

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΠΛΑΙΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ:
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΘΛΙΨΗΣ ΤΟΙΧΟΣΩΜΑΤΩΝ**

ΕΥΓΕΝΙΑ ΜΗΛΙΩΤΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΙΚΟΣ

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

ΒΟΛΟΣ 2022

© 2022 Ευγενία Μηλιώτη, Νικόλαος Χατζίκος

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) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Γουργιώτης Παναγιώτης

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε για την πολύτιμη καθοδήγηση και το ενδιαφέρον που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών και της συγγραφής, τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας κ. Κούτα Ν. Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και τον συνεπιβλέποντα κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Επιπλέον, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στον κ. Κουτσελίνη Αλέκο και τον Cholostiakow Szymon για τη συμβολή τους στην προετοιμασία και τη διεξαγωγή των πειραμάτων, τον κ. Παπαθεοχάρη Χάρη για τις πολύτιμες γνώσεις και τις συμβουλές του, ενώ καθοριστική ήταν και η βοήθεια της Σκυριανού Ιωάννας. Τέλος, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες αλλά και τους φίλους μας ο καθένας ξεχωριστά για την υποστήριξη τους μέχρι το πέρας της παρούσας διπλωματικής.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ ΣΕ ΠΛΑΙΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΓΩΝΙΑΣ ΘΛΙΨΗΣ ΤΟΙΧΟΣΩΜΑΤΩΝ

Ευγενία Μηλιώτη

Νικόλαος Χατζίκος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται σε πειραματικό επίπεδο, η ενίσχυση στοιχείων τοιχοπλήρωσης με μια σχετικά νέα τεχνική που κάνει χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών, τα γνωστά και ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) ή Textile Reinforced Mortars (TRM). Αρχικά, παρουσιάζεται το σύνθετο υλικό IAM και περιγράφεται το εύρος εφαρμογών του για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών, αλλά και για την κατασκευή νέων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πειραματικό πρόγραμμα που εκτελέστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν συνολικά εννέα τοιχοσώματα διαστάσεων όψης 700x700 mm και πάχους 60mm, εκ των οποίων τα τρία δοκιμάστηκαν χωρίς ενίσχυση (δοκίμια αναφοράς). Τα υπόλοιπα έξι ενισχύθηκαν μονόπλευρα με IAM. Έχοντας ως βασική παράμετρο διερεύνησης το είδος του πλέγματος ινών, στα τρία εκ των έξι ενισχυμένων δοκιμίων εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις ινοπλέγματος βασάλτη, ενώ στα υπόλοιπα τρία εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις ινοπλέγματος υάλου με διαφορετική γεωμετρία από το ινόπλεγμα βασάλτη αλλά συγκρίσιμο βάρος ανά μονάδα επιφάνειας. Σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια τα ινοπλέγματα επικολλήθηκαν στα τοιχοσώματα με κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης. Οι πειραματικές δοκιμές που

πραγματοποιήθηκαν ήταν διαγώνιας θλίψης, με σκοπό την προσομοίωση της μηχανικής καταπόνησης τοιχοπληρώσεων κατά τα αρχικά στάδια σεισμικής καταπόνησης.. Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα ινοπλέγματα βασάλτη οδήγησαν σε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα πλέγματα υάλου, κάτι που πιθανώς οφείλεται στο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας των ινών του βασάλτη και της μικτότερης διαμέτρου των κλώνων ινών.

Λέξεις κλειδιά: *Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, διαγώνια θλίψη, σύνθετα υλικά, τοιχόσωμα.*

Abstract

The aim of this thesis was to study the effectiveness of textile reinforced mortar (TRM) jackets as a means of strengthening masonry infills in diagonal compression. For this purpose, an experimental programme was conducted in the Concrete Technology and Reinforced Concrete Structures Lab at the Department of Civil Engineering at the University of Thessaly. The experimental programme included fabrication and testing of nine single-leaf masonry wallettes measuring 700x700 mm. Six of the specimens were strengthened prior testing with two layers of TRM; three of which received basalt textile while the other three received glass textile. The rest three remained unreinforced and served as reference specimens. All the specimens were subjected to diagonal compression in order to assess the efficiency of the two different TRM systems. The comparison of the experimental data led to the conclusion both systems enhanced the cracking strength of the walls, with the basalt textile being more efficient compared to the glass textile. The differences between the two textiles were mainly attributed to the different geometry of the textiles.

Key words: *Textile reinforced mortar, TRM, FRCM, masonry, diagonal compression*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	14
1.2 Ενίσχυση των κατασκευών με σύνθετα υλικά.....	15
1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	17
2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΦΑΤΝΟΥΜΕΝΗΣ ΣΕ ΠΛΑΙΣΙΑ Ο.Σ. ΜΕ ΙΑΜ: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	17
2.1 Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (ΙΑΜ).....	17
2.1.1 Γενικά.....	17
2.1.2 Ινοπλέγματα	18
Ίνες άνθρακα	19
Ίνες γυαλιού.....	20
Ίνες αραμιδίου.....	21
Ίνες βασάλτη.....	22
2.1.3 Ανόργανη μήτρα.....	23
2.1.4 Σύγκριση οργανικής και ανόργανης μήτρας.....	24
2.2 Πεδίο εφαρμογής ενισχύσεων με ΙΑΜ	26
2.2.1 Γενικά.....	26
2.2.2 Κατηγορίες ενίσχυσης με ΙΑΜ.....	26
I. Ενισχύσεις στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος	26
II. Ενισχύσεις στοιχείων τοιχοποιίας.....	28
2.2.3 Διατμητική αστοχία και τοιχοπληρώσεις.....	30
2.3 Πείραμα διαγώνιας θλίψης τοιχοσωμάτων	31
2.3.1 Περιγραφή της μεθόδου	31

2.3.2 Πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης	32
2.3.3 Συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	38
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	38
3.1 Γενικά	38
3.2 Περιγραφή Δοκιμών.....	38
3.2.1. Ονοματολογία Δοκιμών	39
3.3. Ιδιότητες Υλικών.....	40
3.3.1. Οπτόπλινθοι	40
3.2.2. Κονίαμα	43
3.3.3. Πλέγματα ενίσχυσης	48
3.3.4 Μήτρα ενίσχυσης	49
3.4. Διαδικασία κατασκευής τοιχοσωμάτων	52
3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμών	53
3.5.1. Προετοιμασία ινοπλεγμάτων για ενίσχυση.....	53
3.5.2. Προετοιμασία δοκιμών για ενίσχυση	53
3.5.3. Ενίσχυση τοιχοσωμάτων με IAM	54
3.6 Πειραματική Διάταξη	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	59
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	59
4.1 Γενικά	59
4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων των δοκιμών	61
4.2.1 Δοκίμια αναφοράς	61
DT_WALL_CON1	61
DT_WALL_CON2	61
DT_WALL_CON3	62

4.2.2 Δοκίμια ενισχυμένα με ίνες βασάλτη	65
DT_WALL_B2_1	65
DT_WALL_B2_2	66
DT_WALL_B2_3	67
4.2.3 Δοκίμια ενισχυμένα με ίνες υάλου	70
DT_WALL_G2_1	70
DT_WALL_G2_2	70
DT_WALL_G2_3	71
4.3 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων.....	74
4.3.1 Σύγκριση δοκιμών: Αναφοράς - Ενισχυμένα με ίνες βασάλτη.....	74
4.3.2 Σύγκριση δοκιμών: Αναφοράς - Ενισχυμένα με ίνες υάλου.....	76
4.3.3 Σύγκριση δοκιμών: Ενισχυμένα με ίνες βασάλτη - Ενισχυμένα με ίνες υάλου .	77
4.4 Σχολιασμός φορτίσεων και διατμητικής τάσης δοκιμών	78
4.5 Σχολιασμός μέτρου διάτμησης δοκιμών	82
4.5.1 Μέτρο διάτμησης δοκιμών με ίνες βασάλτη.....	84
4.5.2 Μέτρο διάτμησης δοκιμών με ίνες υάλου	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	86
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ..	86
5.1 Συμπεράσματα	86
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	89
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ινών άνθρακα.....	20
Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές ινών γυαλιού.....	21
Πίνακας 2.3: Ενδεικτικές τιμές ινών αραμιδίου.....	21
Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμών.....	40
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης οπτόπλινθων στην κατακόρυφη διεύθυνση (long).....	42
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης οπτόπλινθων στην οριζόντια διεύθυνση (short).....	43
Πίνακας 3.4: Σύνθεση μείγματος κονιάματος.....	44
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων και δοκιμών θλίψης των κονιαμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τους αρμούς των δοκιμών τοιχοποιίας.	47
Πίνακας 3.6: Ιδιότητες ινοπλεγμάτων.....	48
Πίνακας 3.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος.....	49
Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων.....	50
Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης.....	51
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα πειραμάτων και μορφές αστοχίας.....	60
Πίνακας 4.2: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV διατμητικής τάσης.....	81
Πίνακας 4.3: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV μέτρου διάτμησης.....	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Αστοχία: (α) τοιχοποιίας, (β) υποστηλώματος λόγω μεγάλης δυσκαμψίας τοιχοπληρώσεων [3].....	15
Σχήμα 2.1: Ινόπλεγμα (α) δυο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) τριών διαστάσεων [4].....	18
Σχήμα 2.2: Διάφορα ινοπλέγματα δύο διαστάσεων με κλώνους ινών σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις: (α) πλέγμα ινών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, (β) πλέγμα ινών υάλου χωρίς επικάλυψη, (γ) πλέγμα ινών βασάλτη χωρίς επικάλυψη, (δ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών άνθρακα, (ε) επικαλυμμένο πλέγμα ινών υάλου και (ζ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών βασάλτη. [1].....	19
Σχήμα 2.3: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους χάλυβα και ινών. [6].....	22
Σχήμα 2.4: Υφάσματα ΙΟΠ συνεχών ινών (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου https://www.castrocompositesshop.com/gb/fibre-reinforcements/1198-biaxial-glass-fabric-600-g-m2.html	24
Σχήμα 2.5: Πειραματική εφαρμογή ενίσχυσης, (α) υποστηλώματος, (β) κρίσιμης περιοχής υποστηλώματος, (γ) δοκού [1].....	28
Σχήμα 2.6: Πειραματική εφαρμογή ενίσχυσης τοιχοποιίας.....	29
Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικό παράδειγμα διατμητικής αστοχίας τοιχοποιίας [21]	30
Σχήμα 2.8: Αστοχία τοιχοπλήρωσης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος [22].....	31
Σχήμα 2.9: Πειραματικές διατάξεις για πείραμα διαγώνιας θλίψης (α) υπο γωνία 45° (β) σε μεταλλική βάση [21] [24]	32
Σχήμα 2.10: Τυπική μορφή αστοχίας των: URM (a), BTRM (b), GTRM (c) και της λεπτομέρειας αστοχίας του GTRM (d) [25].....	33
Σχήμα 2.11: Πειραματικά αποτελέσματα: κατακόρυφου φορτίου P, συναρτήσεως της μετατόπισης δ [26]	34
Σχήμα 2.12: Τυπικές μορφές αστοχίας τοιχοσωμάτων υπό διαγώνια θλίψη: (α) μη ενισχυμένο δοκίμιο και (β) ενισχυμένο δοκίμιο με μία στρώση ΙΑΜ υάλου [28].....	35
Σχήμα 2.13: Τυπικές μορφές (α) αστοχίας δοκιμίων αναφοράς, (β) ρηγμάτωσης στη στρώση της ενίσχυσης και (γ) εκτός επιπέδου παραμόρφωση ενισχυμένου δοκιμίου [29]	36

Σχήμα 2.14: Καμπύλες διατμητικής τάσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης για τις δοκιμές διαγώνιας θλίψης τοιχοσωμάτων. [29]	37
Σχήμα 3.1: Γεωμετρία πειραματικών δοκιμών τοιχοποιίας.....	39
Σχήμα 3.2: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μεμονωμένων οπτόπλινθων.	41
Σχήμα 3.3: Τυπική μορφή θλιπτικής αστοχίας οπτόπλινθων α) στην κατακόρυφη διεύθυνση β) στην οριζόντια διεύθυνση	41
Σχήμα 3.4: Εφαρμογή κονιάματος στη μεταλλική μήτρα	44
Σχήμα 3.5: (α) Πείραμα κάμψης τριών σημείων (β) Αστοχία δειγμάτων κονιάματος.....	45
Σχήμα 3.6: Πείραμα θλίψης δείγματος κονιάματος.....	46
Σχήμα 3.7: (α)πλέγμα ινών βασάλτη (β) πλέγμα ινών υάλου	48
Σχήμα 3.8: Συστατικό Α κονιάματος	49
Σχήμα 3.9: Αστοχία δοκιμίου σε πείραμα κάμψης τριών σημείων.	51
Σχήμα 3.10: Διαδικασία κατασκευής τοιχοπλήρωσης	52
Σχήμα 3.11: Προετοιμασία ινοπλεγμάτων	53
Σχήμα 3.12: Διαδικασία ενίσχυσης.....	55
Σχήμα 3.13: Τελικό αποτέλεσμα ενισχυμένου τοιχοσώματος.....	55
Σχήμα 3.14: (α)Άνοιγμα οπών για την εφαρμογή των ντιζών (β)Θέση τοποθέτησης ντιζών και wire gage	57
Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη μονοαξονικής θλίψης.....	58
Σχήμα 4.1: (α)Δοκίμιο αναφοράς πριν το πείραμα θλίψης (β) Τυπική μορφή αστοχίας δοκιμίου αναφοράς.....	63
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια αναφοράς.....	64
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια αναφοράς.....	64
Σχήμα 4.4: Δοκίμιο B2_1 πριν τη διεξαγωγή του πειράματος.	65
Σχήμα 4.5: Αστοχία δοκιμίου μετά το πείραμα: α) στην ενισχυμένη πλευρά του β) στη μη ενισχυμένη πλευρά του	66
Σχήμα 4.6: Ενισχυμένο δοκίμιο πριν το πείραμα θλίψης	68
Σχήμα 4.7: (α) Αστοχία δοκιμίου B2_2 στη μη ενισχυμένη πλευρά (β) Αστοχία δοκιμίου B2_3 στην ενισχυμένη πλευρά.....	68
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα ενισχυμένα με ίνες βασάλτη δοκίμια .	69
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα ενισχυμένα με ίνες βασάλτη δοκίμια	69
Σχήμα 4.10: Ενισχυμένο δοκίμιο πριν το πείραμα θλίψης.	72

Σχήμα 4.11: Τυπική μορφή αστοχίας δοκιμίου με ενίσχυση υάλου (α) Ενισχυμένη πλευρά δοκιμίου G2_2 (β) Μη ενισχυμένη πλευρά δοκιμίου G2_3 (γ) Πλάγια όψη δοκιμίου G2_1 .	72
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα ενισχυμένα με ίνες υάλου δοκίμια ...	73
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα ενισχυμένα με ίνες υάλου δοκίμια .	73
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια αναφοράς.....	74
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια αναφοράς.....	75
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου και τα δοκίμια αναφοράς.....	76
Σχήμα 4.17: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου και τα δοκίμια αναφοράς.....	76
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου	77
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου	78
Σχήμα 4.20: Γράφημα για το φορτίο ρηγμάτωσης των δοκιμίων	79
Σχήμα 4.21: Γράφημα για το φορτίο αστοχίας των δοκιμίων	79
Σχήμα 4.22: Γράφημα για τη διατμητική τάση ρηγμάτωσης των δοκιμίων.	80
Σχήμα 4.23: Γράφημα για τη διατμητική τάση αστοχίας των δοκιμίων	81
Σχήμα 4.24: Γράφημα για το μέτρο διάτμησης στο Τμήμα Ι.....	83
Σχήμα 4.25: Γράφημα για το μέτρο διάτμησης στο Τμήμα ΙΙ.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Με την πάροδο των χρόνων οι ανάγκες για τη συντήρηση ή και την επισκευή των κατασκευών αυξάνονται διαρκώς. Αίτια αποτελούν τόσο η απαίτηση για κτήρια υψηλότερων προδιαγραφών που να ανταπεξέρχονται στους σύγχρονους κανονισμούς σχεδιασμού, όσο και η φθορά των υφιστάμενων κατασκευών που θέτουν σε κίνδυνο τους πολίτες. Ειδικότερα, σε σειсмоγενείς χώρες όπως είναι η Ελλάδα το πρόβλημα της βλάβης και σε ορισμένες περιπτώσεις της κατάρρευσης των κατασκευών είναι όλο και πιο έντονο, κυρίως λόγω της γήρανσης του κτιριακού πληθυσμού σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή αντισεισμικό σχεδιασμό του έως και τα μέσα της δεκαετίας του 1980.

Στην πλειονότητα των κατασκευών που οικοδομούνταν μέχρι πριν τριανταπέντε περίπου χρόνια, δεν λαμβανόταν υπόψη στον επιθυμητό βαθμό η επίδραση των σεισμικών φορτίσεων. Λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας, ο φέροντας οργανισμός αδυνατούσε να ανταπεξέλθει σε μεγάλης κλίμακας σεισμούς, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών αστοχιών του. Εκτός όμως από τον φέροντα οργανισμό, αρκετές αστοχίες παρατηρούνταν και στις τοιχοπληρώσεις, η επιρροή των οποίων δεν συνυπολογιζόταν στο σχεδιασμό για παραλαβή φορτίων [1].

Μέσω έρευνας από τους Mehrabi et al. (1996) [2] και Fardis and Panagiotakos (1997) [3] παρατηρήθηκε ότι οι τοιχοπληρώσεις μπορούν να λειτουργήσουν ευεργετικά στην απόκριση μιας κατασκευής με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν δυσμενής συνθήκες στα μέλη του φέροντος οργανισμού που έρχονται σε επαφή. Εμφανής είναι επομένως η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης πάνω στην επιρροή των τοιχοπληρώσεων στις κατασκευές (θετική ή αρνητική) αλλά και εύρεσης νέων πρωτοποριακών μεθόδων κατασκευής και ενίσχυσης.

Στις εικόνες του **Σχήματος 1.1** φαίνονται στην περίπτωση (α) αστοχία τοιχοποιίας λόγω σεισμικών φορτίων και στην περίπτωση (β) βλάβη στην κρίσιμη περιοχή υποστυλώματος, ως αποτέλεσμα μεγάλης δυσκαμψίας της τοιχοπλήρωσης συγκριτικά με τα δομικά στοιχεία που την περιβάλλουν.



Σχήμα 1.1: Αστοχία: (α) τοιχοποιίας, (β) υποστυλώματος λόγω μεγάλης δυσκαμψίας τοιχοπληρώσεων [3]

1.2 Ενίσχυση των κατασκευών με σύνθετα υλικά

Χρησιμοποιώντας τον όρο σύνθετα, αναφερόμαστε στα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα επιμέρους στοιχεία με διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τόσο μεταξύ τους, όσο και με το υλικό που προκύπτει από την σύνθεση τους. Ειδικότερα για να θεωρείται ένα υλικό σύνθετο πρέπει τα συστατικά του μέρη να έχουν λόγο ιδιοτήτων (θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή, ευκαμψία, πλαστιμότητα κ.α.) τουλάχιστον ένα προς πέντε και να μην έχουν διαφορά κατ' όγκου περιεκτικότητας μεγαλύτερη από ένα προς δέκα [4]. Στην περίπτωση που αποτελούνται από δύο επιμέρους στοιχεία το ένα έχει τη χρήση σπλισμού, προσδίδοντας τις μηχανικές ιδιότητες στην ενίσχυση και το άλλο λειτουργεί σαν συνδετικό υλικό της ενίσχυσης με το δομικό στοιχείο, εξασφαλίζοντας την κατανομή των φορτίων. Για τα σύγχρονα σύνθετα υλικά που αξιοποιούνται στο κομμάτι των κατασκευών, το ρόλο του σπλισμού αποτελούν οι ίνες διαφόρων υλικών και διευθύνσεων, και το ρόλο του συνδετικού υλικού έχει η ανόργανη ή η οργανική μήτρα.

Από τα πιο διαδεδομένα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές είναι τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) ή στη διεθνή βιβλιογραφία Fiber Reinforced Polymers (FRP). Το ρόλο της οργανικής μήτρας έχουν συνήθως οι εποξειδικές ρητίνες, ενώ τα συνεχή υφάσματα ινών τους αποτελούνται συνήθως από άνθρακα, γυαλί και αραμίδιο. Η υψηλή εφελκυστική τους αντοχή η οποία είναι πενταπλάσια από αυτή του χάλυβα, σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητά τους στο χρόνο συντέλεσαν στην διάδοσή τους ως μέθοδο ενίσχυσης [4]. Παράλληλα, ο μικρός τους όγκος και το χαμηλό τους βάρος τα κάνουν να μην αλλάζουν τη γεωμετρία της κατασκευής και συγχρόνως να μην της προσθέτουν επιπλέον φορτία.

