16,9 mm. Η μικρότερη αντοχή του τελευταίου δικαιολογείται από τη μικρότερη διατομή του, σε σύγκριση με τη μεγαλύτερη

διατομή των δύο πρώτων λόγω του επιπρόσθετου πάχους 3 cm της θερμομόνωσης. Οι ελαστικές δυσκαμψίες των δοκιμών είχαν μικρή απόκλιση μεταξύ τους καθώς κυμάνθηκαν από 2,05 έως 3,05 kN/mm, με το δοκίμιο *OOP\_WALL\_CEM-B-111* να έχει την υψηλότερη τιμή ίση με 3,05 kN/mm και το *OOP\_WALL\_CEM-B2* την χαμηλότερη ίση με 2,05 kN/mm.



**Σχήμα 4.23:** Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμών "OOP\_WALL\_CEM-B".

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμών, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου. Φαίνεται ότι η αντοχή των δοκιμών αυξήθηκε από 11,8 έως 18,7 φορές.

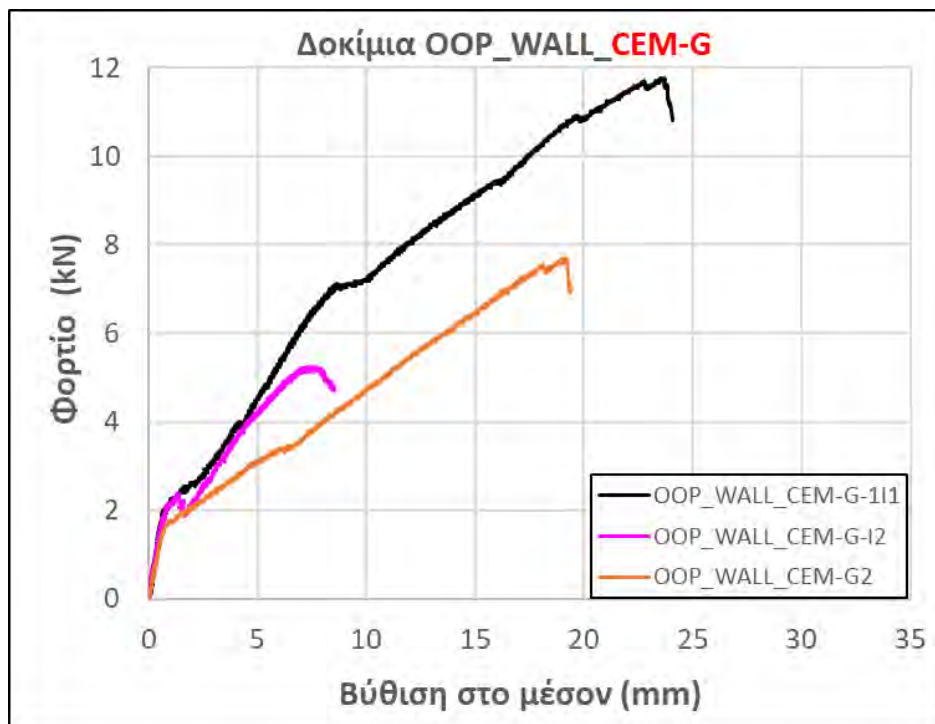


**Σχήμα 4.24:** Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων “OOP\_WALL\_CEM-B”.

#### **4.2.2 Δοκίμια με τσιμεντοειδές κονίαμα και υαλόπλεγμα “OOP\_WALL\_CEM-G”**

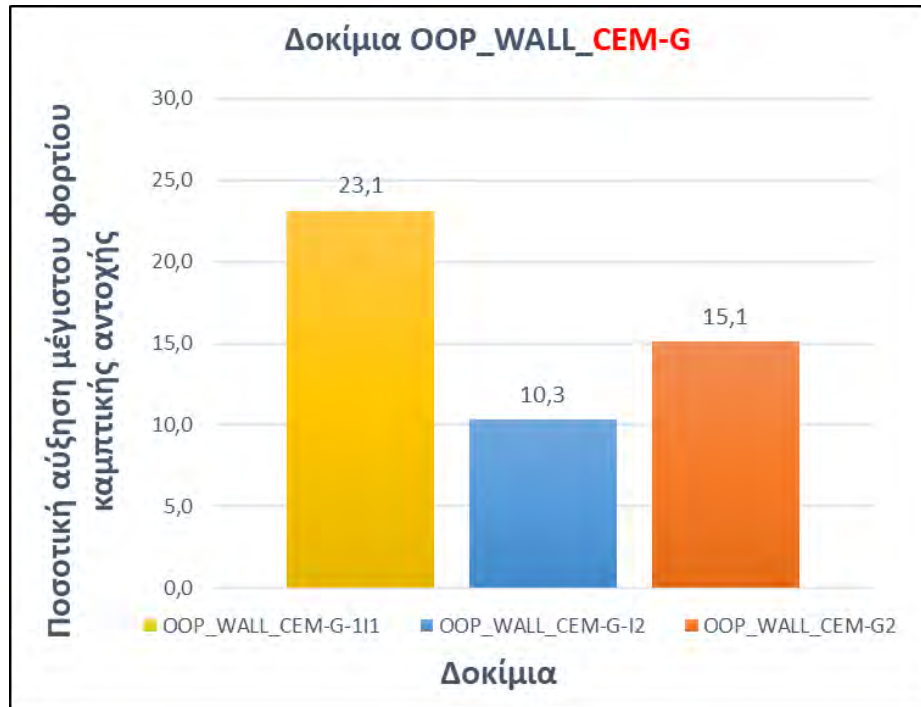
Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης των τριών δοκιμίων “OOP\_WALL\_CEM-G-111 , OOP\_WALL\_CEM-G-12 και OOP\_WALL\_CEM-G2”. Με βάση τα μέγιστα φορτία αστοχίας που καταγράφηκαν φαίνεται πως το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-111 είχε τη βέλτιστη απόδοση, με φορτίο αστοχίας ίσο με 11,8 kN και αντίστοιχη βύθιση ίση με 23,7 mm. Σημειώνεται πως το συγκεκριμένο δοκίμιο επέδειξε τις υψηλότερες τιμές μέγιστου φορτίου και βύθισης, γεγονός το οποίο υποδεικνύει την καλύτερη αποδοτικότητα του συνδυασμού ενίσχυσης με τσιμεντοειδές κονίαμα, υαλόπλεγμα και ενδιάμεση τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού, σε σύγκριση με όλους τους υπόλοιπους. Ακολουθεί το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G2 με φορτίο αστοχίας στα 7,7 kN και αντίστοιχη βύθιση στα 19,1 mm. Το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-12 έδειξε την χαμηλότερη απόδοση, με φορτίο αστοχίας ίσο με 5,3 kN και βύθιση ίση με 7,3 mm. Λαμβάνοντας υπόψιν τον τρόπο αστοχίας του τελευταίου, (κάθετη ρωγμή μεταξύ αρμού-οπτόπλινθου και αποκόλληση στη διεπιφάνεια θερμομόνωσης-τοιχοσώματος), η χαμηλή επίδοσή του οφείλεται σε αδυναμία

του συνδετικού κονιάματος και σε κακή συνάφεια του κονιάματος ενίσχυσης και της θερμομόνωσης με την επιφάνεια του τοιχοσώματος. Οι ελαστικές δυσκαμψίες των δοκιμίων είχαν μικρή απόκλιση μεταξύ τους και τα δοκίμια επέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά κατά το Στάδιο Ι, πριν την εμφάνιση της πρώτης ρηγμάτωσης. Οι τιμές των δυσκαμψιών κυμάνθηκαν από 2,30 έως 2,64 kN/mm, με το δοκίμιο *OOP\_WALL\_CEM-G-111* να έχει την υψηλότερη τιμή ίση με 2,64 kN/mm και το *OOP\_WALL\_CEM-G2* την χαμηλότερη ίση με 2,30 kN/mm.



**Σχήμα 4.25:** Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμίων "OOP\_WALL\_CEM-G".

Στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμίων, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου, με την αύξηση να κυμαίνεται από 10,3 έως 23,1 φορές.

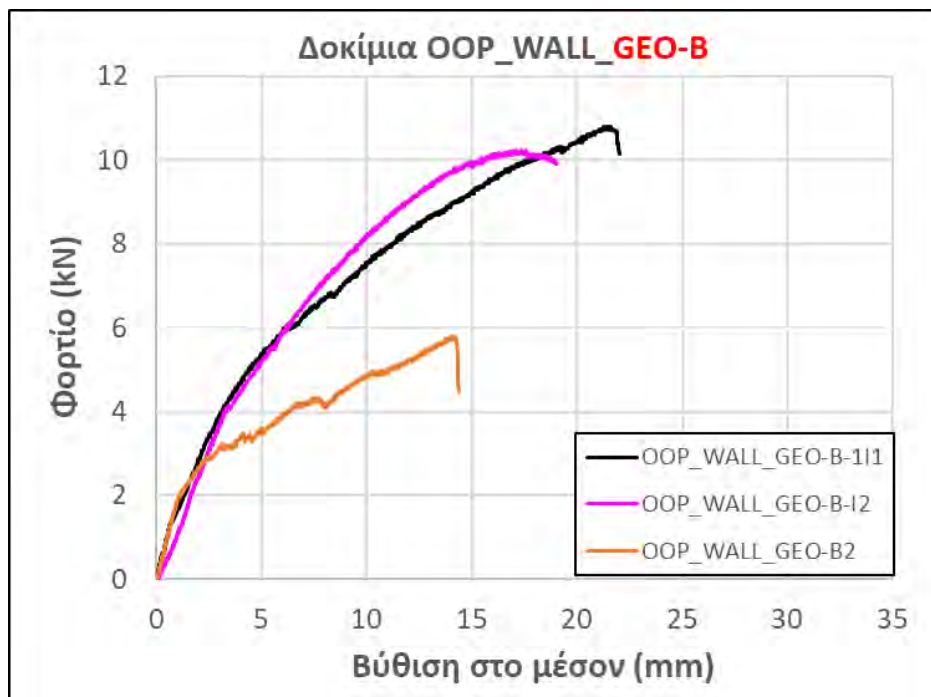


Σχήμα 4.26: Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP\_WALL\_CEM-G".

#### 4.2.3 Δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και πλέγμα βασάλτη "OOP WALL GEO-B"

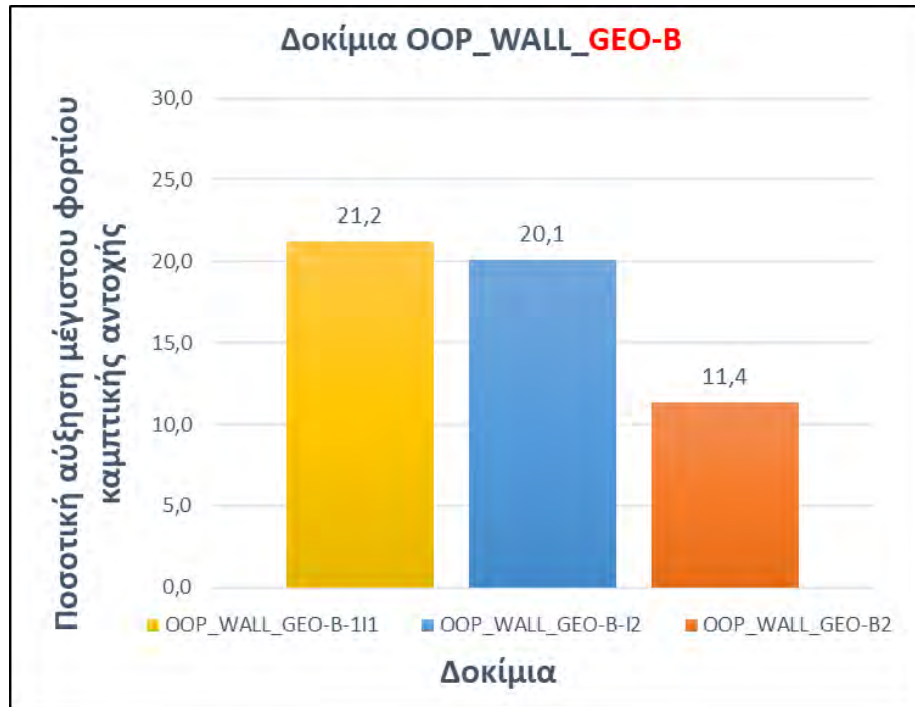
Στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με κονίαμα γεωπολυμερούς σύστασης και πλέγμα βασάλτη. Συγκεκριμένα η σύγκριση γίνεται μεταξύ των δοκιμίων "OOP\_WALL\_GEO-B-111", "OOP\_WALL\_GEO-B12" και "OOP\_WALL\_GEO-B2". Ήταν αναμενόμενο πως το δοκίμιο "OOP\_WALL\_GEO-B2" θα είχε τη μικρότερη απόδοση εκ των τριών, καθώς η απουσία θερμομόνωσης είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της διατομής του δοκιμίου και κατά συνέπεια την μικρότερη αντοχή σε κάμψη. Στο διάγραμμα φαίνεται πως πρώτου αστοχήσει το δοκίμιο εμφάνισε αρκετές ρηγματώσεις, καταλήγοντας τελικά σε φορτίο αστοχίας ίσο με 5,8 kN, με αντίστοιχη βύθιση 14,1 mm και ελαστική δυσκαμψία 1,89 kN/mm. Αντίθετα το "OOP\_WALL\_GEO-B12" παρόλο που είχε μικρότερη ελαστική δυσκαμψία και ίση με 1,26 kN/mm εμφάνισε πολύ καλύτερη συμπεριφορά καθώς ο συνδυασμός μόνωσης και διπλού εξωτερικού πλέγματος βασάλτη προσέδωσε στο δοκίμιο τη δυνατότητα να αυξήσει την ελαστική του απόκριση. Τέλος το