Την αχίλλειο πτέρνα των συγκεκριμένων υλικών αποτελούν οι ρητίνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος, αδυναμία απόδοσης σε υψηλές θερμοκρασίες και υγρές επιφάνειες, αλλά και κίνδυνο για εργατικά ατυχήματα μέσω αναθυμιάσεων και επαφής με το δέρμα [1]. Η αναζήτηση για νέα σύνθετα υλικά ενίσχυσης που θα επιλύουν τα προβλήματα αυτά οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην εύρεση εναλλακτικής μέσω των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Τα IAM ή όπως λέγονται στη διεθνή βιβλιογραφία Textile Reinforced Mortar (TRM), εξασφαλίζουν τις βασικές ευεργετικές ιδιότητες των ΙΟΠ ενώ παράλληλα αποφεύγουν τα μειονεκτήματά τους. Οι ίνες τους δεν έχουν τη μορφή συνεχών υφασμάτων, αλλά ινοπλεγμάτων με αποστάσεις μεταξύ των κλώνων ινών σε δύο ή και παραπάνω διευθύνσεις, στοχεύοντας στην καλύτερη συνάφεια μεταξύ ινών και κονιάματος [4]. Η ανόργανη σύσταση της μήτρας τους που συνήθως αποτελείται από τσιμεντοκονιάματα, είναι ο λόγος που προτιμούνται έναντι των ΙΟΠ, η οποία εκτός των υπόλοιπων πλεονεκτημάτων είναι και φιλική προς το περιβάλλον.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης στοιχείων τοιχοπλήρωσης, ενισχυμένων με Ινοπλέγματα βασάλτη και υάλου σε Ανόργανη Μήτρα. Αναλυτικότερα το πειραματικό πρόγραμμα περιλάμβανε εννέα τοιχοσώματα με διαστάσεις όψης 700x700 mm και πάχος 60 mm, εκ των οποίων τα τρία λειτούργησαν ως δοκίμια αναφοράς, ενώ η βασική παράμετρος διερεύνησης ήταν το είδος του πλέγματος ινών, με μονόπλευρη ενίσχυση δύο στρώσεων ινών υάλου στα τρία και δύο στρώσεων ινών βασάλτη στα υπόλοιπα τρία δοκίμια. Τα ινοπλέγματα υάλου και βασάλτη είχαν διαφορετική γεωμετρία μεταξύ τους με αυτές του υάλου να έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις βρόχων, αλλά το βάρος τους ανά μονάδα επιφάνειας ήταν συγκρίσιμο. Η μήτρα που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης. Ως στόχο έχει μέσω των αποτελεσμάτων της πειραματικής μελέτης να γίνει διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών τύπων ινοπλεγμάτων στην αποδοτικότητα της ενίσχυσης τοιχοσωμάτων με IAM και μεταξύ τους σύγκριση για την καλύτερη κατανόηση της αποτελεσματικότητάς τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΦΑΤΝΟΥΜΕΝΗΣ ΣΕ ΠΛΑΙΣΙΑ Ο.Σ. ΜΕ ΙΑΜ: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (ΙΑΜ)

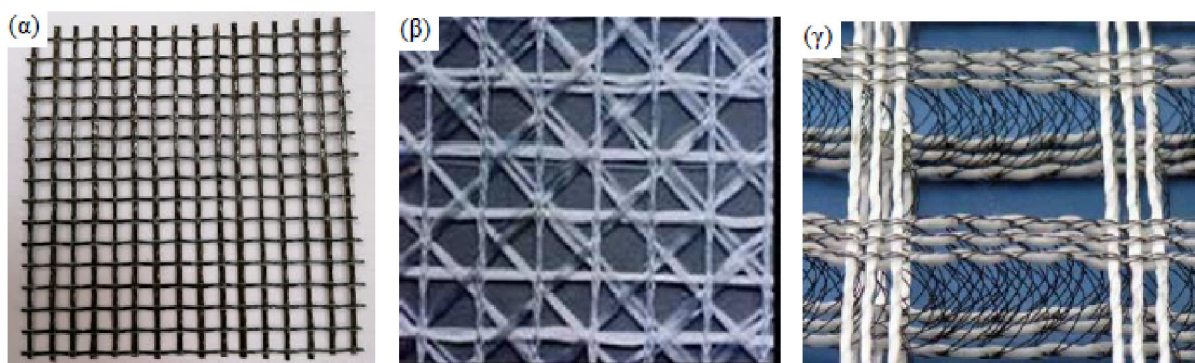
2.1.1 Γενικά

Η σημασία των σύνθετων υλικών στην αρχαιότητα ήταν εξίσου μεγάλη με σήμερα παρά την αρκετά διαφορετική μορφή τους, καταρρίπτοντας την εσφαλμένη πεποίθηση ότι είναι προϊόν της σύγχρονης επιστήμης. Τα σύνθετα υλικά αξιοποιούνταν για την κατασκευή σημαντικών αρχαιολογικών δομημάτων που διασώζονται μέχρι και σήμερα, ενώ τα αρχαιότερα ευρήματα σύνθετων υλικών στους τομείς της οικοδομικής και της οδοποιίας χρονολογούνται γύρω στο 5000π.Χ. με τη μορφή πλίνθων και ρητινόμορφων συγκολλητικών υλικών. Σε αρκετά μεταγενέστερο στάδιο, στα μέσα του 20ου αιώνα άρχισαν να παίρνουν την μορφή που έχουν στη σημερινή κοινωνία κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, όπου χρησιμοποιήθηκαν θόλοι για radar κατασκευασμένοι από σύνθετα υλικά και πιο συγκεκριμένα από GFRP. Μετά το πέρας του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, τα υλικά αυτά έπαψαν να έχουν αποκλειστικά πολεμικό χαρακτήρα και έγιναν προσβάσιμα στην αγορά, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν και στον τομέα των δομικών έργων. Η πρώτη εμφάνιση της ενίσχυσης με επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών έγινε στην Ελβετία το 1984, ενώ στην Ελλάδα οι πρώτες εφαρμογές χρονολογούνται περίπου στο 1990 [4].

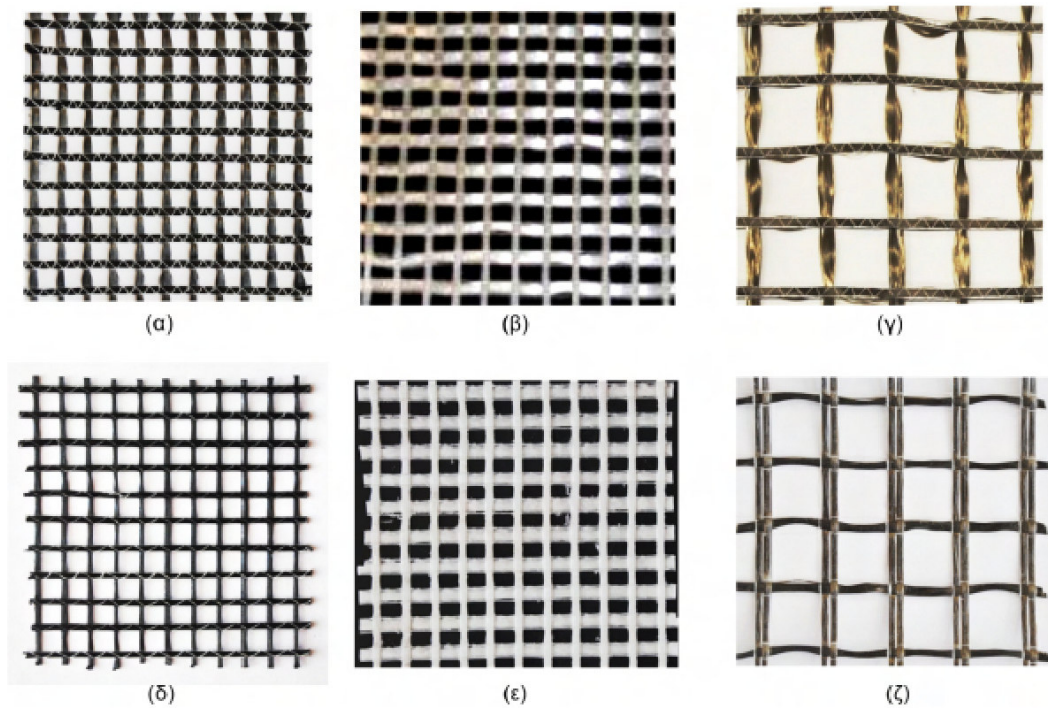
Μία πρωτοποριακή λύση που αποτελεί κομμάτι των σύνθετων υλικών και ανταπεξέρχεται επάξια στις απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευών είναι η ενίσχυση με Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (ΙΑΜ). Τα ΙΑΜ συντελούνται από πλέγματα ινών που επί της ουσίας παραλαμβάνουν τις τάσεις και από κονίαμα αποτελούμενο από ανόργανα υλικά συνήθως τσιμεντοειδούς σύστασης, που έχει το ρόλο της μήτρας. Την δεκαετία που διανύθηκε έγινε εκτενής έρευνα σχετική με την εξωτερική ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας με ινοπλέγματα διαφόρων υλικών μέσα σε τσιμεντοειδές κονίαμα. Στη διεθνή βιβλιογραφία οι ονομασίες που συναντώνται για ανόργανες μήτρες είναι "Textile-reinforced mortar (TRM)" και "Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)", ενώ σε περίπτωση μήτρας σπλισμένου σκυροδέματος "Textile-reinforced concrete (TRC)" και σε μήτρα τσιμέντου "Composite materials group (CMG)" [5].

2.1.2 Ινοπλέγματα

Τα ινοπλέγματα αποτελούν τον οπλισμό της ενίσχυσης και συντελούνται από ίνες υπό την μορφή πλέγματος. Οι κλώνοι ινών είναι δυνατόν να είναι διατεταγμένοι σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται κενά μεταξύ τους, οι επονομαζόμενες και βροχίδες. Η διάταξη αυτή των κλώνων αποσκοπεί στην ευκολότερη τοποθέτηση του κονιάματος και επομένως στην καλύτερη αλληλουχία μεταξύ των δυο συστατικών της ενίσχυσης [4]. Η διεύθυνση τοποθέτησης των ινών είναι παράλληλη με αυτή των αναπτυσσόμενων τάσεων για την καλύτερη παραλαβή τους ενώ υπάρχει μεγάλο φάσμα στις τεχνικές κατασκευής τους. Ενδεικτικά κάποιες τεχνικές είναι η ύφανση των κλώνων ανά μεταξύ τους, η συγκράτηση των οριζοντίων με τους κατακόρυφους κλώνους με τη βοήθεια πρόσθετων νημάτων και σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται και επιπλέον επικάλυψη του πλέγματος με ρητίνες για καλύτερη δομική ακεραιότητα του πλέγματος [1]. Αντίστοιχα υπάρχει ποικιλία σχετικά με το υλικό των ινών με επικρατέστερα να είναι τα ινοπλέγματα κατασκευασμένα από γυαλί, άνθρακα, βασάλτη και αραμίδιο. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση των υλικών αυτών των ιών, ενώ στο **Σχήμα 2.1** παρατίθενται ινοπλέγματα δυο και παραπάνω διευθύνσεων και στο σχήμα **Σχήμα 2.2** φαίνονται διάφορα ήδη ινοπλεγμάτων επικαλυμμένα και μη με ρητίνες.



Σχήμα 2.1: Ινοπλέγμα (α) δυο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) τριών διαστάσεων [4]



Σχήμα 2.2: Διάφορα ινοπλέγματα δύο διαστάσεων με κλώνους ινών σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις: (α) πλέγμα ινών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, (β) πλέγμα ινών υάλου χωρίς επικάλυψη, (γ) πλέγμα ινών βασάλτη χωρίς επικάλυψη, (δ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών άνθρακα, (ε) επικαλυμμένο πλέγμα ινών υάλου και (ζ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών βασάλτη. [1]

- **Ίνες άνθρακα**

Το πιο επικρατές υλικό για ενίσχυση δομικών στοιχείων είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα ή τοιχοποιιών είναι οι ίνες άνθρακα ή "Carbon Fibers". Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά που δικαιολογούν τη διαδεδομένη χρήση τους είναι η ανθεκτικότητά τους στη διάβρωση, κόπωση σε αλκαλικό και όξινο περιβάλλον, η χαμηλή τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής στον διαμήκη άξονα αλλά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Πιο συγκεκριμένα οι ίνες άνθρακα με πυκνότητα μεταξύ 1800-1900 kg/m³, χαρακτηρίζονται από μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (215 - 800 GPa), υψηλή εφεκλυστική αντοχή (1800 - 6000 MPa) και αρκετά μικρή παραμόρφωση θραύσης (0,2 - 2,3 %) [5]. Το κομμάτι στο οποίο μειονεκτούν οι ίνες άνθρακα ωστόσο είναι το υψηλό τους κόστος έναντι των άλλων ινών, παρόλη την πτώση της τιμής τους τα τελευταία χρόνια.

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές ινών άνθρακα

Υλικό ινών άνθρακα	Μέτρο ελαστικότητας kN/mm ²	Εφελκυστική Αντοχή N/mm ²	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας %
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0,2-0,4

- **Ίνες γυαλιού**

Πιο ισορροπημένο υλικό αφού αποτελεί συνδυασμό χαμηλού κόστους και σχετικά υψηλής αντοχής (1900 - 4800 MPa) ενώ ο συντελεστής θερμικής διαστολής του είναι στα ίδια επίπεδα με αυτού του σκυροδέματος. Οι ίνες γυαλιού ή "Glass Fibers" εντάσσονται σε έξι κύριες κατηγορίες με βάση τη χημική τους σύσταση, με τις τύπου E, τύπου Z ή AR και τις τύπου S να είναι οι επικρατέστερες για την ενίσχυση κατασκευών [5]. Οι τύπου E έχουν σχετικά καλή αντοχή και μέτρο δυσκαμψίας, καλές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά σε συνθήκες περιβάλλοντος αλλά επιδέχονται αλλοιώσεις σε αλκαλικό περιβάλλον όπως του σκυροδέματος με αποτέλεσμα μείωση της αντοχής τους. Οι τύπου Z ή AR από τη άλλη έχουν μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον ενώ οι S παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές στις μηχανικές τους ιδιότητες έναντι της επιβάρυνσης του κόστους. Εκτός όμως από την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους σε τσιμεντοειδείς μήτρες οι ίνες γυαλιού είναι αρκετά πιο βαριές από του άνθρακα με πυκνότητα 2450-2550 kg/m³, χαρακτηρίζονται από χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (70 - 90 GPa) και μεγαλύτερη ανοιγμένη παραμόρφωση θραύσης (3,0 - 5,7 %) από αυτή του άνθρακα [5].

Πίνακας 2.2: Ενδεικτικές τιμές ινών γυαλιού

Υλικό ινών γυαλιού	Μέτρο ελαστικότητας kN/mm ²	Εφελκυστική Αντοχή N/mm ²	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας %
Τύπος E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Τύπος Z ή AR	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Τύπος S	85-90	3500-4800	4.5-5.5

- **Ίνες αραμιδίου**

Τα πιο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά των ινών αραμιδίου ή "Aramid Fibers" είναι η υψηλή τους μόνωση, η μικρή πυκνότητα (1450 kg/m³) που τις καθιστά τις ελαφρύτερες ίνες, και η ανθεκτικότητα τους σε κρουστικά φορτία χάρη στην οποία βρίσκουν εφαρμογή σε κατασκευές εκτεθειμένες σε κυκλοφοριακά ατυχήματα. Η εφελκυστική τους αντοχή είναι υψηλή (2750 - 4100 MPa), ενώ οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας της (70 - 130 GPa) και της ανοιγμένης παραμόρφωσης θραύσης (2,5 - 5,0 %) δεν είναι οι βέλτιστες δυνατές σε αναλογία με το υψηλό κόστος που συναντάται στις ίνες αυτές [5].

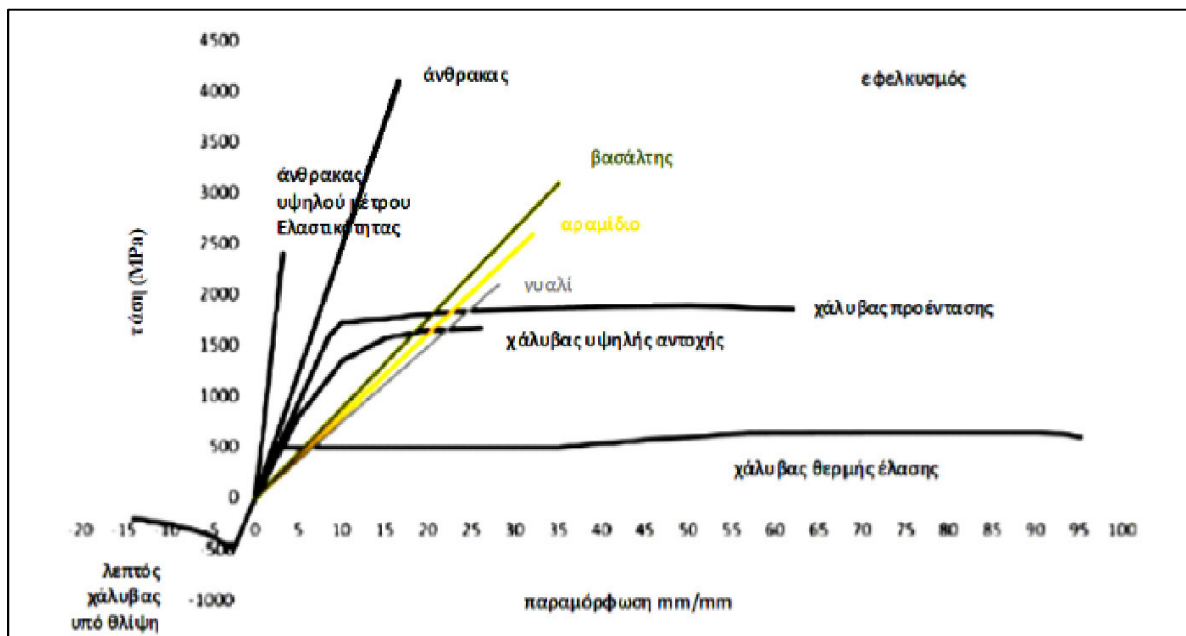
Πίνακας 2.3: Ενδεικτικές τιμές ινών αραμιδίου

Υλικό ινών αραμιδίου	Μέτρο ελαστικότητας kN/mm ²	Εφελκυστική Αντοχή N/mm ²	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας %
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	115-130	3500-4000	2.5-3.5

- Ίνες βασάλτη

Μια πιο πρόσφατη προσθήκη στις επιλογές ινών ενίσχυσης αποτελούν οι ίνες βασάλτη ή "ανόργανες ίνες", οι οποίες εξασφαλίζουν καλύτερη ηχομόνωση - θερμομόνωση καθώς και θερμική σταθερότητα. Κατασκευάζονται μέσω της διαδικασίας της τήξης ηφαιστειογενών αποθεμάτων και παρόλη την υψηλή τους εφελκυστική αντοχή (3000 - 4900 MPa), την αντοχή τους σε κραδασμούς και την χαμηλή τους τιμή έχουν χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (89 - 95 GPa) και ανοιγμένη παραμόρφωση θραύσης μεταξύ 3.0-5.0% [5].

Συνοψίζοντας, η ενίσχυση με ίνες μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο κομμάτι των κατασκευών, χάρη στην ευρεία γκάμα των υλικών που είναι διαθέσιμα και στις ποικίλες ιδιότητες τους. Στο διάγραμμα του σχήματος **Σχήματος 2.3** φαίνονται για τα διάφορα είδη ινών καθώς και για ορισμένους τύπους χάλυβα οι τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης όπως προέκυψαν από μελέτη του Rousaki et al. (2014) [6].



Σχήμα 2.3: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για διάφορους τύπους χάλυβα και ινών. [6]

2.1.3 Ανόργανη μήτρα

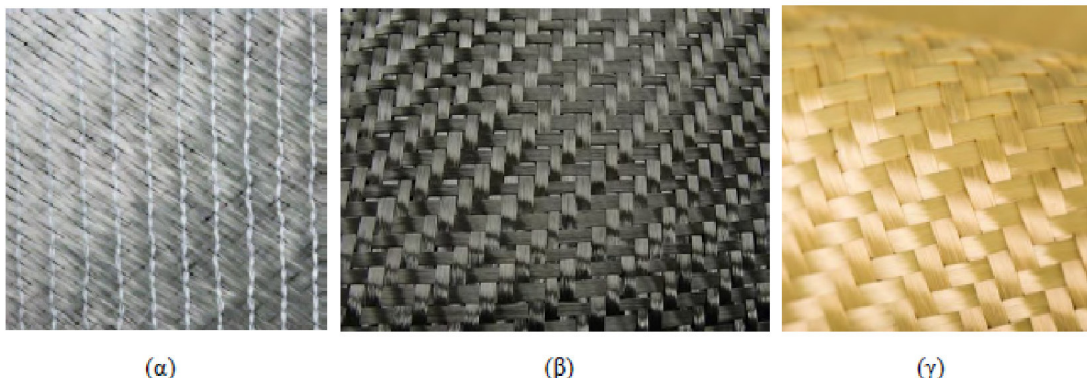
Η λειτουργία της ανόργανης μήτρας τσιμεντοειδούς κονιάματος είναι διττής φύσης: αφενός λειτουργεί ως συγκολλητικό υλικό μεταξύ του δομικού στοιχείου και του ινοπλέγματος, αφετέρου έχει μηχανική σημασία αφού αποσκοπεί στην παραλαβή των φορτίων από το ΙΑΜ. Η σύσταση της επομένως είναι μείζονος σημασίας για την συνολική συμπεριφορά της ενίσχυσης και υπάρχουν αρκετές παράμετροι της που χρίζουν προσοχής [1]:

- να είναι αρκετά λεπτόκοκκο το υλικό της ώστε να έχει την ικανότητα διείσδυσης στο ινόπλεγμα και να επιτευχθεί καλύτερη συνάφεια με το δομικό στοιχείο.
- να εξασφαλίζει κατάλληλο χρόνο επεξεργασίας προκειμένου να τοποθετούνται όλες οι στρώσεις του πλέγματος χωρίς να υπάρχει ξήρανση του κονιάματος.
- να έχει υψηλό ιξώδες ώστε να μην υπάρχει ροή του σε κεκλιμένες και κατακόρυφες επιφάνειες.
- η χημική της δομή να μην προκαλεί αλλοίωση του ινοπλέγματος και συνάμα να το προφυλάσσει από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υγρασία.
- για να αποφευχθεί η αποκόλληση του ΙΑΜ με το δομικό στοιχείο είναι απαραίτητη και η επάρκεια των μηχανικών του ιδιοτήτων όπως η διατμητική αντοχής.

Τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο τύπου Portland είναι ο επικρατέστερος τύπος μήτρας για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Το τσιμέντο τύπου Portland είναι το κοινό τσιμέντο που βρίσκει χρήση και στην παρασκευή του σκυροδέματος και πληροί όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Σε αρκετές περιπτώσεις συναντάται και η προσθήκη κλάσματος πολυμερών στο κονίαμα, οδηγώντας σε αυξημένη εφελκυστική αντοχή του κονιάματος και βελτίωση συνάφειας μεταξύ ινοπλέγματος-μήτρας-δομικού στοιχείου. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητα των πολυμερών να εισχωρήσουν μεταξύ των ινών που απαρτίζουν τους κλώνους [1].

2.1.4 Σύγκριση οργανικής και ανόργανης μήτρας

Μια μέθοδος ενίσχυσης αντίστοιχη με τα TRM αποτελούν τα Ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) η αλλιώς "Fiber-reinforced polymers (FRP)" τα οποία είναι πιο διαδεδομένα και αποτελούνται επίσης από ίνες με τη διαφορά ότι το μητρικό τους υλικό είναι κυρίως ρητίνες και υπάρχει απουσία βρόχων μεταξύ των ινών όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.4**. Η ιδιαίτερα αυξημένη εφελκυστική αντοχή των πλεγμάτων αναλογικά με το βάρος τους (είναι ιδιαίτερα ελαφριά), η γρήγορη και πρακτική διαδικασία εφαρμογής τους χωρίς να γίνεται τροποποίηση της γεωμετρίας της κατασκευής, αλλά και η ανθεκτικότητα στη διάβρωση και το χρόνο που τα χαρακτηρίζει αποτελούν τους κύριους λόγους που η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης έχει μεγάλη απήχηση στην επιστημονική κοινότητα.



Σχήμα 2.4: Υφάσματα ΙΟΠ συνεχών ινών (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου
<https://www.castrocompositesshop.com/gb/fibre-reinforcements/1198-biaxial-glass-fabric-600-g-m2.html>
<https://www.kruss-scientific.com/applications/fiber-reinforced-polymers/>
<https://www.cristex.co.uk/products/woven-fabrics/aramid-fabric/>

Σημαντική θέση ωστόσο λαμβάνουν και τα μειονεκτήματα της μεθόδου των ινοπλισμένων πολυμερών έναντι των οποίων υπερτερούν τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας [4]:

- Οι ρητίνες που συνήθως χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις έχουν ιδιαίτερα μικρή αντοχή έναντι των υψηλών θερμοκρασιών, ως εκ τούτου στους 60°C υπάρχει σημαντική μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας της ενώ στους 250°C συμβαίνει η ανάφλεξη της. Χρίζει επομένως δαπανηρής προστασίας αφού σε πιο θερμές περιοχές με έντονη έκθεση στον ήλιο αλλά και σε περιπτώσεις πυρκαγιάς αστοχεί.