δοκίμιο “OOP\_WALL\_GEO-B-111” ρηγματώθηκε αρκετά νωρίς για φορτίο ίσο με 1,2 kN, έχοντας αναπτύξει μια βύθιση ίση με 0,6 mm, όμως αστόχησε με το υψηλότερο φορτίο, αυτό των 10,8 kN δημιουργώντας μια βύθιση ίση με 21,6 mm. Η ελαστική του δυσκαμψία ήταν 1,87 kN/mm, σχεδόν ίδια με του “OOP\_WALL\_GEO-B2”. Επομένως το τελευταίο απέδωσε καλύτερα εκ των τριών, παρόλο που με το “OOP\_WALL\_GEO-B2” είχαν παρόμοια συμπεριφορά το προαναφερθέν έδειξε μεγαλύτερη ικανότητας αντοχής.



**Σχήμα 4.27:** Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμών “OOP\_WALL\_GEO-B”.

Στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμών, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου, με την αύξηση να κυμαίνεται από 11,4 έως 21,2 φορές.



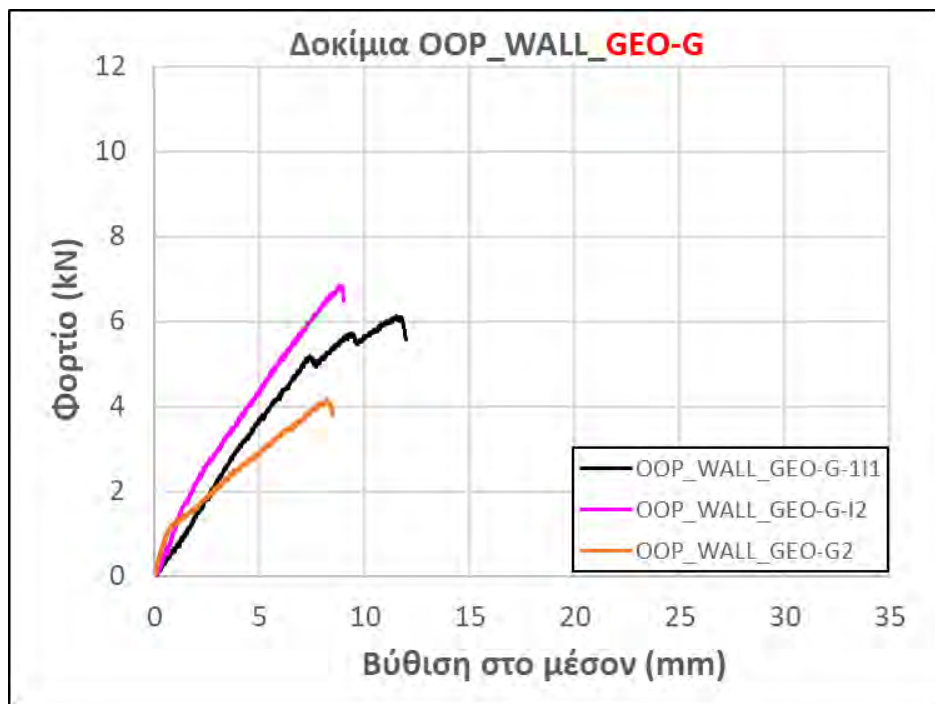
**Σχήμα 4.28:** Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμών “OOP\_WALL\_GEO-B”.

#### **4.2.4 Δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και υαλόπλεγμα “OOP\_WALL\_GEO-G”**

Στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης (Σχήμα 4.29) παρατίθενται οι συμπεριφορές των “OOP\_WALL\_GEO-G-111”, “OOP\_WALL\_GEO-G12” και “OOP\_WALL\_GEO-G2”. Η χαμηλή απόδοση του συνδυασμού ενίσχυσης με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και υαλόπλεγμα φαίνεται από τις χαμηλές τιμές των μέγιστων φορτίων αντοχής των τριών δοκιμών. Η πορτοκαλί καμπύλη συμβολίζει την συμπεριφορά του “OOP\_WALL\_GEO-G2”, το οποίο φαίνεται να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ελαστική δυσκαμψία με τιμή ίση με 1,58 kN/mm, όμως για φορτίο ίσο με 1,1 kN εμφανίζει τη πρώτη ρηγμάτωση με αποτέλεσμα η κλίση του διαγράμματος να μειώνεται αρκετά και το δοκίμιο να αστοχεί για, το μικρότερο εκ των τριών φορτίων και ίσο με 4,2 kN. Έπειτα η μαύρη καμπύλη απεικονίζει το “OOP\_WALL\_GEO-G-111” το οποίο φέρει μικρότερη ελαστική δυσκαμψία από το προαναφερθέν και ίση με 0,72 kN, ωστόσο η καμπτική του αντοχή είναι αρκετά υψηλότερη με αποτέλεσμα να εμφανίζει τη πρώτη ρηγμάτωση στα 5,2 kN και εν



τέλει να αστοχεί, μετά από κάποιες ακόμα ρηγματώσεις, στα 6,1 kN. Τέλος, η μωβ καμπύλη απεικονίζει το "OOP\_WALL\_GEO-G12" το οποίο φέρει λίγο μικρότερη ελαστική δυσκαμψία ίση με 1,23 kN/mm από το "OOP\_WALL\_GEO-G2". Το δοκίμιο με τη διπλή στρώση υαλοπλέγματος εξωτερικά της θερμομόνωσης υπέμεινε φορτίο ύψους 1,7 kN προτού ρηγματωθεί, χωρίς ωστόσο να μεταβληθεί σημαντικά η κλίση της καμπύλης του, φτάνοντας έτσι στην υψηλότερη αντοχή, από τα τρία δοκίμια, ίση με 6,8 kN.