- Σε παρόμοιο πλαίσιο εντάσσεται και η ευαισθησία που παρουσιάζει η ρητίνη σε υπεριώδη ακτινοβολία στην οποία αν εκτίθεται για μεγάλο διάστημα γίνεται εύθραυστη.
- Εκτός από τις υψηλές θερμοκρασίες στις περισσότερες ρητίνες συναντάται πρόβλημα και στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και στις περιπτώσεις βροχής διότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί υπό αυτές τις συνθήκες.
- Σε αρκετές περιπτώσεις οι ρητίνες προκαλούν αλλοίωση του υλικού τόσο των τοιχοποιιών όσο και ορισμένων παλαιότερων υλικών κατασκευής.
- Η εφαρμογή της είναι μη αναστρέψιμη το οποίο σε συνδυασμό με τις αλλοιώσεις των υλικών την καθιστά ακατάλληλη για κατασκευές ιστορικού και αρχαιολογικού ενδιαφέροντος εκτός των συμβατών αστικών κατασκευών.
- Αδυναμία διαπνοής των υποστρωμάτων που ενισχύονται με τους μανδύες και ταυτόχρονα δυσκολία εντοπισμού βλάβης αυτών σε περίπτωση σεισμού.
- Επικίνδυνη για εργατικά ατυχήματα λόγω των αναθυμιάσεων και της πρόκλησης εγκαυμάτων όταν έρχεται σε επαφή με το δέρμα.
- Τέλος, η τιμή των ρητινών είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση της ανόργανης μήτρας δίνει τη λύση σε όλες τις "αστοχίες" και παράλληλα έχει τα κύρια πλεονεκτήματα των ΙΟΠ. Ο οικολογικός χαρακτήρας τους είναι επίσης αξιοσημείωτος αφού μειώνει τις απαιτήσεις παχών των δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και ως επόμενο τις απαιτήσεις παραγωγής τσιμέντου τύπου Portland με την οποία εκλύεται διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Το μόνο σημείο που μειονεκτούν τα ΙΑΜ είναι η προβληματική συνάφεια μεταξύ του υποστρώματος και του πλέγματος ενίσχυσης με τη μήτρα κονιάματος, το οποίο και αποτελεί γενικώς αντικείμενο διερεύνησης [1]. Σε γενικές γραμμές όμως, ενώ οι ρητίνες είναι πιο διαδεδομένες στον τομέα των ενισχύσεων, η άνθηση της έρευνας πάνω στα ανόργανα υλικά είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια με διαρκείς προσπάθειες εξέλιξης και εύρεσης της μέγιστης αποδοτικότητας τους και είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσει σταδιακά στην αντικατάσταση των ρητινών.

2.2 Πεδίο εφαρμογής ενισχύσεων με IAM

2.2.1 Γενικά

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε η πληθώρα των πλεονεκτημάτων που συναντώνται στη χρήση των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (IAM), καθώς και ο μεγάλος χώρος για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση τους. Ενώ ορισμένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους που τα εδραιώνουν στο επίκεντρο της προσοχής της κατασκευαστικής κοινότητας είναι η υψηλή τους εφελκυστική αντοχή, η υψηλή αντίσταση σε διάβρωση και το προσιτό τους κόστος, ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι η ευκολία της εφαρμογής του. Τα IAM χάρη στον κατάλληλο χρόνο επεξεργασίας, την αναστρεψιμότητά τους και την εφαρμογή τους χωρίς να αλλάζουν τη γεωμετρία της κατασκευής, καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών με μεγάλη αποδοτικότητα [1]. Τα δομικά στοιχεία στα οποία βρίσκει κυρίως χρήση είναι στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος και στοιχεία φέρουσας τοιχοποιίας. Με γνώμονα αυτή τη διαφοροποίηση οι εφαρμογές των ενισχύσεων με IAM χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες.

2.2.2 Κατηγορίες ενίσχυσης με IAM

I. Ενισχύσεις στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται όλες οι ενισχύσεις με IAM που εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία από ΟΣ, και λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί είναι δυνατός ο διαχωρισμός στις ακόλουθες [1]:

- ***Περίσφιγξη στοιχείων ΟΣ:*** Η μελέτη της συγκεκριμένης μεθόδου ξεκίνησε από τους Triantafillou et al. (2006) [7] και στη συνέχεια τους Bournas et al. (2007) [8] μέσω δοκιμών κεντρικής θλίψης. Μέσω της έρευνας τους βρέθηκε ότι τα IAM αυξάνουν κατά δύο φορές την θλιπτική αντοχή και τέσσερις την μέγιστη παραμόρφωση των στοιχείων ΟΣ, καθιστώντας τα 80% αποδοτικότερα από τα ΙΟΠ όσο αναφορά την θλιπτική αντοχή και 50% όσο αναφορά την μέγιστη παραμόρφωση. Παράλληλα, υπάρχει επιβράδυνση του λυγισμού του διαμήκη οπλισμού και μικρή επίδραση του εγκάρσιου στη θλιπτική αντοχή.

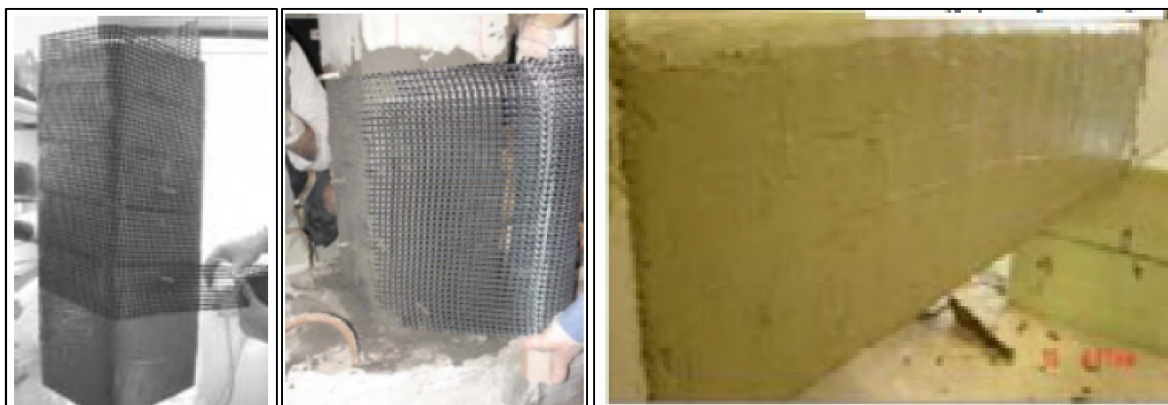
- **Περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές:** Με δοκιμές πλευρικής κυκλικής φόρτισης σε δοκίμια τύπου υποστυλώματος μελετήθηκε η επίδραση των ΙΑΜ στις κρίσιμες περιοχές από τους Bournas et al. (2009) [9]. Παρατηρήθηκε αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης των ενισχυμένων στοιχείων κατά δυόμιση φορές με αποτέλεσμα τη βελτίωση της συμπεριφοράς της πλαστικής άρθρωσης της βάσης του υποστυλώματος σε σεισμική φόρτιση. Συνεπώς αποτελεί λύση του προβλήματος της ανεπάρκειας του διαμήκους οπλισμού είτε λόγω μήκους μάτισης είτε λυγισμού του.

- **Καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών ΟΣ:** Στις περιπτώσεις στοιχείων τύπου δοκού και πλακών μιας διεύθυνσης οι μηχανισμοί αστοχίας είναι παρεμφερείς και για αυτό υπάρχει ομαδοποίησή τους. Όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν από τους Triantafyllou et al. (2005) [10], D' Ambrisi and Focacci (2011) [11] και Elsanadedy et al. (2013) [12] πάνω στα στοιχεία τύπου δοκού έδειξαν αύξηση της καμπτικής αντοχής ανάλογη με το ποσοστό του οπλισμού ενίσχυσης. Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και από πειράματα ενίσχυσης πλάκας ΟΣ μιας διεύθυνσης με ΙΑΜ που διεξήγαγαν οι Bruckner et al. (2006) [13], Papanicolaou et al. (2009) [14] και Loreto et al. (2014) [15]. Όσον αφορά τις πλάκες δυο διευθύνσεων τις οποίες μελέτησαν οι Papanicolaou et al. (2009) [14] παρατηρήθηκε στα ενισχυμένα δοκίμια αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 20-53% ανάλογα με τις στρώσεις ενίσχυσης και μικρή αύξηση της δυσκαμψίας.

- **Ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος ΟΣ:** Περιορισμένη έρευνα έχει γίνει σε αυτή τη μέθοδο με τους Al-Salloum et al. (2011) [16] να πρωτοπορούν με δοκιμές κυκλικής φόρτισης. Το πόρισμα που βγήκε είναι ότι ενώ η αύξηση της αντοχής του συστήματος με την ενίσχυση είναι κοντά στο 15%, η παραμόρφωση αστοχίας αυξάνεται περίπου κατά 50%.

- **Διατμητική ενίσχυση δοκών ΟΣ:** Λόγω του υψηλού ερευνητικού της ενδιαφέροντος οι Triantafyllou and Papanicolaou (2006) [17] μελέτησαν δοκούς ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων σε τέμνουσα υποβάλλοντας τις σε κυκλική φόρτιση. Παρατηρήθηκε

αύξηση της αντοχής έως και 100% στις ενισχύσεις με IAM, η οποία ωστόσο ήταν κατά 45% μικρότερη από αυτή των ΙΟΠ.



Σχήμα 2.1: Πειραματική εφαρμογή ενίσχυσης, (α) υποστηλώματος, (β) κρίσιμης περιοχής υποστηλώματος, (γ) δοκού [1]

II. Ενισχύσεις στοιχείων τοιχοποιίας

Ένα εξίσου μεγάλο εύρος ερευνητικών εργασιών συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία, με τη διαφορά ότι το δομικό στοιχείο που ενισχύεται με IAM είναι η φέρουσα τοιχοποιία. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία οι υποκατηγορίες στις οποίες αναλύεται είναι οι ακόλουθες:

- ***Ενίσχυση για αύξηση της εντός επιπέδου ικανότητας ανάληψης τέμνουσας:*** Με το παρόν αντικείμενο ασχολήθηκαν οι Paranicolaou et al. (2007) [18], υποβάλλοντας σε αξονικό φορτίο οπτοπλινθοδομές ενισχυμένες αμφίπλευρα με IAM. Σημειώθηκε αύξηση της αντοχής των τοιχοσωμάτων από 6 έως 25 φορές συγκριτικά με τα μη ενισχυμένα ανάλογα με το αξονικό φορτίο και τις στρώσεις ενίσχυσης, ενώ παράλληλα η πλευρική παραμόρφωση τους αυξήθηκε κατά 13 φορές ανεξαρτήτως των στρώσεων. Συγκρίνοντας τα με τις ενισχύσεις με ΙΟΠ, η αποτελεσματικότητά τους ως προς την αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης ήταν μεγαλύτερη, σε αντίθεση με την αποτελεσματικότητά τους στην αύξηση της αντοχής.
- ***Ενίσχυση για αύξηση της εκτός επιπέδου ικανότητας ανάληψης φορτίου:*** Μέσω δοκιμών κάμψης τριών σημείων σε τοιχοσώματα ενισχυμένα με IAM μελετήθηκε από τους

Papanicolaou et al. (2008) [19] η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης. Έναντι της σχεδόν μηδενικής αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης των μη ενισχυμένων τοιχοσωμάτων, τα IAM έδειξαν σημαντικά αποτελέσματα με μικρή σημασία στον αριθμό των στρώσεων. Στις περιπτώσεις που αστοχία ελεγχόταν από τη βλάβη της τοιχοποιίας παρατηρήθηκε ότι τα IAM παρουσίαζαν καλύτερα αποτελέσματα, ενώ στην περίπτωση θραύσης των ινών ενίσχυσης αποδοτικότερα ήταν τα ΙΟΠ.

- **Περίσφιγξη στοιχείων τοιχοποιίας τύπου υποστυλώματος:** Με αυτή πρώτος ασχολήθηκε ο Ombres (2015) [20], κάνοντας δοκιμές σε ενισχυμένα τοιχοσώματα υπό κεντρική θλίψη. Παρατηρήθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής περίπου 2,2 φορές και αύξηση της θλιπτικής παραμόρφωσης κατά περίπου 4 φορές κατά μέσο όρο. Παρόλο που στους μανδύες με ΙΟΠ παρατηρήθηκε παρόμοια αύξηση της αντοχής, τα IAM υπερτερούσαν σε μεγάλο βαθμό όσον αφορά την αύξηση της παραμόρφωσης.

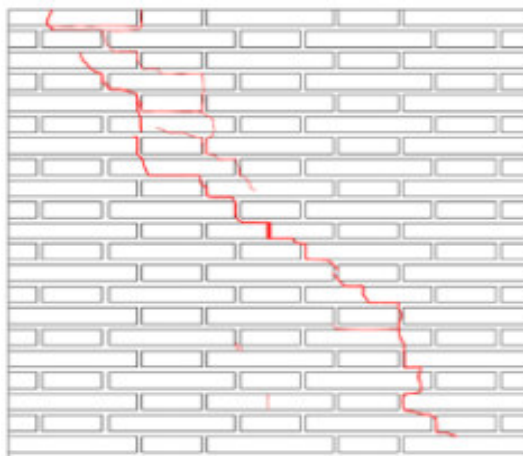


Σχήμα 2.2: Πειραματική εφαρμογή ενίσχυσης τοιχοποιίας

- **Ενίσχυση σε διαγώνια θλίψη:** Αποτελεί μεταξύ άλλων αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα αναφερθεί εκτενέστερα στις ακόλουθες ενότητες.

2.2.3 Διατμητική αστοχία και τοιχοπληρώσεις

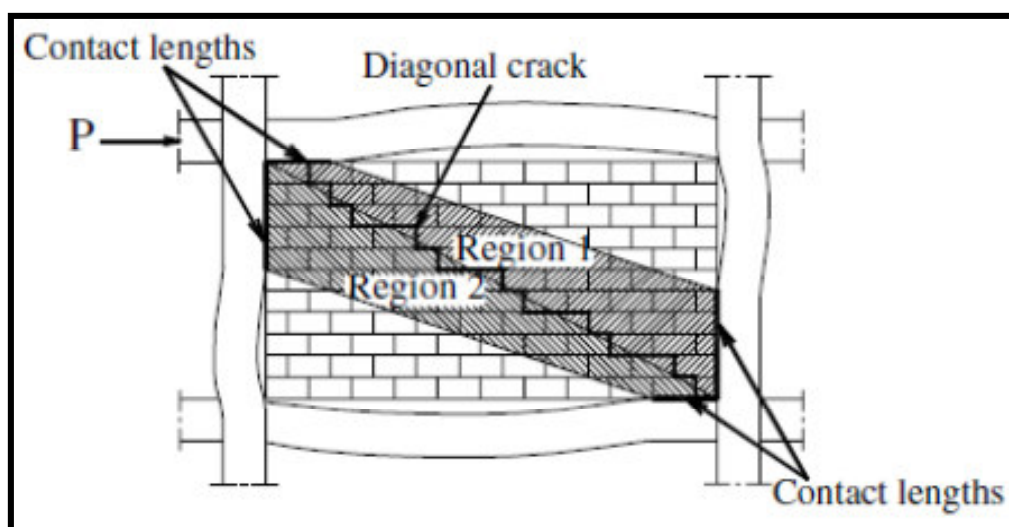
Προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως η σημασία της συγκεκριμένης μεθόδου ενίσχυσης, είναι σημαντική σε πρώτη φάση η κατανόηση της διατμητικής αστοχίας. Μια αρκετά συνηθισμένη μορφή αστοχίας είναι η ρηγμάτωση της τοιχοποιίας υπό γωνία 45° , η οποία επέρχεται σε περιπτώσεις μεγάλου αξονικού φορτίου με μικρό λόγο πλευρών και διατμητική αντοχή. Στην περίπτωση που ο συνδυασμός των οριζόντιων και κατακόρυφων φορτίων προκαλεί εφελκυστικές τάσεις μεγαλύτερες της εφελκυστικής αντοχής του τοίχου σχηματίζονται διαγώνιες ρωγμές συνήθως στο κέντρο του με επέκταση προς τις γωνίες όπως φαίνεται και στο χαρακτηριστικό παράδειγμα του **Σχήματος 2.7**. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι ρωγμές ακολουθούν τους αρμούς (όπως φαίνεται και στο σχήμα) ενώ σε περιπτώσεις ασθενέστερων οπτόπλινθων και ισχυρότερων κονιαμάτων μπορεί να διαπεράσουν και τους οπτόπλινθους, ιδίως για αυξημένο αξονικό φορτίο [5].



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικό παράδειγμα διατμητικής αστοχίας τοιχοποιίας [21]

Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά συνηθισμένο και σε περιπτώσεις τοιχοπληρώσεων εμφανιζόμενων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος που συναντώνται σε σεισμογενείς περιοχές όπως είναι η Ελλάδα. Εξαιτίας της έντονης σεισμογένειας αυτής ο φέροντας οργανισμός παίρνει μεγάλες παραμορφώσεις, μεταφέροντας διατμητικές δυνάμεις στις δύσκαμπτες τοιχοπληρώσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση ρηγματώσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις κατάρρευση της κατασκευής. Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζεται αυτό το είδος αστοχίας ενώ παράλληλα αναλύεται η απόκριση της τοιχοπλήρωσης. Σύμφωνα με τους Wael El-Dakhkhni et. al. (2004) [22], κατά την μεταφορά του σεισμικού φορτίου P στην κατασκευή υπάρχει μερική απώλεια επαφής μεταξύ της τοιχοπλήρωσης και των

δομικών στοιχείων που την πλαισιώνουν. Για την επιφάνεια που συνεχίζει να βρίσκεται σε επαφή χρησιμοποιείται ο όρος "Contact lengths", και είναι αυτή που συγκρατεί την τοιχοποιία ενώ παράλληλα της προκαλεί ρηγματώσεις μέσω των μεταφερόμενων τάσεων. Για να απομονωθεί η περιοχή που εμφανίζονται οι ρηγματώσεις, θεωρούνται δύο διαγώνιες περιοχές από τα όρια επαφής της τοιχοπλήρωσης με τα δομικά στοιχεία μέχρι την κύρια διαγώνιο που τις διαχωρίζει σε "Region 1" και "Region 2" όπως φαίνονται στο σχήμα. Οι ρηγματώσεις αυτές συνεχίζουν να επεκκινούνται έως ότου να φτάσουν από τη μία άκρη της τοιχοπλήρωσης στην άλλη και να επέλθει η αστοχία της.



Σχήμα 2.8: Αστοχία τοιχοπλήρωσης σε πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος [22]

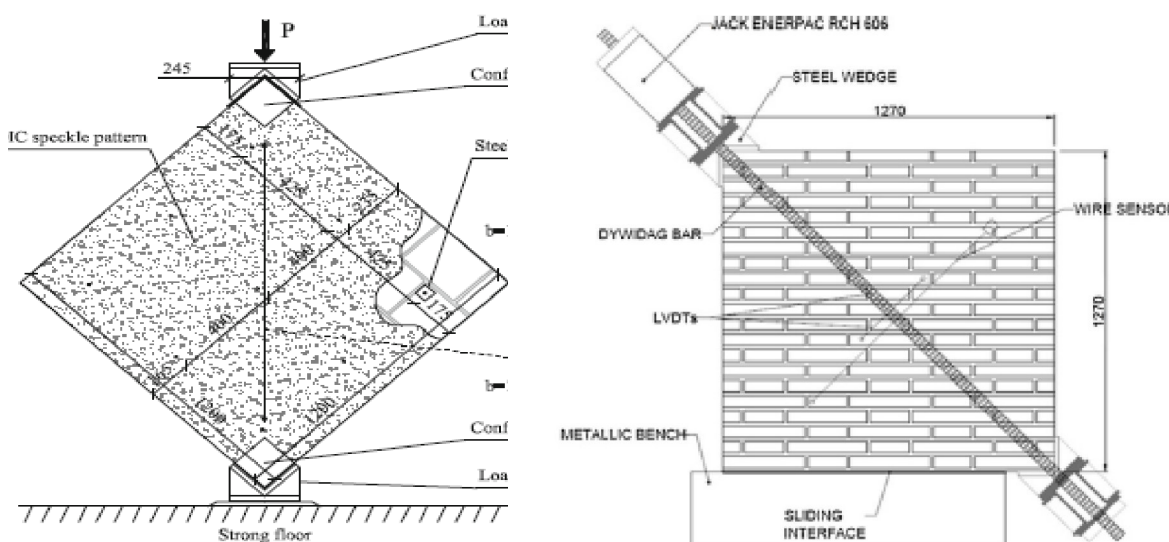
2.3 Πείραμα διαγώνιας θλίψης τοιχοσωμάτων

2.3.1 Περιγραφή της μεθόδου

Με κίνητρο την αποφυγή της διατμητικής αστοχίας των τοιχοπληρώσεων, διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης σε τοιχώματα ενισχυμένα με ΙΑΜ, των οποίων η επιρροή δινόταν να αυξήσει τη διατμητική αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης.

Ως διαγώνια θλίψη ορίζεται η πειραματική δοκιμή κατά την οποία η ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων της τοιχοποιίας είναι αποκλειστικά υπό γωνία 45° . Υπάρχουν δύο μέθοδοι εκτέλεσης της δοκιμής διαγώνιας θλίψης οι οποίες παρατίθενται στο Σχήμα 2.9 με την πιο γνωστή να είναι η στρέψη του τοίχου κατά 45° και στερέωση του εντός μηχανικής πρέσας. Μια άλλη διάταξη είναι η αγκύρωση του δοκιμίου σε μεταλλική βάση στο έδαφος και διαγώνια τοποθέτηση του οργάνου άσκησης πιέσεων με την βοήθεια σφηνών. Στη

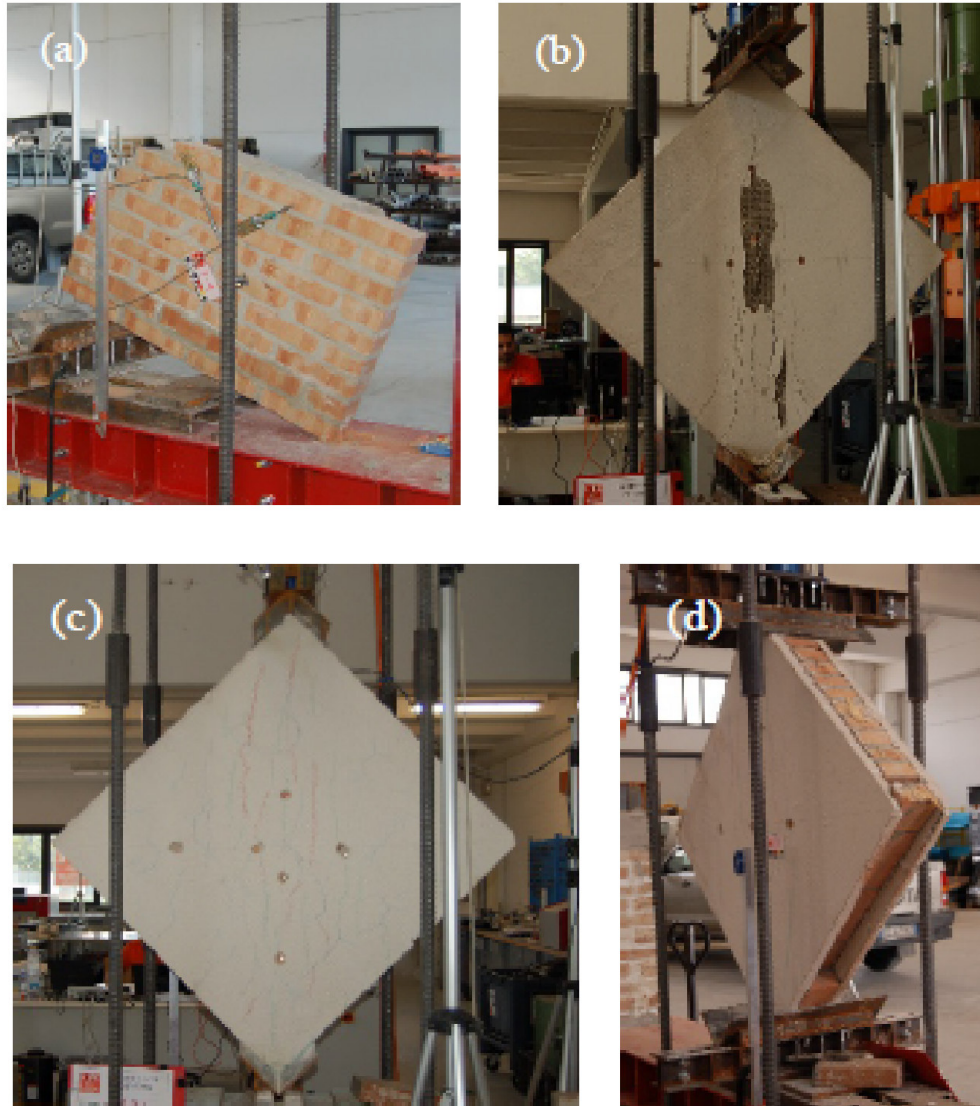
δεύτερη μέθοδο που ακολούθησαν μεταξύ άλλων οι " Garcia-Ramonda Larisa " [21] και "N. Gattesco" [23] δεν απαιτείται περιστροφή του τοίχου κατά 45°, κάτι που ελλοχεύει τον κίνδυνο βλάβης της τοιχοπλήρωσης. Ωστόσο, έχει επικρατήσει η πρώτη πειραματική διάταξη λόγω του πιο διαδεδομένου υλικοτεχνικού εξοπλισμού που είναι απαραίτητος για την τέλεση της. Τα πειράματα διαγώνιας θλίψης δεν αναπαράγουν απαραίτητα τις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες και ως επέκταση συμπεριφοράς της τοιχοποιίας, αλλά συνεισφέρουν στην διεύρυνση της γνώσης σχετικά με αυτή.



Σχήμα 2.9: Πειραματικές διατάξεις για πείραμα διαγώνιας θλίψης (α) υπο γωνία 45° (β) σε μεταλλική βάση [21] [24]

2.3.2 Πειραματικές δοκιμές διαγώνιας θλίψης

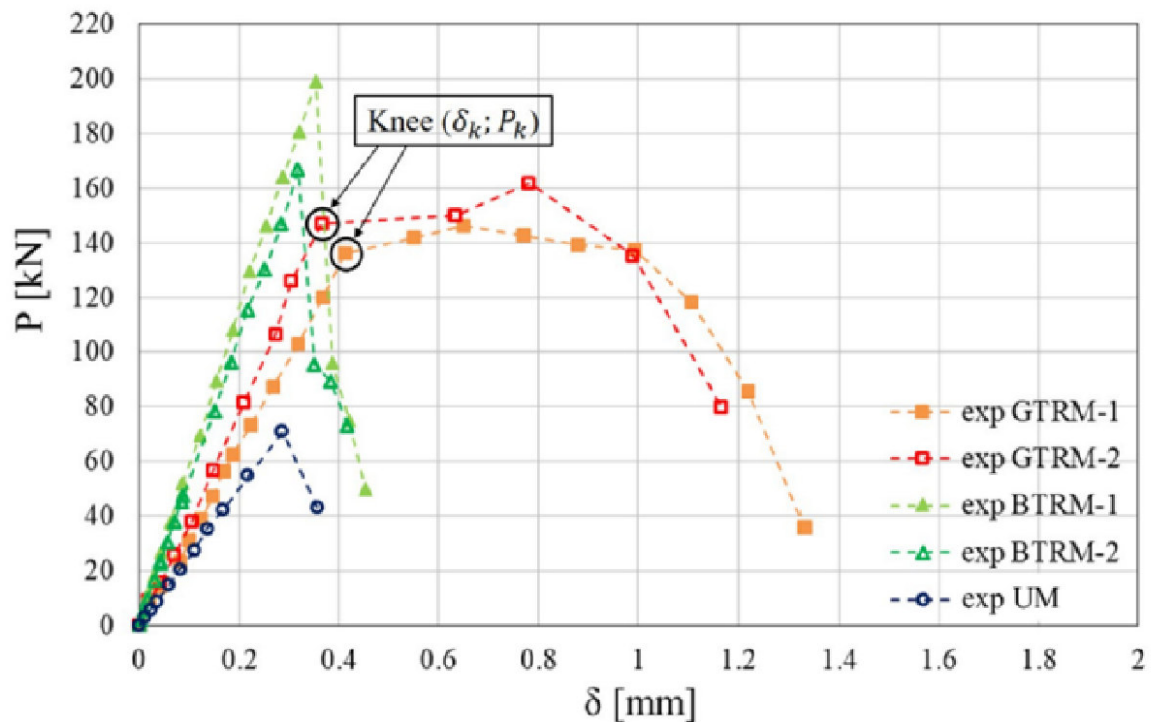
Με σκοπό τον έλεγχο αποδοτικότητας των TRM σε άοπλη φέρουσα τοιχοποιία οι Gulinelli Pietro et al. (2019) [25] μελέτησαν επτά τοιχώματα υπό διαγώνια θλίψη. Είχαν διαστάσεις 1030x1000x120mm³, διαστάσεις οπτόπλινθων 250x120x55mm και πάχος κατακόρυφων και οριζόντιων αρμών 10mm και 17mm αντίστοιχα. Εξ αυτών το ένα ήταν χωρίς ενίσχυση (URM) και λειτούργησε ως δοκίμιο αναφοράς ενώ τα υπόλοιπα έξι ενισχύθηκαν αμφίπλευρα με δυο διαφορετικά υλικά. Τα τρία ενισχύθηκαν με μια στρώση ινών υάλου (GTRM) πάχους 3mm και διαστάσεις βροχίδας 33x33 mm², με τιμεντοειδές κονίαμα και συνολικό πάχος ενίσχυσης 30mm ανά πλευρά. Τα υπόλοιπα τρία ενισχύθηκαν με πλέγμα από ίνες βασάλτη και "micro-threads" ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304 (BTRM), πάχους 0,064mm και διαστάσεις βροχίδας 8x8 mm², με τιμεντοειδές κονίαμα και συνολικό πάχος ενίσχυσης 10 mm ανά πλευρά.



Σχήμα 2.10: Τυπική μορφή αστοχίας των: URM (a), BTRM (b), GTRM (c) και της λεπτομέρειας αστοχίας του GTRM (d) [25]

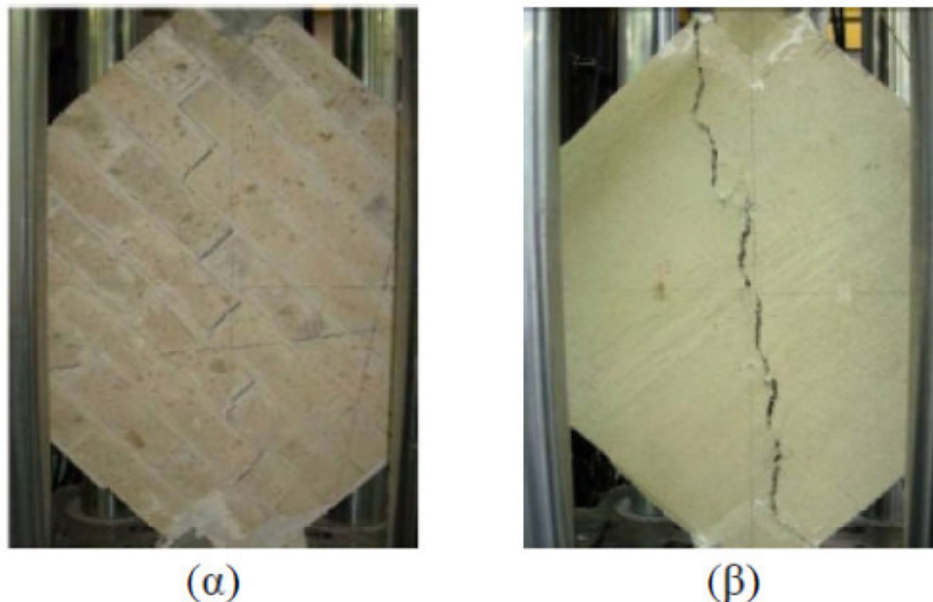
Βάσει των αποτελεσμάτων των παραπάνω πειραμάτων, τα οποία φαίνονται στο **Σχήμα 2.10** προέκυψε αύξηση της διατμητικής αντοχής κατά δύο φορές συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς στην περίπτωση της ενίσχυσης με GTRM και κατά δυόμιση φορές στην περίπτωση ενίσχυσης με BTRM. Η αύξηση με άλλα λόγια της θλιπτικής αντοχής ήταν κατά μέση τιμή 113% για τα τοιχοσώματα που ενισχύθηκαν με GTRM και 143% για τα τοιχοσώματα με BTRM. Η παραμόρφωση για τα τοιχοσώματα ενισχυμένα με BTRM δεν υπολογίστηκε, ωστόσο η αύξηση ήταν αξιοσημείωτη με τις στρώσεις GTRM καθώς η ικανότητα παραμόρφωσης ήταν 80% μεγαλύτερη από τα δοκίμια αναφοράς φτάνοντας τα 300 $\mu\text{m}/\text{m}$, [25].

Σε παρόμοιο κλίμα με ίδιες διαστάσεις δοκιμών και τρόπους ενίσχυσης, και με μόνη διαφορά τους τρόπους αγκύρωσης των ενισχύσεων, έγινε συνέχεια του πειραματικού προγράμματος από τους Gulinelli Pietro et al. (2020) [26] με πέντε τοιχώματα σε δοκιμή διαγώνιας θλίψης. Το ένα είχε λειτουργήσει ως δοκίμιο αναφοράς, ενώ δύο ενισχύθηκαν με GTRM και δύο με BTRM. Οι τιμές σε αυτά τα πειράματα προσέγγιζαν σε αρκετά καλό βαθμό τα προηγούμενα με κάποια μικρή βελτίωση στις αντοχές όλων των ενισχυμένων δοκιμών. Η προκύπτουσα αύξηση αντοχής ήταν 117% για GTRM και 158% για BTRM, ενώ οι μέγιστες παραμορφώσεις έδειξαν αύξηση 157% για GTRM και 18% για BTRM. Στο **Σχήμα 2.11** φαίνονται τα διαγράμματα του φορτίου συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης για όλα τα πειράματα.



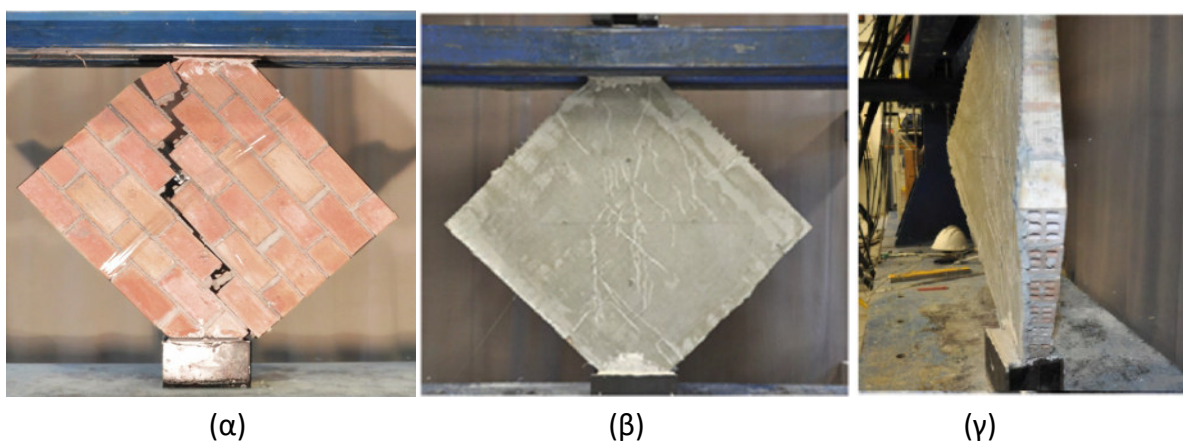
Σχήμα 2.11: Πειραματικά αποτελέσματα: κατακόρυφου φορτίου P , συναρτήσει της μετατόπισης δ [26]

Μία άλλη σειρά πειραματικών δοκιμών διεξήχθη σε τοιχοσώματα από λίθους τόφφου διαστάσεων 1200x1200mm από τους Prota et al. (2006) [27] και Parisi et al. (2013) [28], με σκοπό τη διερεύνηση της αποδοτικότητας της ενίσχυσης με IAM ιών υάλου. Τα πειράματα έγιναν σε τέσσερις τριπλέτες όμοιων δοκιμών μεταξύ των οποίων σημειώθηκε σημαντική απόκλιση αποτελεσμάτων. Οι τριπλέτες ομαδοποιούνταν με βάση τις πλευρές που πραγματοποιήθηκε ενίσχυση (μονόπλευρη ή αμφίπλευρη) και τις στρώσεις αυτής (μία ή δύο στρώσεις IAM υάλου). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων της μονόπλευρης ενίσχυσης έδειξαν ότι η διατμητική αντοχή αυξήθηκε κατά 100% για μια στρώση και κατά 180% για δύο στρώσεις ιών υάλου. Σχετικά με την αποτελεσματικότητα των αμφίπλευρων ενισχύσεων αναλογικά με το ποσοστό σπλισμού, ήταν εν γένει μικρότερη συγκριτικά με αυτή της μονόπλευρης είτε περιλάμβανε μία στρώση ενίσχυσης είτε δύο. Η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση ήταν περίπου 100% μεγαλύτερη από τα δοκίμια αναφοράς, ενώ από τους Parisi et al. (2013) [28] παρατηρήθηκε ότι το μέτρο διάτμησης είχε αυξηθεί σημαντικά στα ενισχυμένα δοκίμια. Στο **Σχήμα 2.12** φαίνεται η τυπική μορφή αστοχίας τοιχοσώματος μη ενισχυμένου και ενισχυμένου με μια στρώση IAM υάλου.



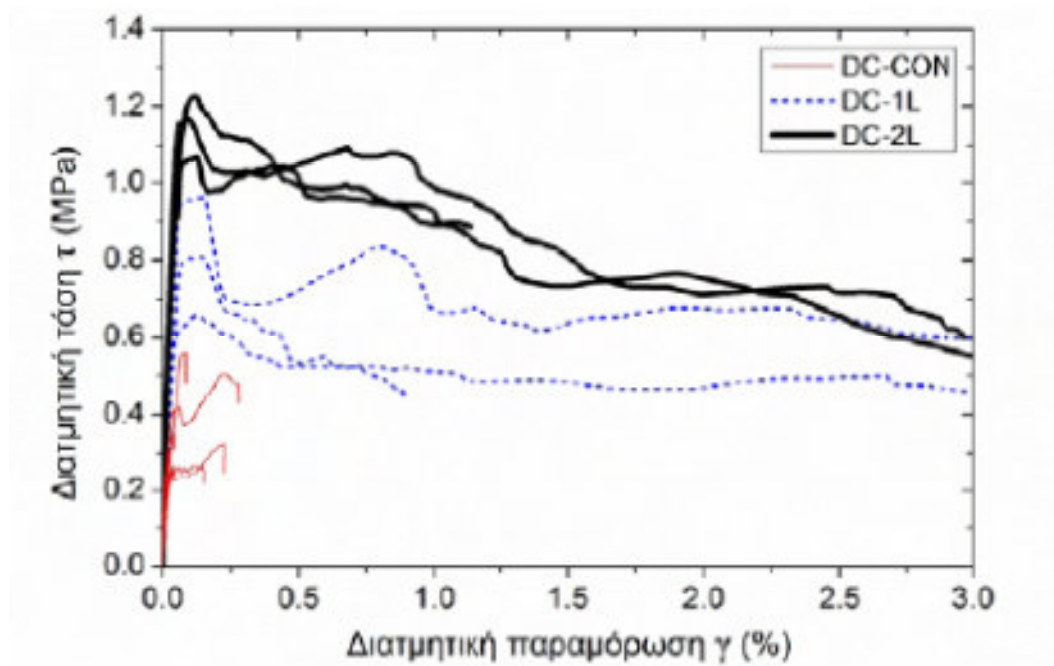
Σχήμα 2.12: Τυπικές μορφές αστοχίας τοιχοσωμάτων υπό διαγώνια θλίψη: (α) μη ενισχυμένο δοκίμιο και (β) ενισχυμένο δοκίμιο με μία στρώση IAM υάλου [28]

Διερευνώντας την επίδραση του αριθμού των στρώσεων IAM στην αύξηση της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης και του μέτρου διάτμησης των τοιχοσωμάτων ο Κούτας, Ν. Λάμπρος (2015) [29] διεξήγαγε δοκιμές διαγώνιας θλίψης σε δεκατρία τοιχοσώματα διαστάσεων 800x800x55mm. Εξ' αυτών τα επτά ήταν μη ενισχυμένα (DC_CON) και λειτούργησαν ως δοκίμια αναφοράς, τα τρία ενισχύθηκαν μονόπλευρα με μια στρώση IAM (DC_1L) και τα τελευταία τρία μονόπλευρα με δύο στρώσεις IAM (DC_2L). Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ινών υάλου τύπου E επικαλυμμένες με πολυμερή, με θεωρητικές διαστάσεις βροχίδας 25x25mm.



Σχήμα 2.13: Τυπικές μορφές (α) αστοχίας δοκιμίων αναφοράς, (β) ρηγμάτωσης στη στρώση της ενίσχυσης και (γ) εκτός επιπέδου παραμόρφωση ενισχυμένου δοκιμίου [29]

Στο **Σχήμα 2.13** φαίνεται ότι στα μη ενισχυμένα δοκίμια μετά την κύρια ρηγμάτωση το τοιχώσωμα αστόχησε, ενώ στα ενισχυμένα τα IAM φαίνεται να ελέγχουν την ρηγμάτωση με εκτός επιπέδου παραμόρφωση να παρατηρείται μετά την ανάπτυξη του μέγιστου φορτίου. Η αύξηση της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης ήταν κατά μέσο όρο 54% στα ενισχυμένα δοκίμια με μια στρώση και 118% στα δοκίμια με δύο στρώσεις IAM, ενώ το μέτρο διάτμησης αυξήθηκε κατά 38% και 92% για μια και δύο στρώσεις αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η αύξηση της τάσης και του μέτρου διάτμησης είναι μεγαλύτερη για τις δύο στρώσεις αναλογικά με το ποσοστό της ενίσχυσης, ενώ στο **Σχήμα 2.14** φαίνεται ότι και η μέγιστη διατμητική τάση καθώς και η εναπομένουσα αντοχή μετά την αστοχία είναι αισθητά μεγαλύτερες στα ενισχυμένα δοκίμια έναντι των αναφοράς.



Σχήμα 2.14: Καμπύλες διατμητικής τάσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης για τις δοκιμές διαγώνιας θλίψης τοιχοσωμάτων. [29]

2.3.3 Συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών

Από τα προαναφερθέντα πειράματα εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα ότι η συμβολή των ενισχύσεων με IAM στην αντοχή και στην περίπτωση των ινών υάλου την εντός επιπέδου αρχική ελαστική δυσκαμψία της τοιχοποιίας είναι μεγάλη. Σε όλα τα πειράματα για δύο στρώσεις IAM σημειώθηκε τουλάχιστον διπλάσια διατμητική αντοχή σε σύγκριση με τα δοκίμια αναφοράς ενώ από τους Prota et al. (2006) [27] και Parisi et al. (2013) [28] αναφέρθηκε ότι η αποδοτικότητα της μονόπλευρης ενίσχυσης αναλογικά με το ποσοστό της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από αυτή της αμφίπλευρης. Τα παραπάνω αποτελέσματα καθιστούν την ενίσχυση τοιχοπληρώσεων με IAM ιδανική λύση για σεισμογενείς περιοχές, αλλά και για κατασκευές ιστορικού ενδιαφέροντος λόγω της αναστρεψιμότητας που τα χαρακτηρίζει όπως αναφέρουν οι Gulinelli Pietro et al. [25]. Συνεπώς, αιτιολογείται η διαρκής άνοδος των IAM και η εντατικότερη πειραματική και υπολογιστική έρευνα πάνω σε αυτά καθώς ανταγωνίζονται επάξια τις ενισχύσεις με ΙΟΠ. Ειδικά αν συμπεριληφθούν τα μειονεκτήματα που αντιμετωπίζουν τα ΙΟΠ και το υψηλό τους κόστος, γίνεται όλο και πιο ξεκάθαρη η σημασία της έρευνας πάνω στην ανόργανη μήτρα και τα οφέλη της στις κατασκευές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

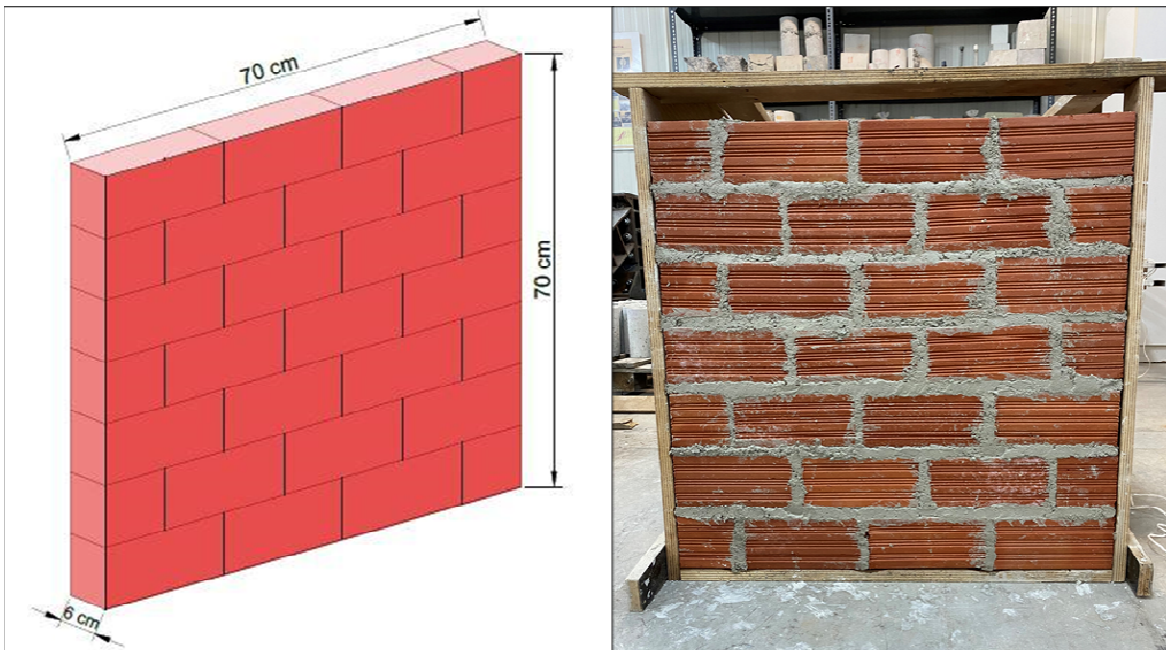
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

3.1 Γενικά

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το πειραματικό πρόγραμμα, το οποίο έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, από τον Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο του 2021. Αφορούσε την κατασκευή εννέα τοιχοσωμάτων ίδιων διαστάσεων, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή διαγώνιας θλίψης, βάσει διεθνών προτύπων (π.χ. RILEM(1991) [30] και ASTM(2019) [31]). Τα τρία από αυτά δοκιμάστηκαν χωρίς ενίσχυση (δοκίμια αναφοράς), ενώ τα υπόλοιπα έξι ενισχύθηκαν με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας. Στόχος του πειράματος ήταν η παρατήρηση της συμπεριφοράς των δοκιμών με ενίσχυση και η επιρροή των υλικών στην αποδοτικότητα της ενίσχυσης συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς.