**Σχήμα 4.29:** Διαγράμματα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμών "OOP\_WALL\_GEO-G".

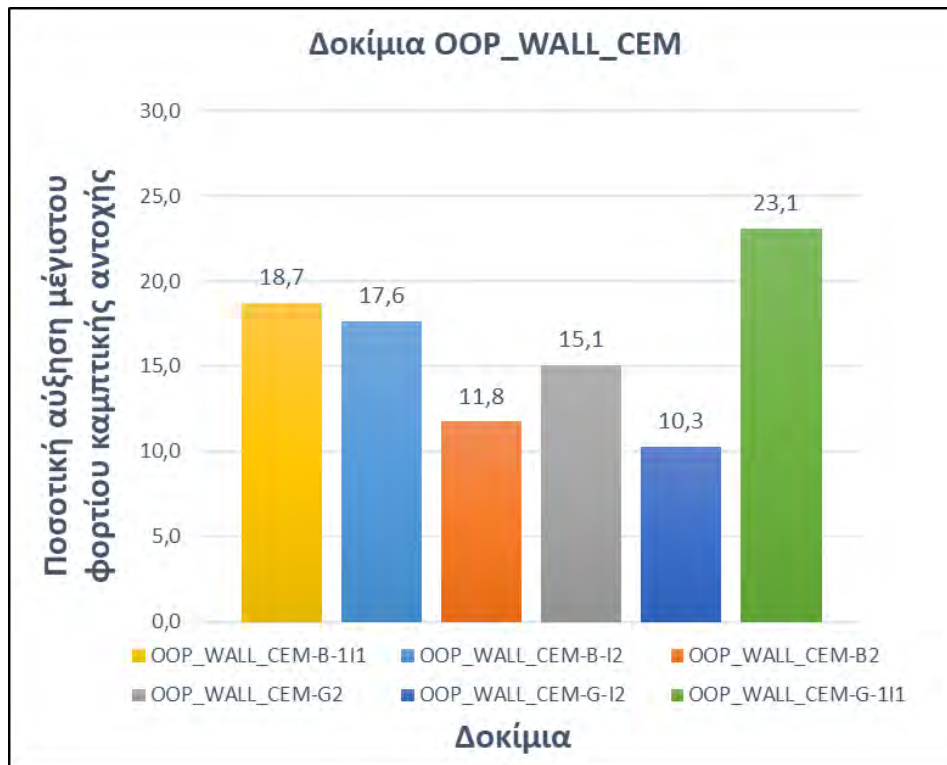
Στο Σχήμα 4.30 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα αύξησης των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής των παραπάνω δοκιμών, σε σύγκριση με την αντοχή του μη ενισχυμένου, με τις αυξήσεις των φορτίων να κυμαίνονται από 8,2 έως 13,4 φορές.



Σχήμα 4.30: Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμών "OOP\_WALL\_GEO-G".

#### 4.2.5 Δοκίμια με κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης "OOP WALL CEM"

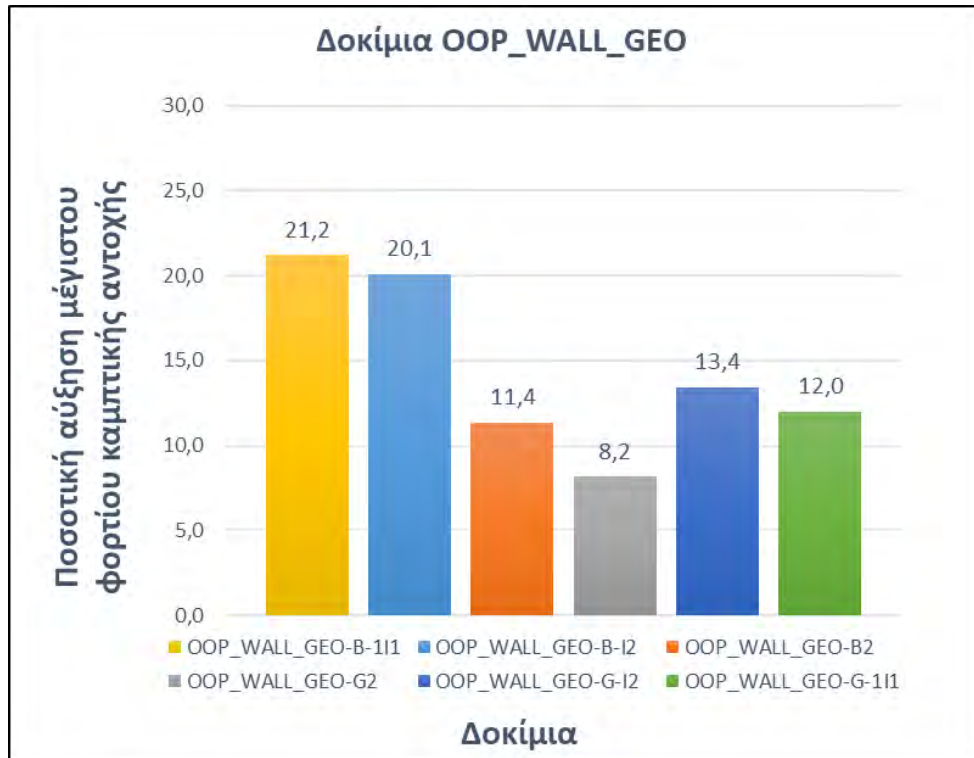
Παρακάτω, παρατίθεται στο Σχήμα 4.31, το συγκριτικό ραβδόγραμμα των δοκιμών που ενισχύθηκαν με το κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης. Οι τιμές των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής αυξήθηκαν από 10,3 έως 23,1 φορές σε σύγκριση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο, η αντοχή του οποίου ήταν μόλις 0,51 kN. Από το σύνολο των δοκιμών που ενισχύθηκαν με το κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης, την μεγαλύτερη αποδοτικότητα είχε το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-111, του οποίου η αντοχή αυξήθηκε κατά 23,1 φορές.