3.2 Περιγραφή Δοκιμών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δοκιμάστηκαν σε διαγώνια θλίψη εννέα δοκίμια τοιχοποιίας κατασκευασμένα από διάτρητους αργιλικούς οπτόπλινθους και τσιμεντοκονίαμα του οποίου η σύνθεση προέκυψε μετά από δοκιμές στο εργαστήριο. Τα τρία από αυτά ενισχύθηκαν με ίνες βασάλτη και τσιμεντοειδές κονίαμα, τρία με ίνες υάλου και τσιμεντοειδές κονίαμα, ενώ τα υπόλοιπα τρία δοκιμάστηκαν χωρίς ενίσχυση (δοκίμια αναφοράς). Η τσιμεντοειδούς σύστασης μήτρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ίδια για όλες τις ενισχύσεις, ενώ η σύνθεσή της στην πρώτη ενίσχυση με βασάλτη που πραγματοποιήθηκε ήταν 1:0,22 (τσιμέντο : νερό) και στις υπόλοιπες 1:0,23. Οι διαστάσεις όλων των τοιχοπληρώσεων επιλέχθηκαν να είναι περίπου 70 cm x 70 cm, με διατομή σταθερή σε όλο το μήκος τους και πάχος 6cm, όπως φαίνεται και στο προσομοίωμα του **Σχήματος 3.1**. Το πρωτόκολλο φόρτισης αλλά και η κατασκευή τους, ήταν κοινά για όλα τα δοκίμια, συνεπώς η κάθε τριάδα δοκιμών ήταν όμοια, με σκοπό την εξαγωγή ασφαλούς μέσου όρου των πειραματικών αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαφοροποίηση στην πειραματική συμπεριφορά τους οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην επιρροή της ενίσχυσης.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία πειραματικών δοκιμών τοιχοποιίας

Όσον αφορά την ενίσχυση, οι διαστάσεις των ινοπλεγμάτων διαμορφώθηκαν στα 69,5cm x 69,5cm ενώ το τελικό πάχος ενίσχυσης μετρήθηκε περίπου στα 5 χιλιοστά.

3.2.1. Ονοματολογία Δοκιμών

Για το κάθε ενισχυμένο δοκίμιο δόθηκε κατάλληλη ονομασία, ανάλογα με τα υλικά ενίσχυσης και τις στρώσεις. Ο συμβολισμός της ονοματολογίας ήταν DT_WALL_XYK, όπου X το είδος της ενίσχυσης, Y ο αριθμός των στρώσεων της ενίσχυσης και K ο αριθμός του δοκιμίου (από 1 έως 3 για τα τρία όμοια δοκίμια). Έτσι, οι πρώτες τρεις τοιχοπληρώσεις που δοκιμάστηκαν (δοκίμια αναφοράς) ονομάστηκαν DT_WALL_CON, καθώς ήταν εκείνα που δεν ενισχύθηκαν. Οι επόμενες τρεις που ενισχύθηκαν με βασάλτη ονομάστηκαν DT_WALL_B2, και οι τελευταίες τρεις που ενισχύθηκαν με γυαλί ονομάστηκαν DT_WALL_G2. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένες οι ονοματολογίες όλων των δοκιμών.

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμών

Ονομασία Δοκιμίου	Αριθμός Στρώσεων
DT_WALL_CON1	-
DT_WALL_CON2	-
DT_WALL_CON3	-
DT_WALL_B2_1	2
DT_WALL_B2_2	2
DT_WALL_B2_3	2
DT_WALL_G2_1	2
DT_WALL_G2_2	2
DT_WALL_G2_3	2

3.3. Ιδιότητες Υλικών

3.3.1. Οπτόπλινθοι

Για την κατασκευή της κάθε τοιχοπλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 28 οπτόπλινθοι, η τοποθέτηση των οποίων έγινε με οριζόντια φορά όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1**. Από αυτούς οι 21 είχαν μήκος 190 mm, πλάτος 60 mm και ύψος 90 mm, ενώ οι υπόλοιποι 7 ήταν κομμένοι στη μέση, συνεπώς είχαν μήκος 95 mm, ενώ το πλάτος και το ύψος τους ήταν ίδιο με τους προηγούμενους. Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των οπτόπλινθων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θλίψης σε 6 από αυτούς στην οριζόντια διεύθυνση, και σε 6 στην κατακόρυφη διεύθυνση, αφού πρώτα εφαρμόστηκε μία στρώση γύψου στο καθένα, στις επιφάνειες στις οποίες θα ασκούσαν το φορτίο από την πρέσα. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκεντρωμένες τάσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος λόγω της ανομοιόμορφης επιφάνειας των οπτόπλινθων. Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων στην κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση, ενώ στο **Σχήμα 3.3** φαίνεται η τυπική μορφή αστοχίας τους. Ο ρυθμός επιβολής μετακινήσεων ήταν 15 μm/sec.

Ο υπολογισμός της μέγιστης τάσης που αναπτύχθηκε στο κάθε δοκίμιο έγινε με χρήση της **Σχέσης 3.1**.

$$\sigma = 1000 \frac{F}{A_n}, \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

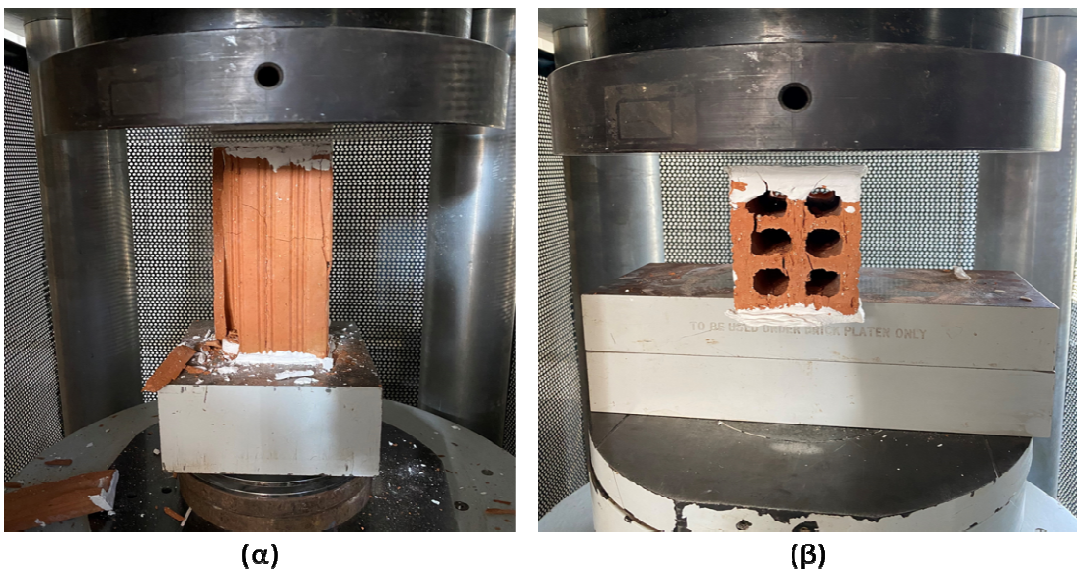
Όπου:

F: Το φορτίο αστοχίας του δοκιμίου σε N

A_n : Το εμβαδόν της επιφάνειας εφαρμογής του φορτίου του δοκιμίου σε τετραγωνικά χιλιοστά



Σχήμα 3.2: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης μεμονωμένων οπτόπλινθων.



Σχήμα 3.3: Τυπική μορφή θλιπτικής αστοχίας οπτόπλινθων α) στην κατακόρυφη διεύθυνση β) στην οριζόντια διεύθυνση

Το φορτίο και η τάση αστοχίας των οπτόπλινθων που δοκιμάστηκαν παρουσιάζονται στους **Πίνακες 3.2** και **3.3** για την κατακόρυφη (long) και την οριζόντια διεύθυνση (short) αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης οπτόπλινθων στην κατακόρυφη διεύθυνση (long)

LONG					
Φορτίο					
Μέσος όρος (kN)	Τυπική απόκλιση (kN)	COV (%)			
83,68	13,02	15,55			
Φορτίο Αστοχίας 1 (kN)	Φορτίο Αστοχίας 2 (kN)	Φορτίο Αστοχίας 3 (kN)	Φορτίο Αστοχίας 4 (kN)	Φορτίο Αστοχίας 5 (kN)	Φορτίο Αστοχίας 6 (kN)
93,2	90,2	86,9	57,6	87	87,2
Τάση					
Μέσος όρος(MPa)	Τυπική απόκλιση (MPa)	COV (%)			
15,5	2,41	15,55			
Τάση Αστοχίας 1 (MPa)	Τάση Αστοχίας 2 (MPa)	Τάση Αστοχίας 3 (MPa)	Τάση Αστοχίας 4 (MPa)	Τάση Αστοχίας 5 (MPa)	Τάση Αστοχίας 6 (MPa)
17,26	16,7	16,09	10,67	16,11	16,15

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης οπτόπλινθων στην οριζόντια διεύθυνση (short)

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

3.2.2. Κονίαμα

Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των αρμών των δοκιμίων τοιχοποιίας ήταν κονίαμα δόμησης γενικής εφαρμογής και προέκυψε από την ανάμειξη τεσσάρων συστατικών: τσιμέντο, άμμος, ασβέστης και νερό. Η αναλογία τους ήταν περίπου η ίδια σε όλα τα δοκίμια. Συγκεκριμένα, η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε μετά από δοκιμές στο εργαστήριο. Μετά την παρασκευή της πρώτης δόσης κονιάματος διαπιστώθηκε ότι το μείγμα είχε ελαφρώς μεγαλύτερη υδαρότητα, συνεπώς στις υπόλοιπες δόσεις χρησιμοποιήθηκε μικρότερη ποσότητα νερού. Στον **Πίνακα 3.4** φαίνονται αναλυτικά οι αναλογίες και οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 3.4: Σύνθεση μείγματος κονιάματος

Σύνθεση Μείγματος Κονιάματος				
	1		2	
	Αναλογίες (κατ' όγκο)	Βάρος (kg)	Αναλογίες (κατ' όγκο)	Βάρος (kg)
Τσιμέντο	1	0,945	1	0,945
Άμμος	5	7,66	5	7,66
Ασβέστης	1	1,13	1	1,13
Νερό		0,9		0,85

Για το πρώτο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν οι αναλογίες της πρώτης δόσης, και για τα υπόλοιπα 8 οι αναλογίες της δεύτερης. Επιπλέον, από τις δόσεις του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πρώτου, του τρίτου και του πέμπτου δοκιμίου, λήφθηκε δείγμα το οποίο εφαρμόστηκε σε κατάλληλες μεταλλικές μήτρες όπως φαίνεται στην εικόνα του **Σχήματος 3.4**, δημιουργώντας συνολικά 9 δοκίμια ορθογωνικής διατομής, των οποίων η συντήρηση περιλάμβανε τη διαβροχή της ελεύθερης επιφάνειάς τους για επτά ημέρες. Οι διαστάσεις τους ήταν ίδιες, με μήκος 160 mm, πλάτος 40 mm και ύψος 40 mm, ενώ το βάρος τους κυμαινόταν από 496-534g. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν ο μετέπειτα πειραματικός προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του κονιάματος αρμών.



Σχήμα 3.4: Εφαρμογή κονιάματος στη μεταλλική μήτρα

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια αυτά ήταν δύο. Αρχικά πραγματοποιήθηκε κάμψη τριών σημείων, με σκοπό τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος. Από τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων προέκυψαν δύο επιμέρους πρίσματα, κάθε ένα εκ των οποίων υποβλήθηκε σε δοκιμή θλίψης με σκοπό τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος. Ακολουθούν οι Σχέσεις 3.2 και 3.3 που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εφελκυστικής τάσης αστοχίας μέσω της δοκιμής κάμψης και της θλιπτικής τάσης αστοχίας μέσω της δοκιμής θλίψης. Στα Σχήματα 3.5 και 3.6 παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό από τις παραπάνω πειραματικές δοκιμές. Ο ρυθμός φόρτισης για την κάμψη τριών σημείων ήταν 0,05 kN/sec, ενώ για τη θλίψη 15 μm/sec.

Για το πείραμα κάμψης :

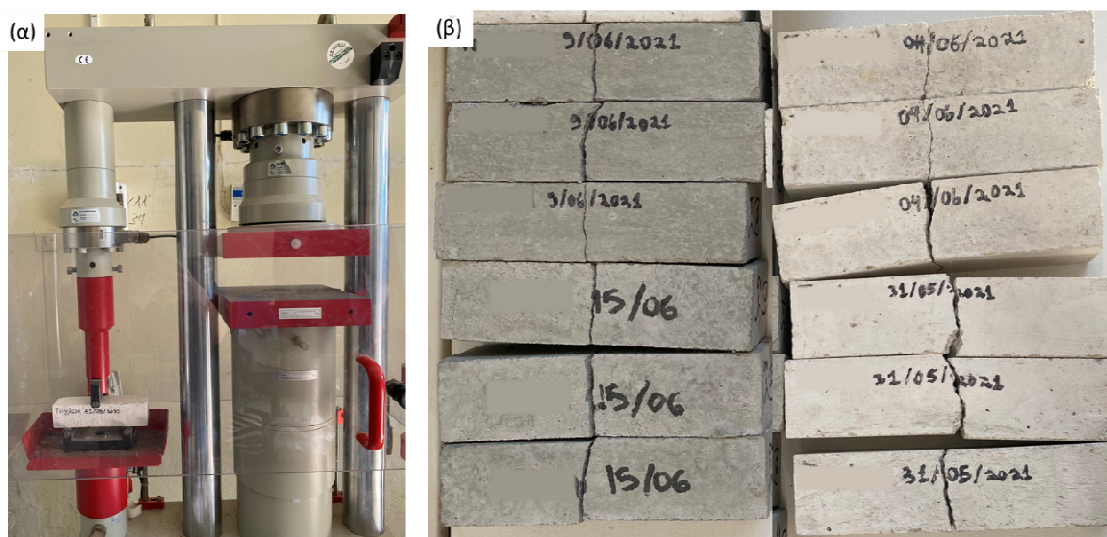
$$\sigma = 1,5 \frac{F \cdot 100}{b \cdot d^2}, \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

Όπου:

F: το φορτίο αστοχίας του δοκιμίου σε N

b: το πλάτος του δοκιμίου σε χιλιοστά

d: το ύψος του δοκιμίου σε χιλιοστά



Σχήμα 3.1: (α) Πείραμα κάμψης τριών σημείων (β) Αστοχία δειγμάτων κονιάματος

Για το πείραμα θλίψης:

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

Όπου:

F: το φορτίο αστοχίας του δοκιμίου σε N

b: το πλάτος του δοκιμίου σε χιλιοστά



Σχήμα 3.6: Πείραμα θλίψης δείγματος κονιάματος

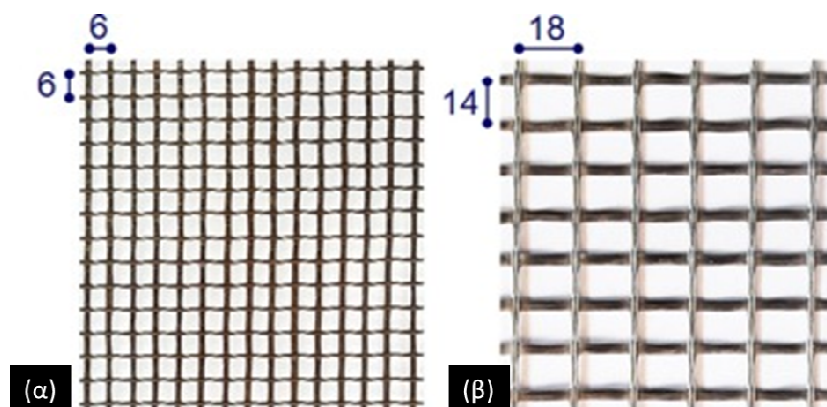
Στον **Πίνακα 3.5** συνοψίζεται το φορτίο αστοχίας και στις δύο σειρές πειραμάτων, η τάση αστοχίας αλλά και οι ιδιότητες των δοκιμών (βάρος και διαστάσεις).

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων και δοκιμών θλίψης των κονιαμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τους αρμούς των δοκιμών τοιχοποιίας.

Δοκιμή κάμψης τριών σημείων							
Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμών (ημέρες)	Βάρος(g)	Μήκος(mm)	Πλάτος(mm)	Υψος(mm)	Φορτίο Αστοχίας F (kN)	Τάση Αστοχίας (MPa)
T-1(a)	138	522	159,5	40,55	40,05	0,755	1,74
T-1(b)	138	521,4	159,25	40,5	40,15	0,792	1,82
T-1(c)	138	523,7	159,5	40,45	40,15	0,897	2,06
T-2(a)	135	500,6	160,25	40,1	39,95	0,827	1,94
T-2(b)	135	496,3	160,25	39,15	39,95	0,624	1,50
T-2(c)	135	496,1	160,25	38,65	40,05	0,666	1,61
T-3(a)	131	524,1	160	41,3	40,05	0,859	1,95
T-3(b)	131	528,9	160	41,85	40,15	1,034	2,30
T-3(c)	131	528,6	160,25	41,75	40,05	0,924	2,07
Μέσος όρος						0,8198	1,89
Τυπική Απόκλιση						0,13	0,25
Δοκιμή Θλίψης							
Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμών (ημέρες)	Βάρος(g)	Μήκος(mm)	Πλάτος(mm)	Υψος(mm)	Μέγιστο Φορτίο F (kN)	Τάση Αστοχίας (MPa)
T-1(a)	138	522	159,5	40,55	40,05	14	8,63
T-1(b)	138	521,4	159,25	40,5	40,15	14,5	8,95
T-1(c)	138	523,7	159,5	40,45	40,15	13,9	8,59
T-2(a)	135	500,6	160,25	40,1	39,95	12,6	7,86
T-2(b)	135	496,3	160,25	39,15	39,95	11,2	7,15
T-2(c)	135	496,1	160,25	38,65	40,05	10,5	6,79
T-3(a)	131	524,1	160	41,3	40,05	14,4	8,72
T-3(b)	131	528,9	160	41,85	40,15	13,2	7,89
T-3(c)	131	528,6	160,25	41,75	40,05	16	9,58
Μέσος όρος						13,37	8,24
Τυπική Απόκλιση						1,71	0,89

3.3.3. Πλέγματα ενίσχυσης

Για τη διαδικασία της ενίσχυσης των τοιχοπληρώσεων με εξωτερικά επικολλούμενες στρώσεις IAM χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη ινοπλεγμάτων, τα οποία συνιστούν τον οπλισμό των IAM. Οι πρώτες τρεις ενισχύσεις πραγματοποιήθηκαν με πλέγμα ινών βασάλτη με θεωρητικό άνοιγμα βρόχων 6 mm x 6 mm, ενώ οι υπόλοιπες τρεις ενισχύσεις πραγματοποιήθηκαν με πλέγμα ινών υάλου με θεωρητικό άνοιγμα βρόχων 18mm x 14mm. Οι κλώνοι και των δύο τύπων ινοπλεγμάτων ήταν δύο διευθύνσεων, με την κύρια διεύθυνση των πλεγμάτων να είναι στην οριζόντια διεύθυνση όπως φαίνεται και στις εικόνες του **Σχήματος 3.7**. Καθοριστικός παράγοντας που επηρέασε την επιλογή των τύπων ενίσχυσης, ήταν η μεγάλη ικανότητα των ινοπλεγμάτων σε παραμόρφωση, ενώ οι ιδιότητες τους φαίνονται πιο αναλυτικά στον **Πίνακα 3.6**.



Σχήμα 3.7: (α)πλέγμα ινών βασάλτη (β) πλέγμα ινών υάλου

Πίνακας 3.6: Ιδιότητες ινοπλεγμάτων

Υλικό	Βασάλτης	Γυαλί
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	89	80
Επιφανειακό βάρος χωρίς επικάλυψη (g/m^2)	214	280
Επιφανειακό βάρος με επικάλυψη (g/m^2)	250	360
Ποσοστό βάρους στην κύρια διεύθυνση (%)	50	51,78
Ποσοστό βάρους στην δευτερεύουσα διεύθυνση (%)	50	48,22
Εφελκυστική αντοχή κύριας διεύθυνσης (kN/m)	60	77
Εφελκυστική αντοχή δευτερεύουσας διεύθυνσης (kN/m)	60	76
Διαστάσεις πλέγματος (mm x mm)	6 x 6	18 x 14

3.3.4 Μήτρα ενίσχυσης

Όπως προαναφέρθηκε, στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκαν έξι ενισχύσεις. Όλα τα δοκίμια ενισχύθηκαν με εμπορικά διαθέσιμο τσιμεντοκονίαμα ενισχύσεων, το οποίο προέκυπτε από την ανάμειξη δύο συστατικών. Το πρώτο ήταν ένα ινοπλισμένη τσιμεντοειδή κονία , και το δεύτερο ήταν νερό. Η σύσταση δεν ήταν ίδια για όλες τις ενισχύσεις, αλλά προέκυψε μετά από δοκιμές στο εργαστήριο, για να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητά του και το επιθυμητό ιξώδες του, με την πρώτη δόση να έχει αναλογία κατά βάρος 1:0,22 (τσιμέντο : νερό), και τις υπόλοιπες 1:0,23. Η πρώτη δόση χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση του πρώτου δοκιμίου με βασάλτη ενώ για τις υπόλοιπες ενισχύσεις χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη. Στον **Πίνακα 3.7** παρατίθενται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κονιάματος και στο **Σχήμα 3.8** παρουσιάζεται το κύριο συστατικό του (συστατικό Α).

Πίνακας 3.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος

Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος	
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	1,3 mm
Ελάχιστο πάχος στρώσης	5 mm
Μέγιστο πάχος στρώσης	15 mm
Χρόνος εργασιμότητας	30 λεπτά στους 20 °C
Ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος	5 °C
Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος	35 °C



Σχήμα 3.8: Συστατικό Α κονιάματος

Από το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των δοκιμών λήφθηκε δείγμα από την δόση της πρώτης και της πέμπτης ενίσχυσης και εφαρμόσθηκε σε κατάλληλες μεταλλικές μήτρες δημιουργώντας έξι δοκίμια ορθογωνικής διατομής. Σημειώνεται ότι η κάθε δόση κονιάματος χρησιμοποιήθηκε για μία ενίσχυση δοκιμίου. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκαν πειράματα όμοια των δοκιμών κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε στα τοιχοσώματα που αναφέρθηκαν παραπάνω (δοκιμή θλίψης και κάμψης τριών σημείων), με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών τους χαρακτηριστικών μέσω των προαναφερθέντων **Σχέσεων 3.2** και **3.3**. Οι διαστάσεις τους ήταν ίδιες με των δοκιμών κονιάματος που αναφέρθηκαν παραπάνω και το βάρος τους κυμαινόταν από 431- 439 kg. Στους **Πίνακες 3.8** και **3.9** παρουσιάζονται αναλυτικά τα φορτία αστοχίας σε kN οι τάσεις αστοχίας σε MPa, αλλά και οι ιδιότητες του κάθε δοκιμίου για τις δοκιμές κάμψης και θλίψης αντίστοιχα, ενώ στο **Σχήμα 3.9** φαίνεται η αστοχία ενός δοκιμίου στο πείραμα κάμψης, η οποία ήταν παρόμοια και σε όλα τα υπόλοιπα δοκίμια. Για το πείραμα κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιήθηκε η **Σχέση 3.2** και για το πείραμα μονοαξονικής θλίψης η **Σχέση 3.3**.

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων

Πείραμα κάμψης τριών σημείων							
Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίων (ημέρες)	Βάρος(g)	Μήκος(mm)	Πλάτος(mm)	Ύψος(mm)	Μέγιστο Φορτίο F (kN)	Τάση Αστοχίας (MPa)
S-1(a)	126	434,6	160	40,4	39,7	1,66	3,91
S-1(b)	126	437,9	160	40,1	39,85	1,661	3,91
S-1(c)	126	432,3	160	39,55	39,85	1,512	3,61
S-2(a)	120	438,5	159,5	39,45	39,75	1,56	3,75
S-2(b)	120	433,6	159,5	39,3	39,8	1,889	4,55
S-2(c)	120	439,4	159,5	39,65	39,8	2,012	4,81
Μέσος όρος						1,72	4,09
Τυπική Απόκλιση						0,19	0,48

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης

Πείραμα Θλίψης							
Δοκίμιο	Ηλικία δοκιμίων (ημέρες)	Βάρος(g)	Μήκος(mm)	Πλάτος(mm)	Ύψος(mm)	Μέγιστο Φορτίο F (kN)	Τάση Αστοχίας (MPa)
S-1(a)	126	434,6	160	40,4	39,7	23,8	14,73
S-1(b)	126	437,9	160	40,1	39,85	28,4	17,71
S-1(c)	126	432,3	160	39,55	39,85	26,2	16,56
S-2(a)	120	438,5	159,5	39,45	39,75	38,1	24,14
S-2(b)	120	433,6	159,5	39,3	39,8	37,3	23,73
S-2(c)	120	439,4	159,5	39,65	39,8	40,3	25,41
Μέσος όρος						32,35	20,38
Τυπική Απόκλιση						7,03	4,57

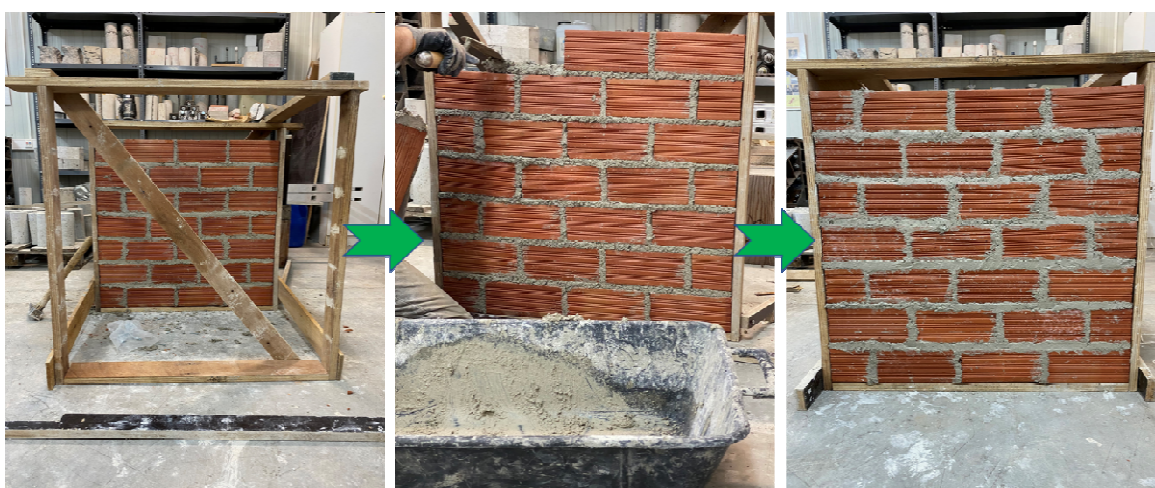


Σχήμα 3.9: Αστοχία δοκιμίου σε πείραμα κάμψης τριών σημείων.

3.4. Διαδικασία κατασκευής τοιχοσωμάτων

Σε αυτήν την υποενότητα αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των εννέα δοκιμίων τοιχοποιίας. Το πρώτο βήμα ήταν η κατασκευή ξύλινων καλουπιών, μέσα στα οποία πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των δοκιμίων όπως αναλύεται στις εικόνες του **Σχήματος 3.10**. Τα καλούπια είχαν τετραγωνική μορφή και ήταν άκαμπτα με σκοπό να μην παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής των τοιχοπληρώσεων, ενώ τοποθετούνταν σε κατακόρυφη θέση έτσι ώστε η επιφάνεια των δοκιμίων να είναι επίπεδη και να μην έχει αποκλίσεις.

Το επόμενο βήμα, ήταν η διαβροχή 28 οπτόπλινθων για δέκα λεπτά σε κατάλληλο πλαστικό δοχείο με νερό, με την αφαίρεσή τους από αυτήν να πραγματοποιείται περίπου δέκα λεπτά πριν την εκκίνηση της κατασκευής των δοκιμίων. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε ώστε να μην απορροφηθεί το νερό του κονιάματος από τους οπτόπλινθους κατά την κατασκευή των δοκιμίων, λόγω του μεγάλου πορώδους που διαθέτουν. Οι τελικές διαστάσεις των τοιχοπληρώσεων ήταν περίπου 700mm x 700mm με πάχος κονιάματος αρμών περίπου 10 mm στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Μετά το πέρας της κατασκευής των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η συντήρησή τους με συνεχή διαβροχή για να παραμένουν υγρές οι επιφάνειές τους για επτά ημέρες με σκοπό να έχουν παραμένουσα υγρασία οι επιφάνειές τους και να μην επηρεαστούν οι μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος. Μετά από μία εβδομάδα τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια.

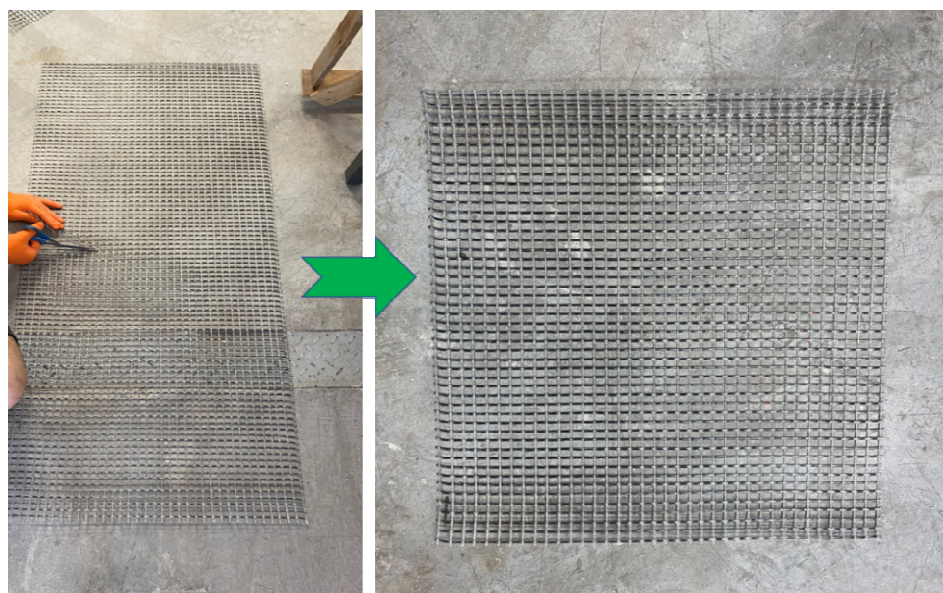


Σχήμα 3.10: Διαδικασία κατασκευής τοιχοπλήρωσης

3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκιμίων

3.5.1. Προετοιμασία ινοπλεγμάτων για ενίσχυση

Πριν την έναρξη της διαδικασίας της ενίσχυσης, ήταν απαραίτητη εκτέλεση μιας σειράς προεργασιών στις τοιχοπληρώσεις και στα ινοπλέγματα. Το πρώτο βήμα, ήταν το κόψιμο των ινοπλεγμάτων στις κατάλληλες διαστάσεις και ο καθαρισμός τους όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.11**, καθώς είχαν παραληφθεί σε ρολό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, κόπηκαν συνολικά δώδεκα κομμάτια ινοπλέγματος, έξι υάλου και έξι βασάλτη, διαστάσεων 69,5cm x 69,5cm. Τα κομμάτια ήταν περίπου 5 χιλιοστά μικρότερα από τις τοιχοπληρώσεις, καθώς ήταν σημαντικό να μην προεξέχουν από αυτές, για να μην υπάρξει αποκόλληση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 3.11: Προετοιμασία ινοπλεγμάτων

3.5.2. Προετοιμασία δοκιμίων για ενίσχυση

Η προετοιμασία των δοκιμίων, αλλά και ο τρόπος ενίσχυσής τους ήταν ίδια σε όλες τις τοιχοπληρώσεις. Δύο μήνες μετά το πέρας της κατασκευής τους, κι αφού είχε πραγματοποιηθεί η διαβροχή τους και η αφαίρεσή τους από τα καλούπια, τα δοκίμια ήταν έτοιμα για ενίσχυση, οπότε ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναγράφεται παρακάτω:

- Αρχικά, ήταν απαραίτητη η προετοιμασία της επιφάνειας στην οποία εφαρμόστηκε η ενίσχυση. Αυτό περιλάμβανε την όσο το δυνατόν καλύτερη λείανση της επιφάνειας, για την καλύτερη εφαρμογή της ενίσχυσης.
- Στην πορεία πραγματοποιήθηκε μια τελευταία διαβροχή της τοιχοπλήρωσης, περίπου μισή ώρα πριν ξεκινήσει η διαδικασία της ενίσχυσης για να υπάρχει η απαραίτητα υγρασία.
- Τέλος, ακολούθησε η παρασκευή ποσότητας κονιάματος, το οποίο αποτελούνταν από τσιμέντο και νερό. Οι ποσότητες των συστατικών που χρησιμοποιούνταν ήταν συγκεκριμένες και το ζύγισμά τους γινόταν με τη ζυγαριά ακριβείας που διέθετε το εργαστήριο, ενώ η ανάμειξή τους γινόταν με ηλεκτρικό αναδευτήρα.

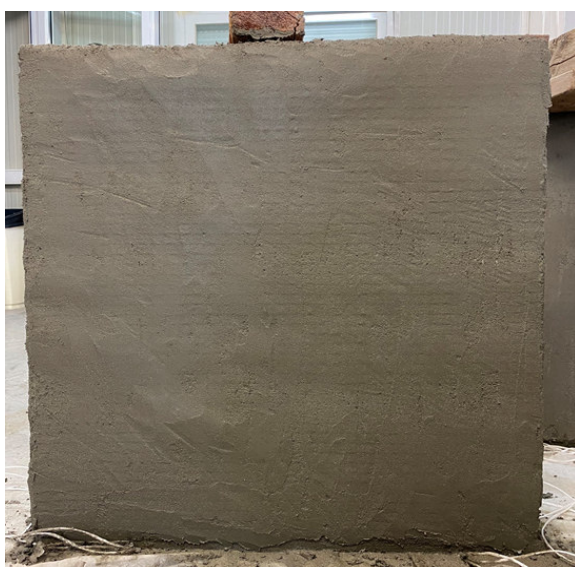
3.5.3. Ενίσχυση τοιχοσωμάτων με IAM

Μετά την προετοιμασία που αναφέρθηκε παραπάνω, έλαβε χώρα η ενίσχυση των δοκιμίων στα οποία τοποθετήθηκε ενίσχυση με δύο στρώσεις ινοπλέγματος στη μία πλευρά. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η επάλειψη μιας στρώσης κονιάματος και η τοποθέτηση της πρώτης στρώσης ινοπλέγματος. Για να εισχωρήσει το κονίαμα στους βρόγχους, ασκούνταν ελαφριά πίεση με το χέρι στο ινόπλεγμα. Με τον ίδιο τρόπο, πραγματοποιούνταν η προσθήκη της δεύτερης στρώσης κονιάματος και ινοπλέγματος, ενώ για το τελικό στάδιο της διαδικασίας γινόταν επάλειψη μιας τελευταίας στρώσης κονιάματος, η οποία αποτελούσε την επικάλυψη της ενίσχυσης. Τα τελικά πάχη των ενισχύσεων κυμαίνονταν από 3mm - 5mm. Στις εικόνες του **Σχήματος 3.12** παρουσιάζεται η διαδικασία της ενίσχυσης ενώ στο **Σχήμα 3.13** φαίνεται το δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της. Αφού ολοκληρώθηκε η ενίσχυση στα δοκίμια, πραγματοποιήθηκε η συνεχής διαβροχή της επιφάνειας για επτά ημέρες, έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν ρηγματώσεις λόγω συστολής ξήρανσης του κονιάματος. Σημαντικοί παράγοντες στη διαδικασία ενίσχυσης ήταν οι εξής:

- Η γρήγορη εκτέλεσή της και η σωστή σύσταση του κονιάματος, για να επιτευχθεί η καλύτερη διείσδυση του στους βρόχους του ινοπλέγματος, καθώς η εργασιμότητά του ήταν σχετικά μικρή,
- Η προσθήκη λεπτών στρώσεων κονιάματος
- Η πλήρης επικάλυψη του ινοπλέγματος με την τελευταία στρώση κονιάματος,
- Η όσο το δυνατόν καλύτερη εξομάλυνση της τελικής επιφάνειας της ενίσχυσης



Σχήμα 3.12: Διαδικασία ενίσχυσης

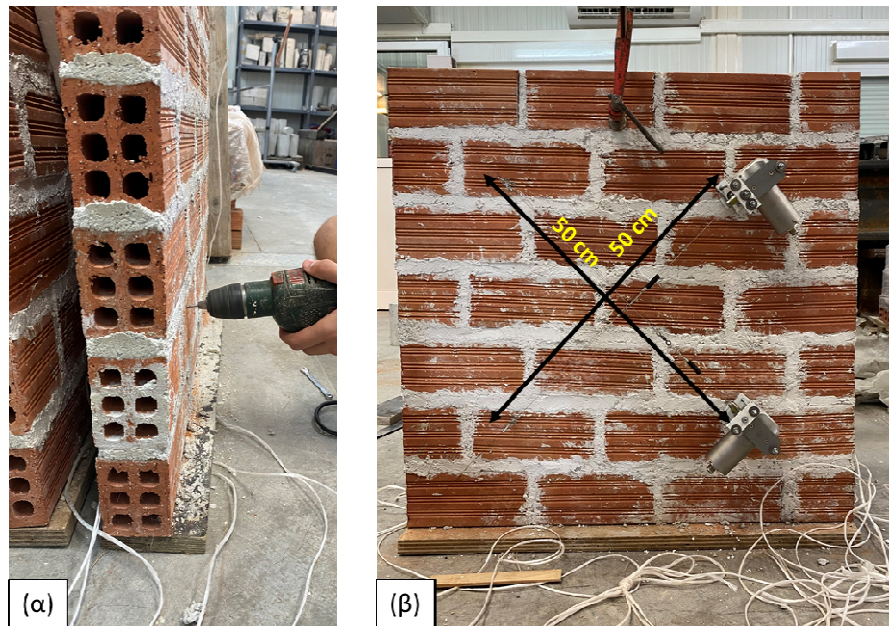


Σχήμα 3.13: Τελικό αποτέλεσμα ενισχυμένου τοιχοσώματος

3.6 Πειραματική Διάταξη

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τρεις μήνες μετά την ολοκλήρωση των ενισχύσεων. Το πρώτο βήμα, ήταν η τοποθέτηση τεσσάρων ντιζών στο κάθε τοιχώσωμα. Για να γίνει αυτό, χαράχθηκαν πρώτα οι δυο διαγώνιοι του κάθε δοκιμίου (η κύρια και η δευτερεύουσα) και μέσω αυτών το κέντρο του. Η κύρια διαγώνιος ήταν εκείνη που βρισκόταν στην κατακόρυφη διεύθυνση κατά τη διαδικασία του πειράματος και η δευτερεύουσα χαράχθηκε με βάση την κύρια και κάθετα σε αυτήν. Έπειτα, σημαδεύτηκαν τα τέσσερα σημεία στα οποία εφαρμόστηκαν στη συνέχεια οι ντίζες, σε απόσταση 250 mm από το κέντρο του δοκιμίου, πάνω στις διαγώνιους. Στη συνέχεια ανοίχθηκαν οπές σε αυτά τα σημεία και τοποθετήθηκαν οι ντίζες με διάμετρο 3 mm όπως φαίνεται στην εικόνα (α) του **Σχήματος 3.14**, οι οποίες είχαν προεξοχή 25 mm. Η διαδικασία αυτή, πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε πάνω στις ντίζες να τοποθετηθούν οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή.

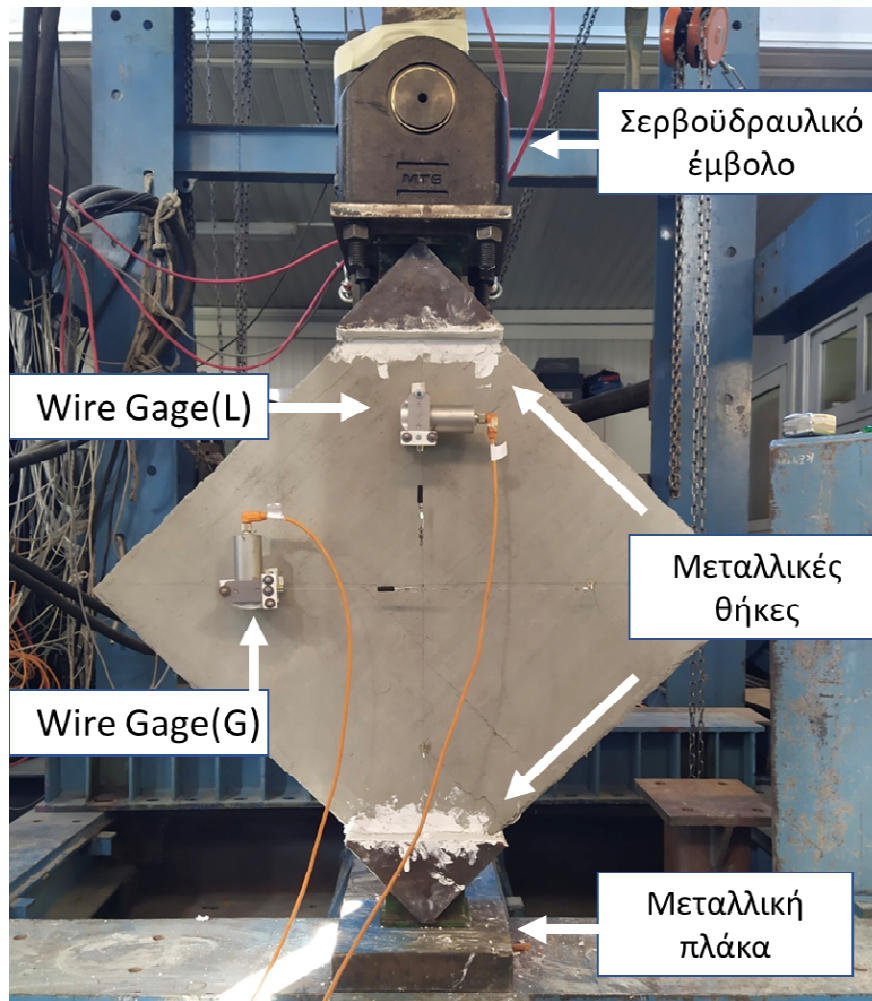
Το δεύτερο βήμα ήταν η τοποθέτηση των δύο wire gages στο δοκίμιο όπως φαίνεται στη εικόνα (β) του **Σχήματος 3.14**, τα οποία μετρούσαν την οριζόντια και την κατακόρυφη μετακίνηση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το wire gage(L) τοποθετήθηκε στην κύρια διαγώνιο και μετρούσε την κατακόρυφη μετακίνηση και το wire gage(G) στην δευτερεύουσα, και μετρούσε την οριζόντια μετακίνηση. Τα δεδομένα των wire gages κατά τη διάρκεια του πειράματος αποθηκεύονταν αυτόματα στον υπολογιστή. Ήταν σημαντικό οι μετρητές να μην έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η καταγραφή των μετρήσεων. Η ακριβής τοποθέτησή τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.14: (α) Άνοιγμα οπών για την εφαρμογή των ντιζών (β) Θέση τοποθέτησης ντιζών και wire gage

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υδραυλικού εμβόλου MST 250 kN το οποίο βρίσκεται στο εργαστήριο. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο μεταλλικό πλαίσιο διαγώνια, ανάμεσα από το σερβοϋδραυλικό έμβολο το οποίο μετακινείται και ασκεί το φορτίο, και τη μεταλλική πλάκα η οποία είναι πακτωμένη στη βάση του πλαισίου και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος (**Σχήμα 3.15**). Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν δύο μεταλλικές θήκες στο δοκίμιο, στις γωνίες της κύριας διαγωνίου, οι οποίες στερεώθηκαν με τη βοήθεια γύψου. Σημαντικός παράγοντας ήταν η επιφάνεια των μεταλλικών θηκών να βρίσκεται παράλληλα στο έμβολο, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια του πειράματος να αποφευχθούν οι συγκεντρωμένες τάσεις, που οδηγούν στην φαινομενική μείωση των αντοχών. Επίσης αναγκαία για τον ίδιο λόγο, ήταν η σωστή τοποθέτηση του δοκίμιου, με την κύρια διαγώνιο να βρίσκεται κατακόρυφα και την επιφάνεια της τοιχοπλήρωσης να βρίσκεται κάθετα στο έμβολο. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση αεροστάθμης. Αφού πραγματοποιήθηκε η στερεοποίηση του γύψου μετά από διάστημα μίας ημέρας και έγινε επαλήθευση ότι το δοκίμιο παρέμεινε στην επιθυμητή θέση όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.15**, η διαδικασία του πειράματος μπορούσε να ξεκινήσει. Ο ρυθμός επιβολής μετακινήσεων του εμβόλου ήταν 0,01 mm/sec και τα δεδομένα που κατέγραφε ο υπολογιστής ήταν τέσσερα:

- Το φορτίο επιβολής, σε kN
- Η μετακίνηση του εμβόλου, σε χιλιοστά
- Οι μετακινήσεις του κατακόρυφου wire gage, σε χιλιοστά
- Οι μετακινήσεις του οριζόντιου wire gage, σε χιλιοστά



Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη μονοαξονικής θλίψης

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, οι ρηγματώσεις που εμφανίστηκαν στα δοκίμια χαράχθηκαν με μαύρο χρώμα, προκειμένου να είναι ευδιάκριτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Γενικά

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν μαζί με τον σχολιασμό τους, συνοδεία φωτογραφικού υλικού. Στόχοι των πειραμάτων ήταν η παρατήρηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων και των τύπων αστοχίας τους και πως αυτά επηρεάζονται από την ύπαρξη ενίσχυσης με ΙΑΜ και από τα διαφορετικά είδη ινοπλεγμάτων που χρησιμοποιούνται. Τα κύρια μεγέθη που μελετήθηκαν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν τα φορτία αστοχίας και ρηγμάτωσης, οι τάσεις αστοχίας και ρηγμάτωσης και οι εφελκυστικές τάσεις του κάθε δοκιμίου. Τα μεγέθη ρηγμάτωσης προκύπτουν τη χρονική στιγμή που εμφανίζονται οι πρώτες ρηγματώσεις στο δοκίμιο. Στον **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του κάθε πειράματος, ενώ στην πορεία θα γίνει ο αναλυτικός σχολιασμός τους. Σημειώνεται πως η διατμητική τάση προκύπτει από την **Σχέση 4.1**.