**Σχήμα 4.31:** Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμίων "OOP\_WALL\_CEM".

#### 4.2.6 Δοκίμια με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης "OOP WALL GEO"

Παρακάτω, παρατίθεται στο Σχήμα 4.32, το συγκριτικό ραβδόγραμμα των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης. Οι τιμές των μέγιστων φορτίων καμπτικής αντοχής αυξήθηκαν από 8,2 έως 21,2 φορές σε σύγκριση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο. Από το σύνολο των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, την μεγαλύτερη αποδοτικότητα είχε το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B-1I1, του οποίου η αντοχή αυξήθηκε κατά 21,2 φορές.



Σχήμα 4.32: Ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμών "OOP\_WALL\_GEO".

#### 4.2.7 Σύγκριση θερμικά μονωμένων δοκιμών

Παρακάτω στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται το συγκριτικό ραβδόγραμμα των δοκιμών που ενισχύθηκαν και μονώθηκαν με τους δύο διαφορετικούς τρόπους που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παρακάτω, τα δοκίμια που απέδωσαν καλύτερα ήταν αυτά στα οποία εφαρμόστηκε η διάταξη θερμομόνωσης 111. Ωστόσο εξαίρεση αποτέλεσαν τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με πλέγμα υάλου και γεωπολυμερές καθώς είχαν χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Επίσης, μεγάλη απόκλιση παρατηρείται ανάμεσα στα δοκίμια στα οποία τοποθετήθηκε υαλόπλεγμα και κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης, με το OOP\_WALL\_CEM-G-111 να αποδίδει πολύ καλά αυξάνοντας έως και 23,1 φορές το μέγιστο φορτίο καμπτικής αντοχής, ενώ σε αντίθεση το OOP\_WALL\_CEM-G-12 είχε τη χαμηλότερη απόδοση αυξάνοντας το μόλις κατά 10,3 φορές. Ακόμα, παρατηρείται ότι ο συνδυασμός τσιμεντοκονιάματος με πλέγμα βασάλτη είχε παρόμοια αύξηση αντοχής για τις δύο περιπτώσεις μόνωσης καθώς το OOP\_WALL\_CEM-B-12 αύξησε την αντοχή του κατά 17,6 φορές και το OOP\_WALL\_CEM-B-111 κατά 18,7. Ομοίως, ο συνδυασμός ενίσχυσης με

κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και πλέγμα βασάλτη είχε αντίστοιχα κοντινά αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις μόνωσης, με το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO-B-I2 να εμφανίζει αύξηση κατά 20,1 φορές και το δοκίμιο OOP\_WALL\_GEO-B-111 κατά 21,2.

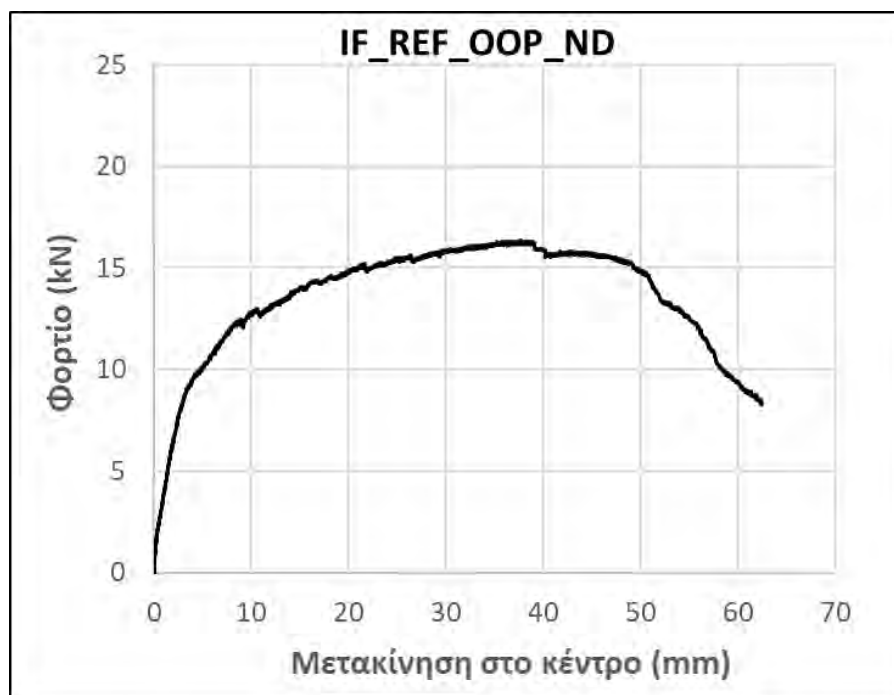


**Σχήμα 4.33:** Συγκριτικό ραβδόγραμμα αύξησης μέγιστου φορτίου καμπτικής αντοχής των δοκιμών με διάταξη θερμομόνωσης I2 και 111.

### 4.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων του τοιχοπληρωμένου πλαισίου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτός επιπέδου δοκιμής της τοιχοπλήρωσης. Η τοιχοπλήρωση, η οποία είναι εμφανιζόμενη σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος, υπόκειται σε εκτός επιπέδου φόρτιση μέχρι να επέλθει η αστοχία της. Το όνομα του δοκιμίου είναι IF\_REF\_OOP\_ND από τα αρχικά των *InfilledFrame\_Reference\_OutOfPlane\_NoDamage*.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (Σχήμα 4.34) στο κέντρο της τοιχοπλήρωσης, η οποία υποβλήθηκε σε εκτός επιπέδου φόρτιση του πλαισίου. Η τιμή του μέγιστου φορτίου αστοχίας ήταν 16,4 kN και η αντίστοιχη μετακίνηση στο κέντρο της τοιχοπλήρωσης ήταν 37,8 mm. Σημειώνεται ότι η τιμή της μετακίνησης στο κέντρο είναι ο μέσος όρος των τιμών των μετρήσεων που λήφθηκαν από τα δύο LVTD's που είχαν τοποθετηθεί στο κεντρικό τμήμα της τοιχοπλήρωσης.