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

Όπου:

P: φορτίο επιβολής, σε kN

b: μήκος δοκιμίου, σε χιλιοστά

d: πάχος δοκιμίου, σε χιλιοστά

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα πειραμάτων και μορφές αστοχίας

Δοκίμιο	Φορτίο (kN)		Διατμητική Τάση (Mpa)		Μορφή Αστοχίας
	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	
DT_WALL_CON_1	49,49	51,39	0,91	0,94	Διαγώνιος διαχωρισμός λόγω ρηγμάτωσης του κονιάματος αρμών.
DT_WALL_CON_2	33,69	45,45	0,62	0,83	Διαγώνιος διαχωρισμός λόγω ρηγμάτωσης του κονιάματος αρμών.
DT_WALL_CON_3	42,81	61,52	0,79	1,13	Διαγώνιος διαχωρισμός λόγω ρηγμάτωσης του κονιάματος αρμών.
DT_WALL_B2_1	66,99	70,2	1,23	1,29	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών και θραύση οπτόπλινθων
DT_WALL_B2_2	69,63	91,9	1,28	1,68	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, εκτός επιπέδου κύρτωση του δοκιμίου
DT_WALL_B2_3	94,02	97,77	1,73	1,8	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών και θραύση οπτόπλινθων, εκτός επιπέδου κύρτωση του δοκιμίου
DT_WALL_G2_1	59,61	80,92	1,09	1,49	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, εκτός επιπέδου κύρτωση του δοκιμίου
DT_WALL_G2_2	73,79	85,96	1,36	1,58	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών και θραύση οπτόπλινθων, εκτός επιπέδου κύρτωση του δοκιμίου
DT_WALL_G2_3	82,14	85,31	1,51	1,57	Ρηγμάτωση του κονιάματος αρμών, εκτός επιπέδου κύρτωση του δοκιμίου

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων των δοκιμών

4.2.1 Δοκίμια αναφοράς

- **DT WALL CON1**

Το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτέλεσε το πρώτο δοκίμιο ελέγχου που δοκιμάστηκε χωρίς να έχει ενισχυθεί. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 51,39 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 2,39 mm, ενώ η τάση αστοχίας η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 0,9438 MPa. Η πρώτη ρηγμάτωση εμφανίστηκε παράλληλα στους αρμούς τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ισούταν με 49,49 kN και η αντίστοιχη τάση ήταν ίση με 0,9088 MPa. Η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 2,04 mm. Αφού εμφανίστηκε η πρώτη ρηγμάτωση, ακολούθησε μια μικρή πτώση του φορτίου για μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να φτάσει τα 43,02 kN και στη συνέχεια παρατηρήθηκε η σταδιακή αύξησή του. Το πείραμα σταμάτησε όταν σημειώθηκε διατμητική αστοχία του δοκιμίου λόγω θραύσης του κονιάματος των αρμών, με το τοιχώσωμα να χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Τότε, η καταγραφή των μετακινήσεων σταμάτησε καθώς οι ηλεκτρονικοί μετρητές αποκολλήθηκαν από τις ντίζες. Η αστοχία του δοκιμίου επήλθε σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά τη διαρροή του, με συνέπεια την απότομη πτώση του φορτίου που ασκούσαν.

- **DT WALL CON2**

Το δοκίμιο DT_WALL_CON2 αποτέλεσε το δεύτερο δοκίμιο αναφοράς που δοκιμάστηκε. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 45,45 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 2,41 mm, ενώ η τάση αστοχίας η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 0,8312 MPa. Η πρώτη ρηγμάτωση εμφανίστηκε παράλληλα στους αρμούς τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ισούταν με 33,69 kN και η αντίστοιχη τάση ήταν ίση με 0,6187 MPa. Η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 1,47 mm. Αφού εμφανίστηκε η πρώτη ρηγμάτωση, ακολούθησε μια μικρή πτώση του φορτίου για μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να φτάσει τα 31,95 kN και στη συνέχεια παρατηρήθηκε η σταδιακή αύξησή του. Το πείραμα σταμάτησε όταν σημειώθηκε

διατμητική αστοχία του δοκιμίου λόγω θραύσης του κονιάματος των αρμών, με το τοιχόσωμα να χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Η αστοχία του δοκιμίου επήλθε σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά τη διαρροή του, με συνέπεια την απότομη πτώση του φορτίου που ασκούταν.

- **DT WALL CON3**

Το δοκίμιο DT_WALL_CON3 αποτέλεσε το τελευταίο δοκίμιο αναφοράς που δοκιμάστηκε. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 61,52 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 2,33 mm, ενώ η τάση αστοχίας η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,1298 MPa. Η πρώτη ρηγμάτωση εμφανίστηκε παράλληλα στους αρμούς τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ισούταν με 42,81 kN και η αντίστοιχη τάση ήταν ίση με 0,7862 MPa. Η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 1,42 mm. Αφού εμφανίστηκε η πρώτη ρηγμάτωση, ακολούθησε μια μικρή πτώση του φορτίου για μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να φτάσει τα 39,62 kN και στη συνέχεια παρατηρήθηκε η σταδιακή αύξησή του. Το πείραμα σταμάτησε όταν σημειώθηκε διατμητική αστοχία του δοκιμίου λόγω θραύσης του κονιάματος των αρμών, με το τοιχόσωμα να χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Η αστοχία του δοκιμίου επήλθε σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά τη διαρροή του, με συνέπεια την απότομη πτώση του φορτίου που ασκούταν.

Η μορφή αστοχίας των δοκιμών αναφοράς ήταν ψαθυρή κι απότομη και ήταν παρόμοια και στα τρία. Παρακάτω παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό πριν την έναρξη του πειράματος, καθώς και η τυπική μορφή αστοχίας των δοκιμών αναφοράς (**Σχήμα 4.1**). Επιπλέον, στα **Σχήματα 4.2** και **4.3** απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης και διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης των τριών πειραμάτων, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις.

Η διατμητική τάση που παρουσιάζεται στα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης προκύπτει από την **Σχέση 4.1** και η διατμητική παραμόρφωση από τη **Σχέση 4.2**

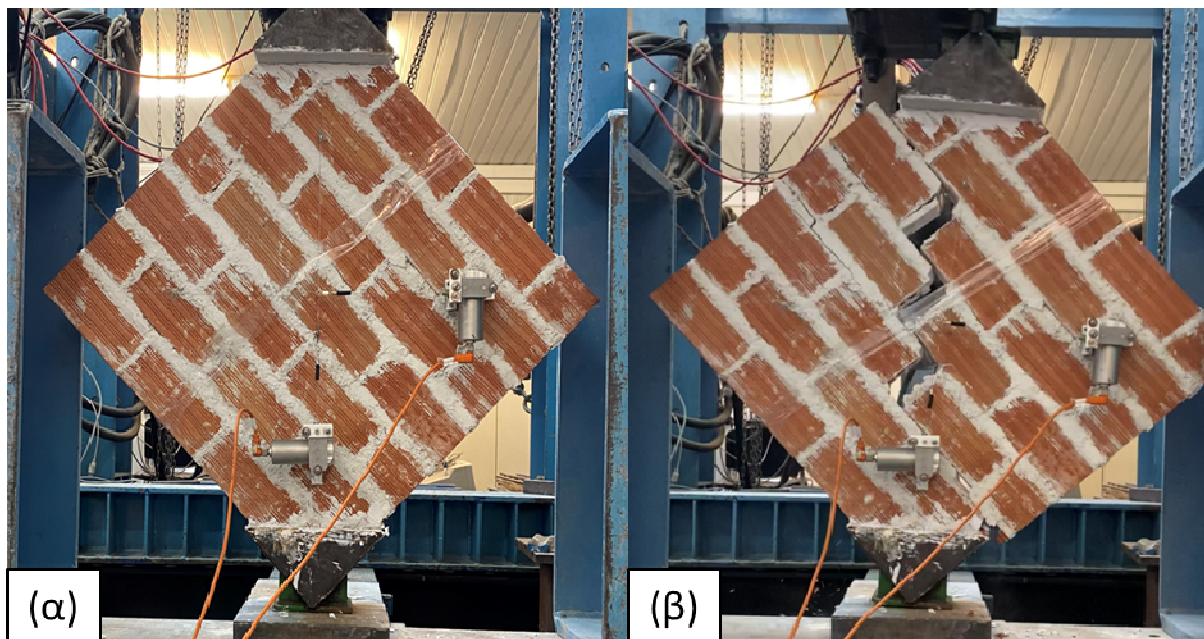
$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}, \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

Όπου:

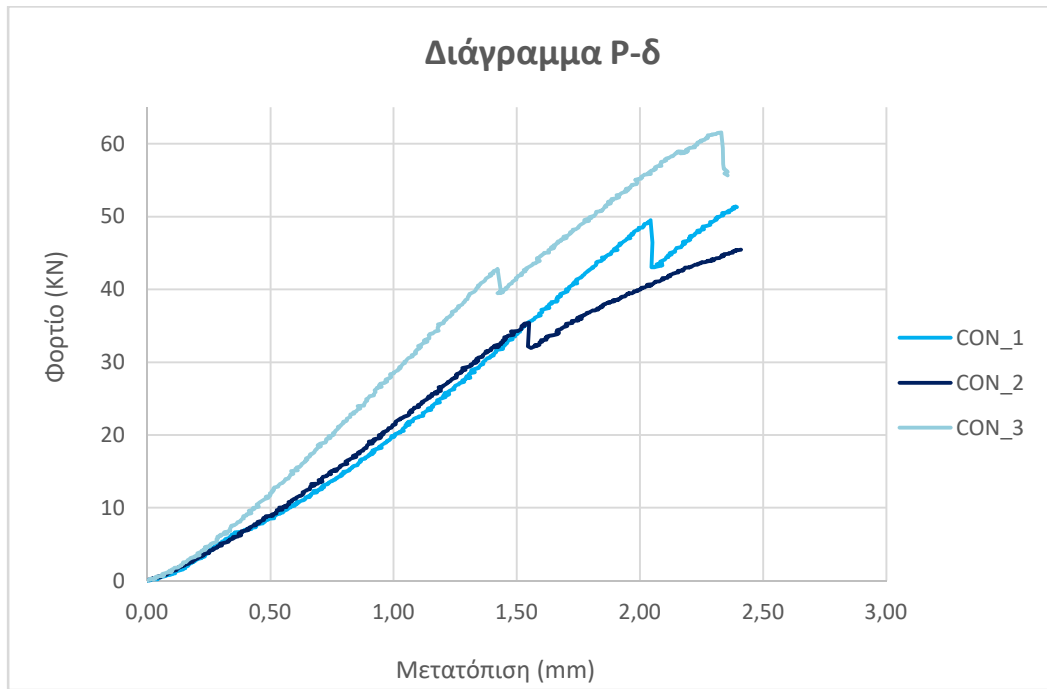
ΔV : παραμόρφωση του κατακόρυφου wire gage, σε χιλιοστά

ΔH : παραμόρφωση του οριζόντιου wire gage, σε χιλιοστά

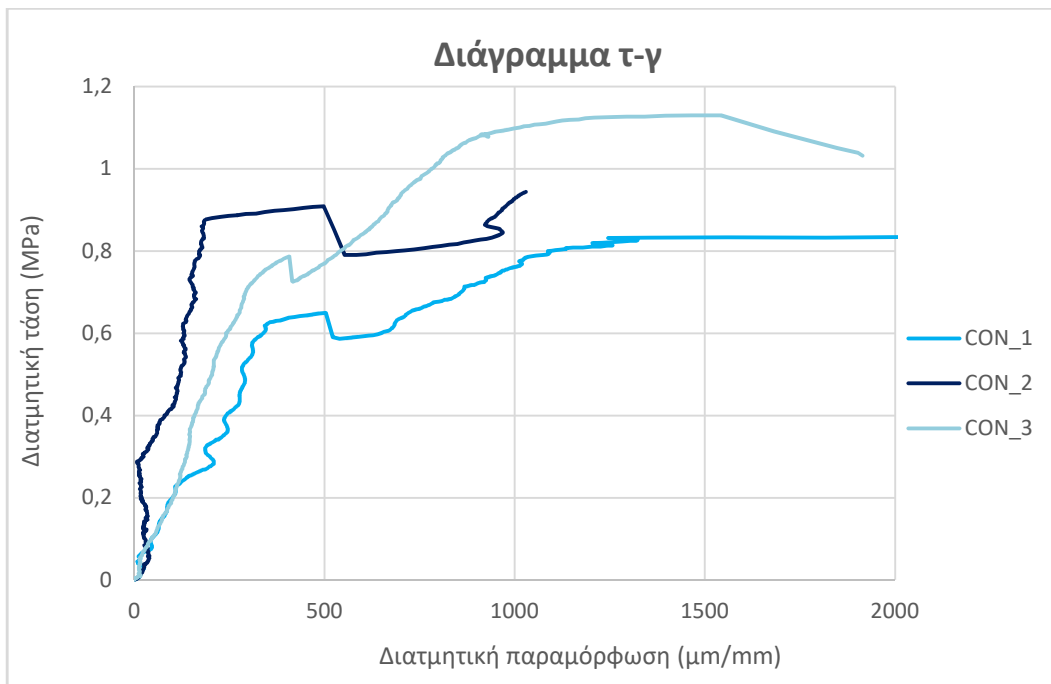
g : μήκος των wire gages σε χιλιοστά



Σχήμα 4.1: (α) Δοκίμιο αναφοράς πριν το πείραμα θλίψης (β) Τυπική μορφή αστοχίας δοκιμίου αναφοράς



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια αναφοράς

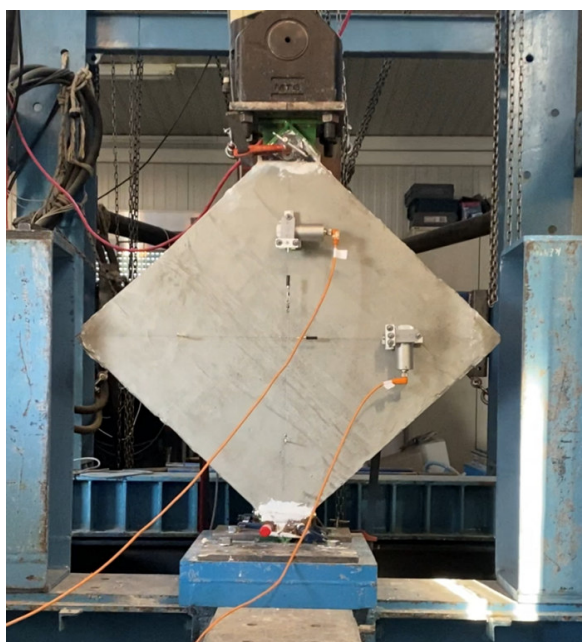


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια αναφοράς

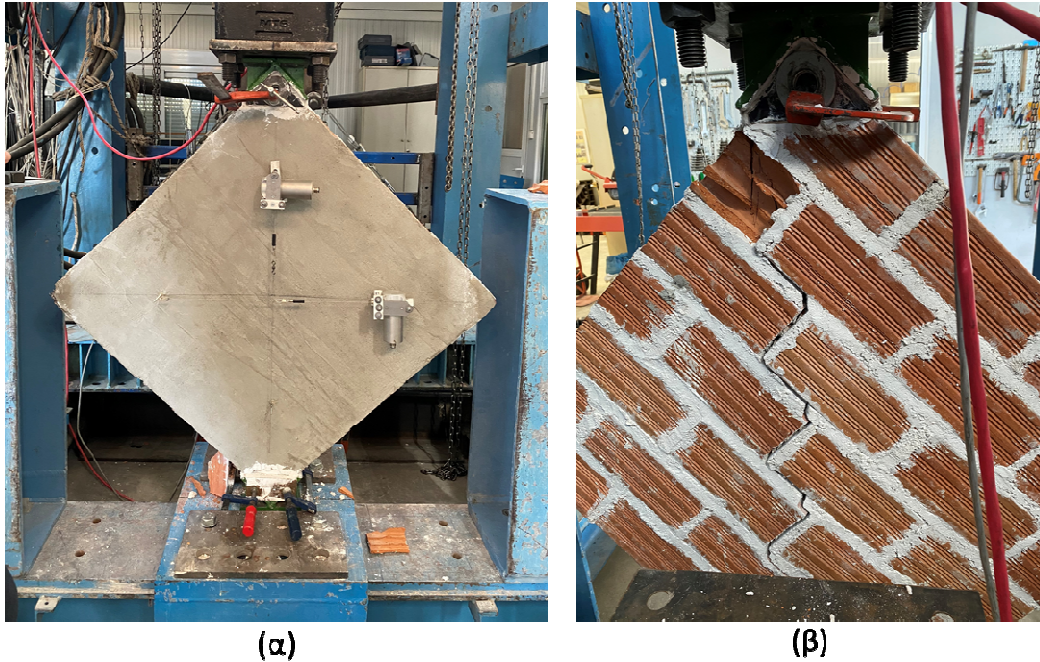
4.2.2 Δοκίμια ενισχυμένα με ίνες βασάλτη

- **DT WALL B2_1**

Το δοκίμιο DT_WALL_B2_1 αποτέλεσε το πρώτο ενισχυμένο δοκίμιο που δοκιμάστηκε. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 70,2 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 2,88 mm, ενώ η τάση αστοχίας η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,289 MPa. Οι πρώτες ρηγματώσεις εμφανίστηκαν στο τοιχώσωμα τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ήταν ίση με 66,99 kN και η αντίστοιχη τάση 1,23 MPa. Μετά τη διαρροή του δοκιμίου η θλιπτική δύναμη συνέχισε να αυξάνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει τα 70,2 kN. Τη στιγμή εκείνη αστόχησε το τοιχώσωμα λόγω θραύσης του κονιάματος κατακόρυφα του δοκιμίου στην μη ενισχυμένη πλευρά του. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως οι δύο οπτόπλινθοι στους οποίους τοποθετήθηκαν οι μεταλλικές θήκες αστόχησαν, κάτι που οφειλόταν σε συγκεντρωμένες τάσεις. Για να αποφευχθεί αυτό στην πορεία, οι μεταλλικές θήκες αντικαταστάθηκαν με νέες, οι οποίες είχαν μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής με τα δοκίμια. Το συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν το μοναδικό που δοκιμάστηκε με τις συγκεκριμένες μεταλλικές θήκες. Στο **Σχήμα 4.4** απεικονίζεται το δοκίμιο B2_1 πριν τη διεξαγωγή του πειράματος ενώ αξίζει να σημειωθεί πως στην ενίσχυση του δοκιμίου δεν εμφανίστηκαν ρηγματώσεις όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**, κάτι που φανερώνει την αποτελεσματικότητά της.



Σχήμα 4.4: Δοκίμιο B2_1 πριν τη διεξαγωγή του πειράματος.



Σχήμα 4.5: Αστοχία δοκιμίου μετά το πείραμα: α) στην ενισχυμένη πλευρά του β) στη μη ενισχυμένη πλευρά του

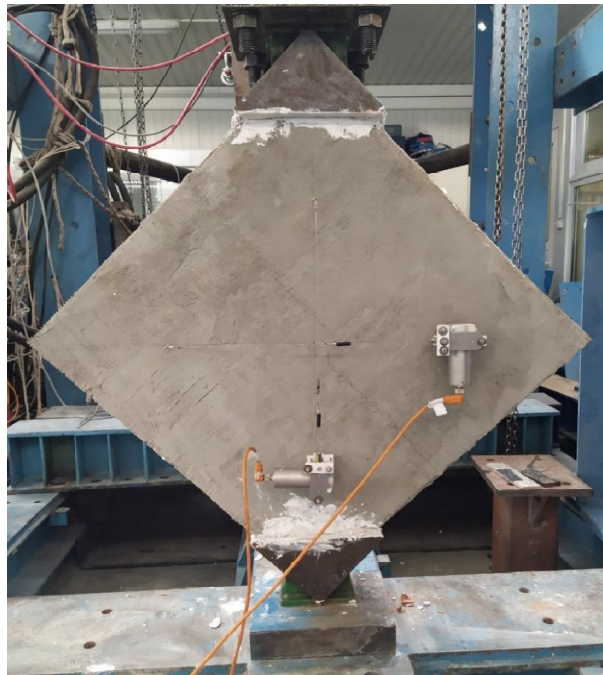
- **DT WALL B2 2**

Το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτέλεσε το δεύτερο δοκίμιο που δοκιμάστηκε με ενίσχυση βασάλτη. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 91,9 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 4,76 mm, ενώ η τάση αστοχίας, η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,682 MPa. Η στιγμή της διαρροής επήλθε όταν η θλιπτική δύναμη ισούταν με 69,63 kN και ξεκίνησαν να εμφανίζονται οι πρώτες ρηγματώσεις στο τοιχώσωμα. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε μια μικρή πτώση του φορτίου και το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι την αστοχία του δοκιμίου η οποία οφειλόταν στη θραύση του κονιάματος κατακόρυφα του τοιχοσώματος στην μη ενισχυμένη πλευρά του, αλλά και στον λυγισμό του δοκιμίου στην οριζόντια πλευρά του. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε μία μόνο ρηγμάτωση στην επιφάνεια της ενίσχυσης. Ωστόσο, τη χρονική στιγμή που η θλιπτική δύναμη ήταν ίση με 70,94 kN, οι ηλεκτρονικοί μετρητές σταμάτησαν να καταγράφουν μετακινήσεις, καθώς αποκολλήθηκαν από τις ντίζες, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί η απεικόνιση του διαγράμματος τάσης - παραμόρφωσης από εκείνη τη χρονική στιγμή και μετά.

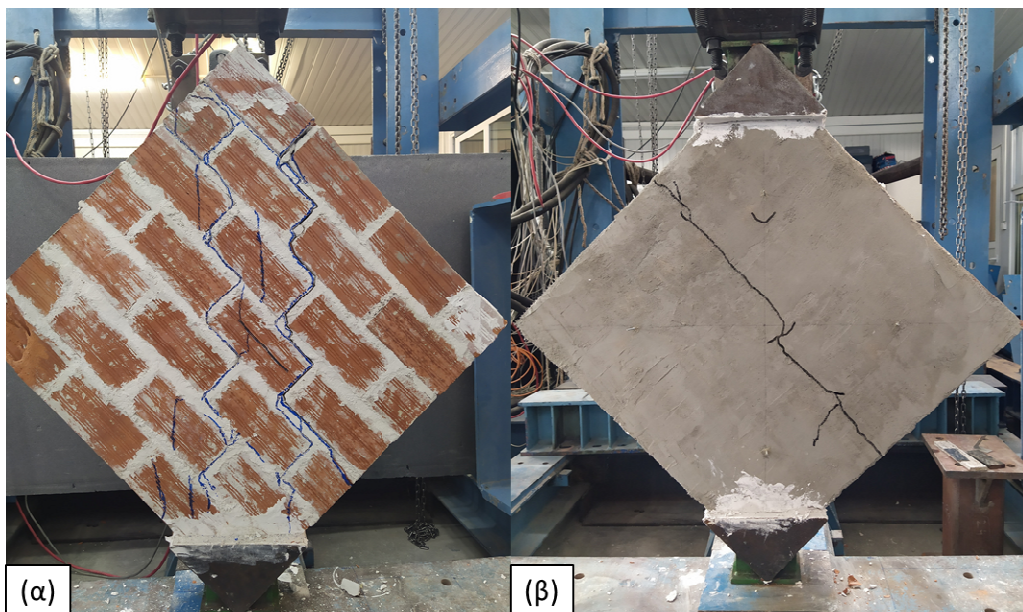
- **DT WALL B2 3**

Το τελευταίο δοκίμιο με ενίσχυση βασάλτη που δοκιμάστηκε, ήταν το DT_WALL_B2_3. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 97,77 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 4,61 mm, ενώ η τάση αστοχίας, η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,796 MPa. Οι πρώτες ρηγματώσεις εμφανίστηκαν κατακόρυφα του δοκιμίου τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ισούταν με 94,02kN και το πείραμα συνεχίστηκε χωρίς να παρατηρηθεί πτώση του φορτίου. Οι ρηγματώσεις συνέχισαν να αυξάνονται μέχρι να επέλθει η αστοχία του δοκιμίου στα 97,77 kN, η οποία οφειλόταν στη θραύση του κονιάματος και των οπτόπλινθων στη μη ενισχυμένη πλευρά, αλλά και στον λυγισμό του δοκιμίου στην οριζόντια πλευρά του. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μια ρηγμάτωση στην ενίσχυση, κατά μήκος του δοκιμίου.