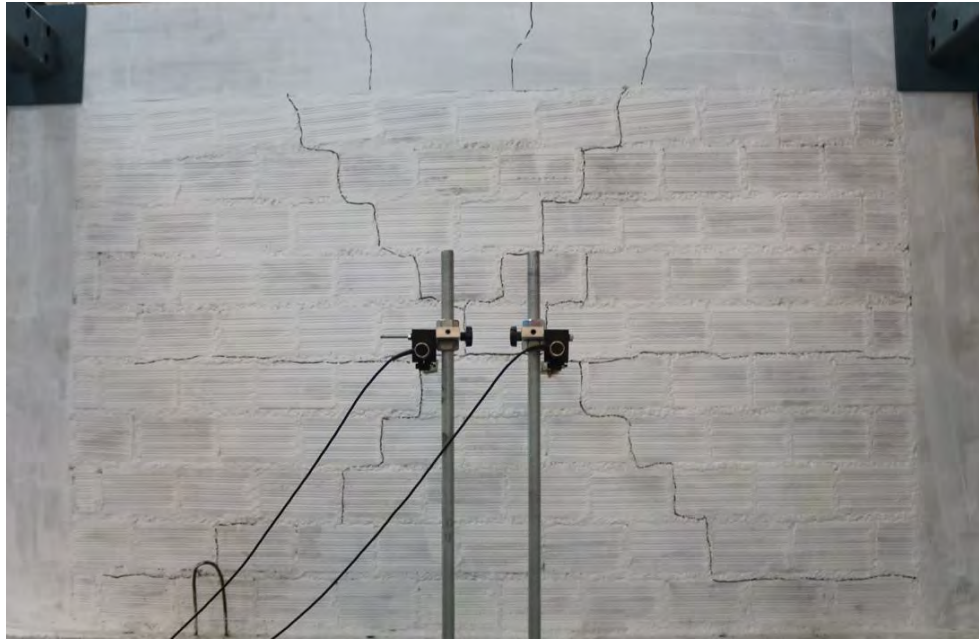


Σχήμα 4.34: Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης στο κέντρο της τοιχοπλήρωσης του δοκιμίου "IF\_REF\_OOP\_ND".

Οι πρώτες ρωγμές ήταν οριζόντιες (Σχήμα 4.35α) και εμφανίστηκαν περίπου στα 7 kN. Μέχρι τη στιγμή αυτή, η κλίση του διαγράμματος φορτίου-μετακίνησης ήταν σταθερή και αναπτυσσόταν γραμμικά, με την τιμή της ελαστικής δυσκαμψίας να ισούται με 2,48 kN/mm. Μετά τα 9 kN οι ρωγμές αναπτύχθηκαν ακολουθώντας το μοτίβο των αρμών μεταξύ των οπτόπλινθων (Σχήμα 4.35β). Η κλίση του διαγράμματος μειωνόταν σταδιακά και όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν περίπου 13 kN εμφανίστηκαν εντονότερες ρωγμές. Από εκεί και έπειτα η κλίση του διαγράμματος μειώθηκε περισσότερο και το διάγραμμα απέκτησε καμπύλη μορφή. Οι ρωγμές συνεχίστηκαν στο ίδιο μοτίβο μέχρι το τέλος της δοκιμής, όπου το επιβαλλόμενο φορτίο ισούταν με 16,4 kN.



(α)



(β)

**Σχήμα 4.35:** Ανάπτυξη ρωγμών στην τοιχοπλήρωση: (α) πρώτη οριζόντια ρηγματώση; (β) διαγώνια κλιμάκωση ρηγματώσης.

Η παραμορφωμένη εικόνα της τοιχοπλήρωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.36 και Σχήμα 4.37. Με κοινό σημείο το κέντρο της επιφάνειας, αναπτύχθηκαν ρωγμές διαγώνια προς τις τέσσερις γωνίες του πλαισίου ακολουθώντας το μοτίβο των αρμών και δημιουργώντας την εικόνα ενός "X". Η τοιχοπλήρωση καμπυλώθηκε ομοιόμορφα και η μέγιστη καμπύλωση της επιφάνειάς της παρατηρήθηκε στο κέντρο της, εκεί όπου ασκούταν το επιβαλλόμενο φορτίο (Σχήμα 4.36). Στις περιμετρικές παρειές της τοιχοπλήρωσης με το πλαίσιο δεν συνέβη αποκόλληση, με αποτέλεσμα να μείνει πλήρως εμφαντούμενη στο πλαίσιο και να μην καταρρεύσει. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.37, οι ρηγματώσεις της τοιχοπλήρωσης αναπτύχθηκαν συμμετρικά στην επιφάνειά της, υποδεικνύοντας έτσι την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου από το έμβολο στην επιφάνεια της φόρτισης.



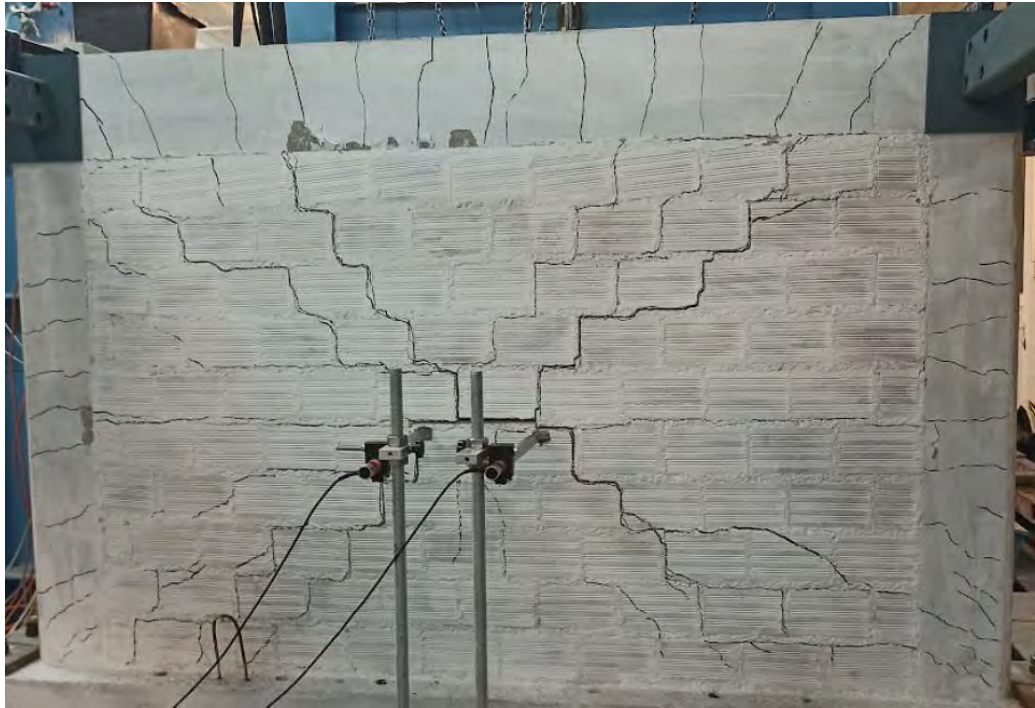


(α)



(β)

**Σχήμα 4.36:** Παραμορφωμένη εικόνα τοιχοπλήρωσης: (α) πλάγια όψη; (β) πίσω όψη.



**Σχήμα 4.37:** Τελική εικόνα της ρηγματωμένης τοιχοπλήρωσης.

## Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και συμπεράσματα

### 5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές των τοιχοσωμάτων και αποδίδονται κάποια βασικά συμπεράσματα.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η καμπτική αντοχή ενός μη ενισχυμένου τοιχοσώματος είναι ίση με 0,51 kN. Με βάση τις τιμές των μέγιστων φορτίων αντοχής που λήφθηκαν από τις δοκιμές των δώδεκα ενισχυμένων τοιχοσωμάτων, οι οποίες κυμαίνονται από 4,2 έως 11,8 kN, είναι φανερό πως η ενίσχυση με IAM αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε κάμψη. Συγκεκριμένα:

- Όλα τα δοκίμια, στα οποία δεν τοποθετήθηκε θερμομόνωση εμφάνισαν αρκετά μεγάλη ελαστική δυσκαμψία και σχεδόν ίση με αυτά στα οποία τοποθετήθηκε θερμομονωτικό υλικό. Ωστόσο η αντοχή τους σε κάμψη ήταν εξαιρετικά μικρή, θέτοντας τα τελευταία στην λίστα με τους καλύτερους συνδυασμούς ενίσχυσης.
- Η αύξηση της αντοχής ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια με το θερμομονωτικό υλικό, λόγω αύξησης του πάχους της διατομής και κατά συνέπεια του μέγιστου φορτίου αντοχής των τοιχοσωμάτων.
- Από όλα τα ενισχυμένα δοκίμια, το OOP\_WALL\_CEM-G-1I1 είχε το μεγαλύτερο φορτίο αντοχής, ίσο με 11,8 kN και συνεπώς την μεγαλύτερη αύξηση αντοχής κατά 23,1 σε σύγκριση με το μη ενισχυμένο. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός ενίσχυσης λοιπόν, ήταν ο πιο αποτελεσματικός αυτού του πειράματος.
- Συνδυάζοντας τσιμεντοκονίαμα και πλέγμα βασάλτη με την εφαρμογή ενίσχυσης τύπου 1I1, λήφθηκε η βέλτιστη αντοχή σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συνδυασμούς της συγκεκριμένης ομάδας ενίσχυσης, με αύξησης της αντοχής κατά 18,7 φορές.

- Συνδυάζοντας τσιμεντοκονίαμα και υαλόπλεγμα με την εφαρμογή ενίσχυσης τύπου 111, λήφθηκε η βέλτιστη αντοχή σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συνδυασμούς της συγκεκριμένης ομάδας ενίσχυσης αλλά και η μέγιστη αντοχή σε σύγκριση με όλα τα δοκίμια του πειράματος, με αύξησης της αντοχής κατά 23,1 φορές.
- Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές της ελαστικής δυσκαμψίας των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με το τσιμεντοειδές κονίαμα και το υαλόπλεγμα είχαν μικρή απόκλιση μεταξύ τους, καθώς κυμάνθηκαν από 2,30 έως 2,64 kN/mm. Το ίδιο ισχύει και για τον συνδυασμό ενίσχυσης με τσιμεντοειδές κονίαμα και πλέγμα βασάλτη, με τις τιμές της ελαστικής δυσκαμψίας να κυμαίνονται από 2,05 έως 3,05 kN/mm. Αυτό υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα και τη σταθερή απόδοση του τσιμεντοειδούς κονιάματος στις συγκεκριμένες ενισχύσεις.
- Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης και πλέγμα βασάλτη εμφάνισαν μεγαλύτερη καμπτική αντοχή από αυτά που ενισχύθηκαν με το ίδιο κονίαμα και υαλόπλεγμα.
- Από την ομάδα των OOP\_WALL\_GEO-B, το OOP\_WALL\_GEO-B-111 συμπεριφέρθηκε καλύτερα φτάνοντας σε αντοχή ύψους 10,8 kN και εμφανίζοντας αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά 21,2 φορές. Αντίστοιχα, από την ομάδα OOP\_WALL\_GEO-G το OOP\_WALL\_GEO-G-12 είχε το υψηλότερο φορτίο αστοχίας, ίσο με 6,8 kN και αύξηση αντοχής κατά 13,4 φορές.
- Η χρήση του πλέγματος βασάλτη σε κάθε περίπτωση αύξησε πάνω από 11,4 φορές τη μέγιστη καμπτική αντοχή, με τον υψηλότερη αύξηση αντοχής να είναι αυτή του δοκιμίου "OOP\_WALL\_GEO-B-111", κατά 21,2 φορές.
- Σε αντίθεση, η μικρότερη αύξηση της καμπτικής αντοχής με τη χρήση του υαλοπλέγματος ήταν μόλις 8,2 φορές, ενώ στο "OOP\_WALL\_CEM-G-111" η αντοχή αυξήθηκε πολύ περισσότερο, κατά 23,1 φορές, ξεπερνώντας το "OOP\_WALL\_GEO-B-111".
- Το υαλόπλεγμα συμπεριφέρθηκε καλύτερα σε συνδυασμό με το τσιμεντοειδές κονίαμα παρά με το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, κάτι που δεν ισχύει τόσο για τον βασάλτη, ο οποίος συμπεριφέρθηκε λίγο καλύτερα με το τελευταίο κονίαμα.

- Από το σύνολο των δοκιμών που ενισχύθηκαν με το κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης, την μεγαλύτερη αποδοτικότητα είχε το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-111, του οποίου η αντοχή αυξήθηκε κατά 23,1 φορές.
- Από το σύνολο των δοκιμών που ενισχύθηκαν με το κονίαμα γεωπολυμερικής σύστασης, την μεγαλύτερη αποδοτικότητα είχε το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-B-111, του οποίου η αντοχή αυξήθηκε κατά 21,2 φορές.
- Συγκρίνοντας τους δύο τύπους διάταξης θερμομόνωσης (I2 και 111), παρατηρήθηκε ότι δεν είχαν μεγάλη διαφορά στην αύξηση του φορτίου καμπτικής αντοχής, με εξαίρεση το δοκίμιο OOP\_WALL\_CEM-G-I2 του οποίου η αύξηση αντοχής ήταν 12,8 φορές μικρότερη από αυτήν του OOP\_WALL\_CEM-G-111.

## Βιβλιογραφία

- Abdel-Hafez, L. M., Abouelezz, A. E. Y., & Elzefeary, F. F. (2015). Behavior of masonry strengthened infilled reinforced concrete frames under in-plane load. *HBRC Journal*, 11(2), 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.06.005>
- Akhoundi, F., Vasconcelos, G., Lourenço, P., Silva, L. M., Cunha, F., & Figueiro, R. (2018). In-plane behavior of cavity masonry infills and strengthening with textile reinforced mortar. *Engineering Structures*, 156, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.002>
- Babaeidarabad, S., Caso, F. D., & Nanni, A. (2014). Out-of-Plane Behavior of URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite. *Journal of Composites for Construction*, 18(4), 04013057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000457](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000457)
- Bournas, D., Lontou, P., Papanicolaou, C., & Triantafillou, T. (2007). Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus FRP Confinement in Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 104, 740–748. <https://doi.org/10.14359/18956>
- Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets. (2006). *ACI Structural Journal*, 103(1). <https://doi.org/10.14359/15083>
- De Risi, M. T., Del Gaudio, C., & Verderame, G. M. (2020). A component-level methodology to evaluate the seismic repair costs of infills and services for Italian RC buildings.

*Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(14), 6533–6570.

<https://doi.org/10.1007/s10518-020-00944-7>

De Risi, M. T., Furtado, A., Rodrigues, H., Melo, J., Verderame, G. M., Arêde, A., Varum, H., & Manfredi, G. (2022). Influence of textile reinforced mortars strengthening on the in-plane/out-of-plane response of masonry infill walls in RC frames. *Engineering Structures*, 254, 113887. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113887>

De Santis, S., De Canio, G., de Felice, G., Meriggi, P., & Roselli, I. (2019a). Out-of-plane seismic retrofitting of masonry walls with Textile Reinforced Mortar composites.

*Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(11), 6265–6300.

<https://doi.org/10.1007/s10518-019-00701-5>

De Santis, S., De Canio, G., de Felice, G., Meriggi, P., & Roselli, I. (2019b). Out-of-plane seismic retrofitting of masonry walls with Textile Reinforced Mortar composites.

*Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(11), 6265–6300.

<https://doi.org/10.1007/s10518-019-00701-5>

Elsanadedy, H. M., Abbas, H., Almusallam, T. H., & Al-Salloum, Y. A. (2019). Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures – State-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106947.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106947>

Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40–55.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.053>

- Escrig, C., Gil, L., Bernat-Maso, E., & Puigvert, F. (2015). Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, *83*, 248–260.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.013>
- Furtado, A., Arêde, A., & Rodrigues, H. (2022). The Effect of a Textile-Reinforced Mortar on the Flexural Response of Energy-Improved Infill Walls. *Journal of Composites for Construction*, *26*(5), 04022047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001237)
- Furtado, A., Rodrigues, H., Arêde, A., Melo, J., & Varum, H. (2021). The use of textile-reinforced mortar as a strengthening technique for the infill walls out-of-plane behaviour. *Composite Structures*, *255*, 113029.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113029>
- Gkournelos, P. D., Azdejković, L. D., & Triantafyllou, T. C. (2022). Innovative and Eco-friendly Solutions for the Seismic Retrofitting of Natural Stone Masonry Walls with Textile Reinforced Mortar: In- and Out-of-Plane Behavior. *Journal of Composites for Construction*, *26*(1), 04021061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001173](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001173)
- Ismail, N., & Ingham, J. M. (2016). In-plane and out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using polymer textile reinforced mortar. *Engineering Structures*, *118*, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.041>
- Kariou, F. A., Triantafyllou, S. P., Bournas, D. A., & Koutas, L. N. (2018). Out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. *Construction*



- and Building Materials*, 165, 769–781.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.026>
- Kouris, L. A. S., & Triantafillou, T. C. (2018). State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 188, 1221–1233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.039>
- Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2019). Out-of-Plane Strengthening of Masonry-Infilled RC Frames with Textile-Reinforced Mortar Jackets. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 04018079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000911)
- Koutas, L. N., & Bournas, Dionysios. A. (2017). Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations. *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 04016065.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000713)
- Koutas, L. N., Bousias, S. N., & Triantafillou, T. C. (2015). Textile-reinforced mortar (TRM) as retrofitting material of masonry-infilled RC frames.
- 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113060>
- Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882)

- 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.  
<https://doi.org/10.1007/s40996-020-00433-6>
- Masi, A., Chiauuzzi, L., Santarsiero, G., Manfredi, V., Biondi, S., Spacone, E., Del Gaudio, C., Ricci, P., Manfredi, G., & Verderame, G. M. (2019). Seismic response of RC buildings during the Mw 6.0 August 24, 2016 Central Italy earthquake: The Amatrice case study. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(10), 5631–5654.  
<https://doi.org/10.1007/s10518-017-0277-5>
- Pohoryles, D. A., Maduta, C., Bournas, D. A., & Kouris, L. A. (2020). Energy performance of existing residential buildings in Europe: A novel approach combining energy with seismic retrofitting. *Energy and Buildings*, 223, 110024.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110024>
- Sagar, S. L., Singhal, V., & Rai, D. C. (2019). In-Plane and Out-of-Plane Behavior of Masonry-Infilled RC Frames Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 04018073.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000905](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000905)
- Triantafillou, T. (2011). Innovative Textile-Based Composites for Strengthening and Seismic Retrofitting of Concrete and Masonry Structures. In L. Ye, P. Feng, & Q. Yue (Eds.), *Advances in FRP Composites in Civil Engineering* (pp. 3–12). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17487-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17487-2_1)
- Triantafillou, T. C., Karlos, K., Kefalou, K., & Argyropoulou, E. (2017). An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars

- combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior. *Construction and Building Materials*, 133, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.032>
- Triantafillou, T. C., & Papanicolaou, C. G. (2006). Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures*, 39(1), 93–103. <https://doi.org/10.1007/s11527-005-9034-3>
- Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., & Laourdekis, T. (2006). Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI structural journal*, 103(1), 28.
- Yardim, Y., & Lalaj, O. (2016). Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing. *Construction and Building Materials*, 102, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.095>
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., & Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>