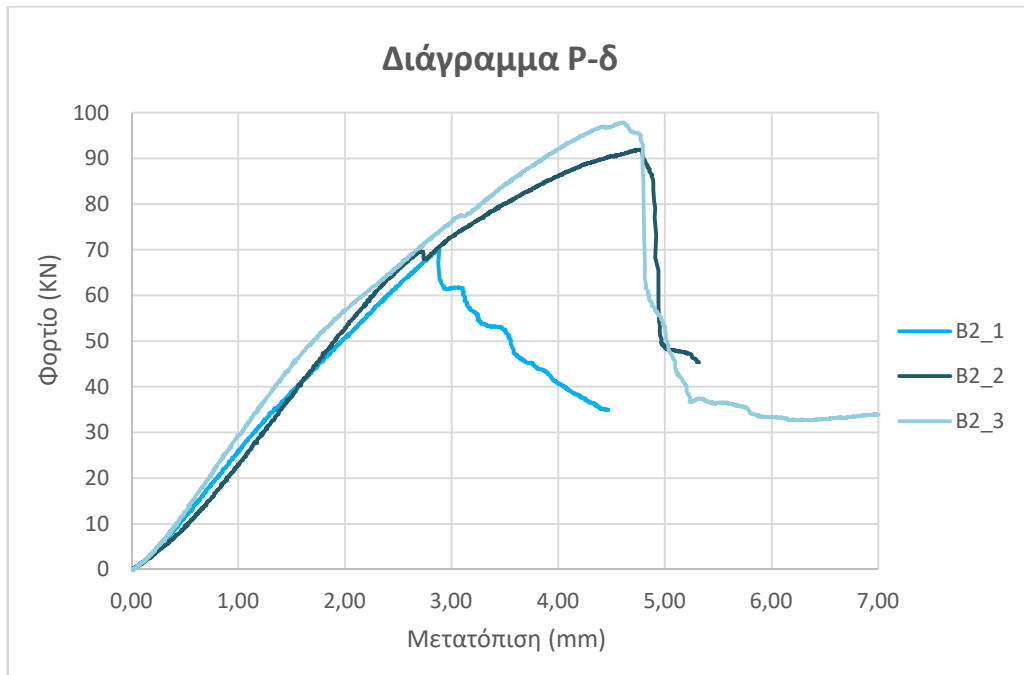
Οι αστοχίες των τριών δοκιμών ήταν παρόμοιες, ενώ τα αποτελέσματα των πειραμάτων των ενισχυμένων δοκιμών συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς, φανερώνουν την αποτελεσματικότητα των ενισχύσεων. Παρόλα αυτά, στα αποτελέσματα του δοκιμίου B2_1, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις συγκριτικά με τα δοκίμια B2_2 και B2_3, λόγω της διαφορετικής εκτέλεσής τους που αναφέρθηκε παραπάνω. Παρακάτω παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό πριν την έναρξη του πειράματος (**Σχήμα 4.6**), και η τυπική μορφή αστοχίας των ενισχυμένων δοκιμών B2_2 και B2_3 (**Σχήμα 4.7**) μετά τη διεξαγωγή του. Επιπλέον, στα **Σχήματα 4.8** και **4.9** απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης και διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης των τριών πειραμάτων, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις .



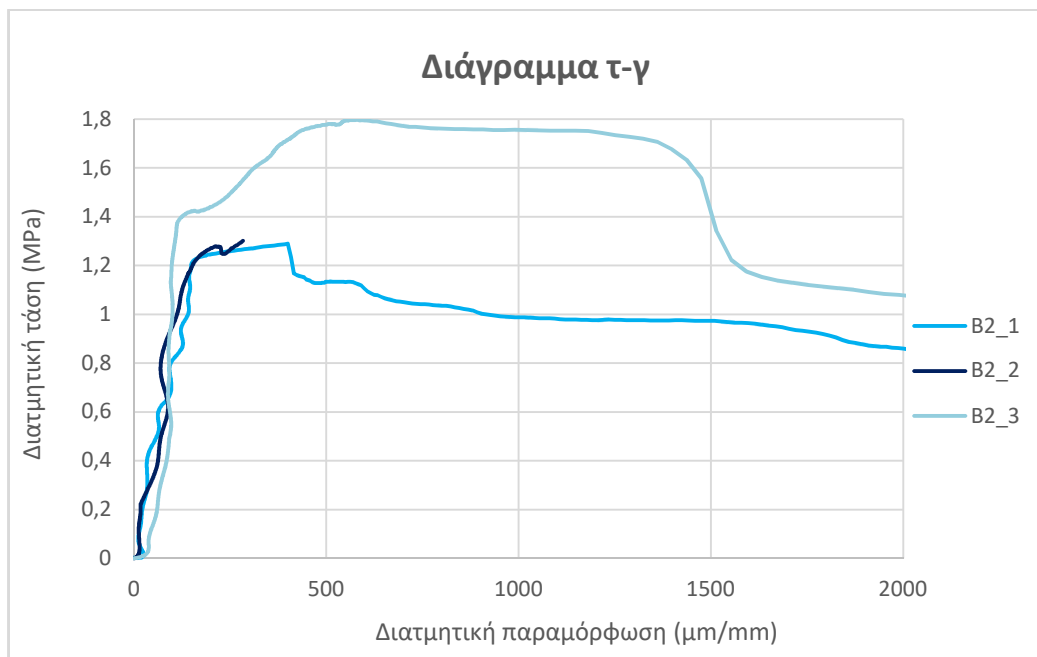
Σχήμα 4.6: Ενισχυμένο δοκίμιο πριν το πείραμα θλίψης



Σχήμα 4.7: (α) Αστοχία δοκιμίου B2_2 στη μη ενισχυμένη πλευρά (β) Αστοχία δοκιμίου B2_3 στην ενισχυμένη πλευρά



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα ενισχυμένα με ίνες βασάλτη δοκίμια



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα ενισχυμένα με ίνες βασάλτη δοκίμια

4.2.3 Δοκίμια ενισχυμένα με ίνες υάλου

- **DT WALL G2 1**

Το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτέλεσε το πρώτο το οποίο υποβλήθηκε σε πείραμα θλίψης με ενίσχυση υάλου. Η μέγιστη θλιπτική δύναμη που σημειώθηκε ανερχόταν στα 80,92 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 2,36 mm, ενώ η τάση αστοχίας, η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,486 MPa. Οι πρώτες ρηγματώσεις εμφανίστηκαν κατακόρυφα του δοκιμίου στους αρμούς, τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ισούταν με 59,61 kN και ακολούθησε μια μικρή πτώση του φορτίου. Η αντίστοιχη μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου τη στιγμή εκείνη ήταν 2,36 mm. Το πείραμα συνεχίστηκε με τις ρηγματώσεις να αυξάνονται στους αρμούς και στους οπτόπλινθους μέχρι να επέλθει η αστοχία του δοκιμίου στα 80,92 kN, η οποία οφειλόταν στη θραύση του κονιάματος στη μη ενισχυμένη πλευρά, αλλά και στον λυγισμό του δοκιμίου στην οριζόντια πλευρά του. Επιπλέον παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις στην ενισχυμένη πλευρά του δοκιμίου.

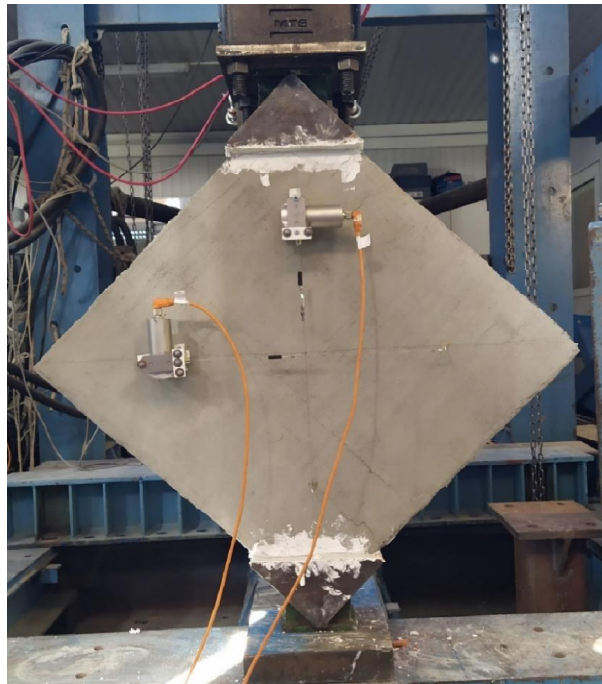
- **DT WALL G2 2**

Το δεύτερο δοκίμιο που δοκιμάστηκε με ίνες υάλου ήταν το DT_WALL_G2_2. Το μέγιστο θλιπτικό φορτίο που σημειώθηκε ανερχόταν στα 85,96 το οποίο κυμαίνεται περίπου στο ίδιο μέγιστο φορτίο του δοκιμίου DT_WALL_G2_1. Η αντίστοιχη μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου τη στιγμή της αστοχίας ήταν 4,22 mm ενώ η τάση αστοχίας, η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,579 MPa. Οι πρώτες ρηγματώσεις εμφανίστηκαν κατακόρυφα του δοκιμίου στους αρμούς, τη στιγμή που η θλιπτική δύναμη ισούταν με 73,79 kN, ακολούθησε μια μικρή πτώση του φορτίου μέχρι τα 72,58 kN, και στη συνέχεια παρατηρήθηκε η αύξηση του. Η αντίστοιχη μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου τη στιγμή εκείνη ήταν 3,11 mm. Το πείραμα συνεχίστηκε με τις ρηγματώσεις να αυξάνονται κατακόρυφα στους αρμούς και τους οπτόπλινθους ενώ στην πορεία παρατηρείται η αποκόλληση ενός οπτόπλινθου από το δοκίμιο. Λίγο αργότερα παρατηρούνται ρωγμές στην ενίσχυση του δοκιμίου, και στην πορεία επήλθε η αστοχία του η οποία οφειλόταν στη θραύση του κονιάματος και των οπτόπλινθων στη μη ενισχυμένη πλευρά, και στον λυγισμό του δοκιμίου στην οριζόντια πλευρά του.

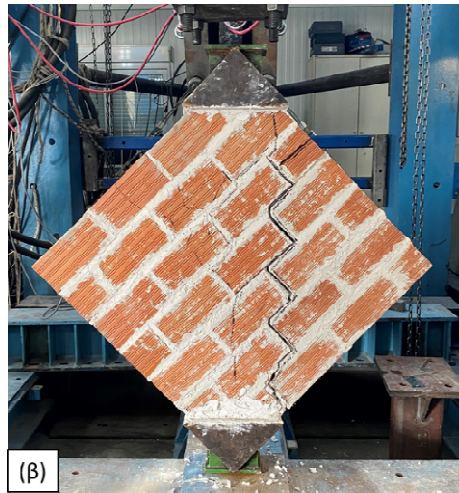
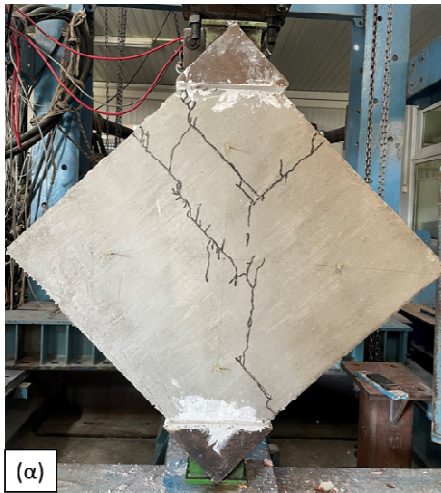
- **DT WALL G2 3**

Το DT_WALL_G2_3 αποτέλεσε το τελευταίο ενισχυμένο δοκίμιο που δοκιμάστηκε σε θλίψη. Το μέγιστο θλιπτικό φορτίο που σημειώθηκε ανερχόταν στα 85,31 το οποίο κυμαίνεται περίπου στο ίδιο μέγιστο φορτίο των υπόλοιπων δοκιμών με ενίσχυση υάλου. Η αντίστοιχη μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου τη στιγμή της αστοχίας ήταν 4,56 mm ενώ η τάση αστοχίας, η οποία σημειώθηκε τη στιγμή της μέγιστης θλιπτικής δύναμης, ισούταν με 1,567 MPa. Η στιγμή της διαρροής επήλθε όταν το φορτίο ήταν ίσο με 82,14 kN κι εκείνη τη στιγμή εμφανίστηκαν οι πρώτες ρηγματώσεις στο κονίαμα των αρμών. Στη συνέχεια, χωρίς να σημειωθεί σημαντική πτώση του φορτίου, το πείραμα συνεχίστηκε με τις ρηγματώσεις να αυξάνονται κυρίως κατακόρυφα του δοκιμίου ενώ λίγο πριν την αστοχία του, ξεκίνησαν να εμφανίζονται ρηγματώσεις στην ενισχυμένη πλευρά του, λόγω του λυγισμού του δοκιμίου. Στη συνέχεια, επήλθε η αστοχία του η οποία οφειλόταν στη θραύση του κονιάματος στη μη ενισχυμένη πλευρά, και στον λυγισμό του δοκιμίου στην οριζόντια πλευρά του.

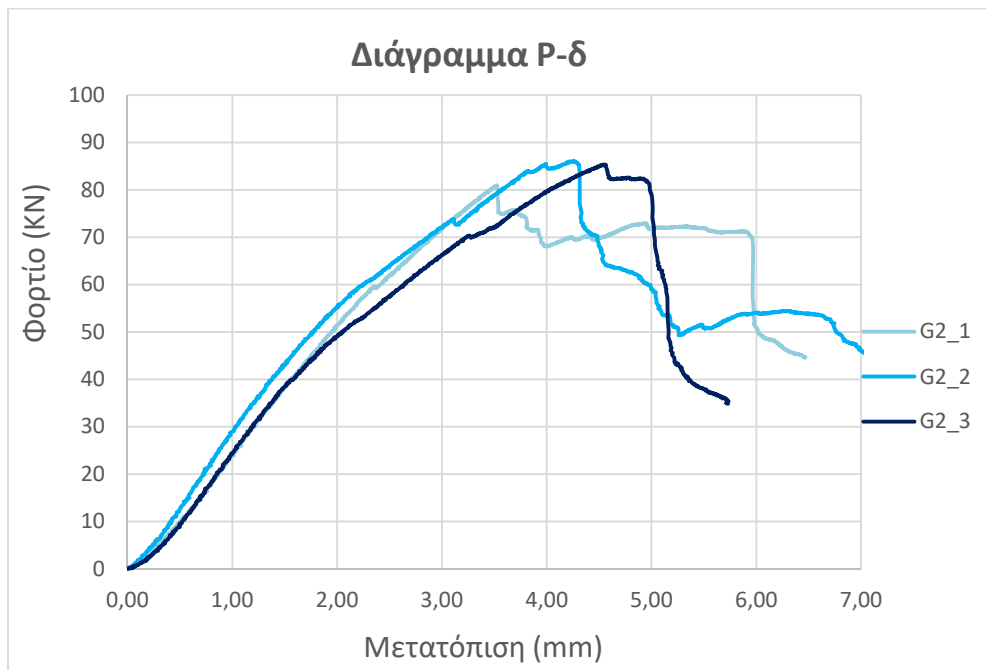
Οι αστοχίες των τριών δοκιμών ήταν παρόμοιες, ενώ τα αποτελέσματα των πειραμάτων των ενισχυμένων δοκιμών συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς, φανερώνουν την αποτελεσματικότητα των ενισχύσεων. Παρατηρείται πως τα δοκίμια ενισχυμένα με βασάλτη παρουσίασαν κατά μέσο όρο μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας συγκριτικά με τα δοκίμια ενισχυμένα με γυαλί. Παρακάτω παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό πριν την έναρξη του πειράματος (**Σχήμα 4.10**), και η τυπική μορφή αστοχίας των ενισχυμένων δοκιμών (**Σχήμα 4.11**) μετά τη διεξαγωγή του. Επιπλέον, στα **Σχήματα 4.12** και **4.13** απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης και διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης των τριών πειραμάτων, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



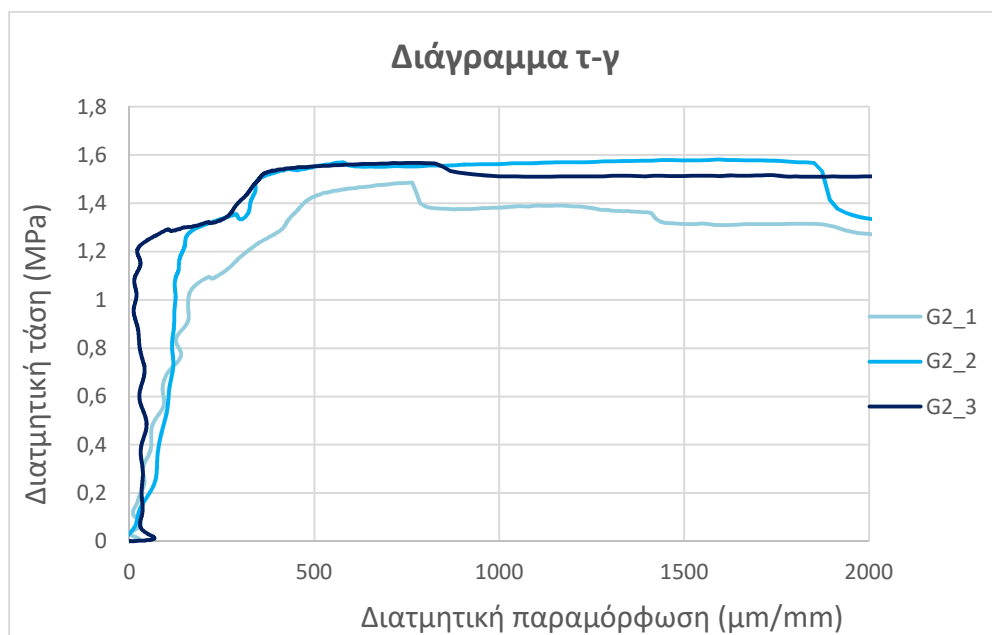
Σχήμα 4.10: Ενισχυμένο δοκίμιο πριν το πείραμα θλίψης.



Σχήμα 4.11: Τυπική μορφή αστοχίας δοκίμιου με ενίσχυση υάλου (α) Ενισχυμένη πλευρά δοκίμιου G2_2 (β) Μη ενισχυμένη πλευρά δοκίμιου G2_3 (γ) Πλάγια όψη δοκίμιου G2_1



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα ενισχυμένα με ίνες υάλου δοκίμια



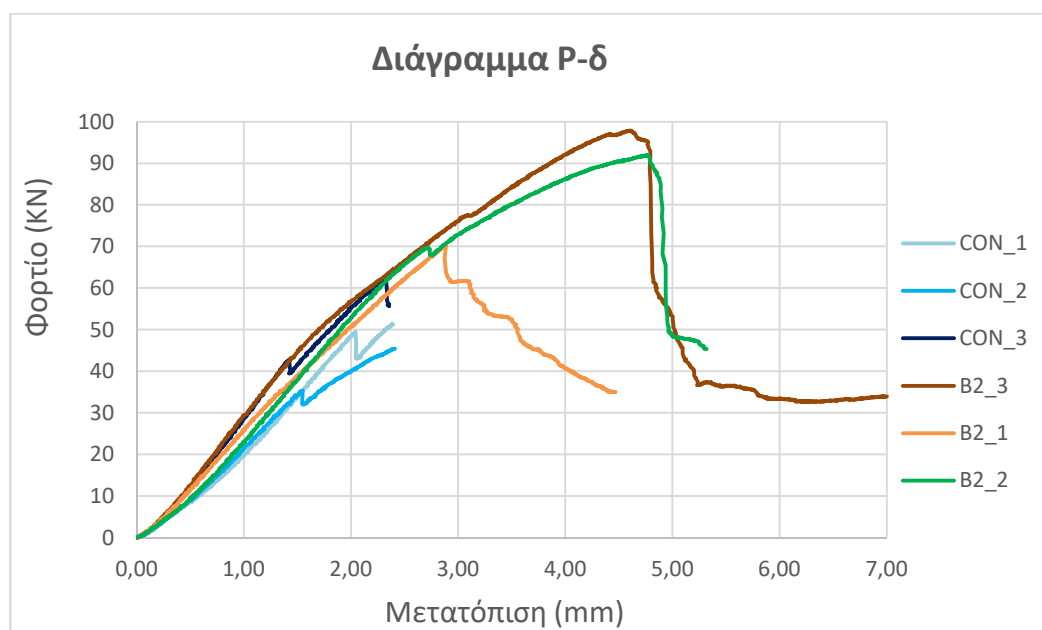
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα ενισχυμένα με ίνες υάλου δοκίμια

4.3 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων

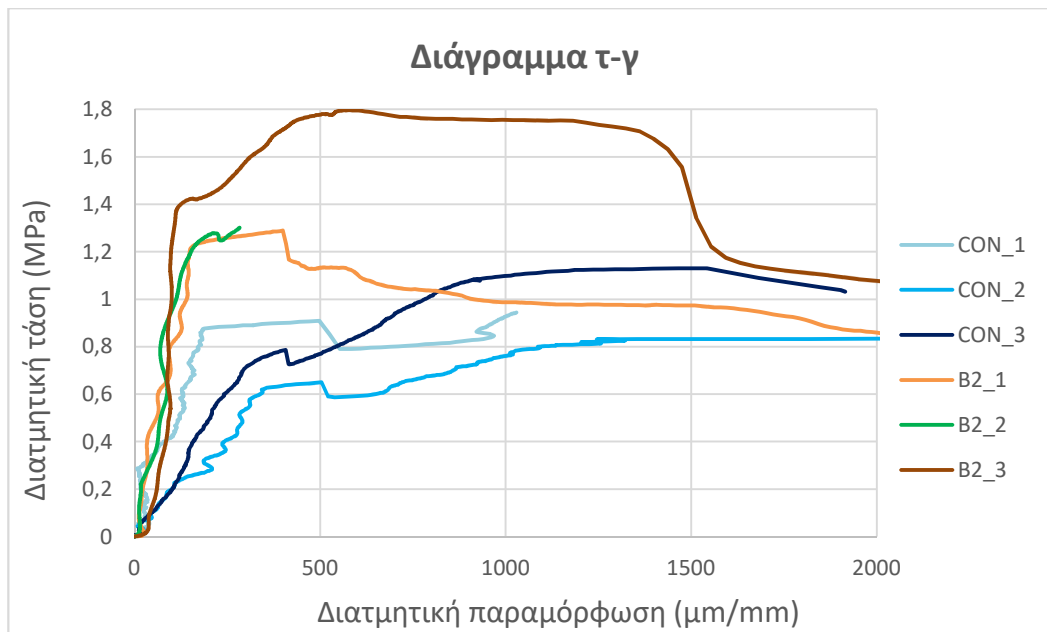
4.3.1 Σύγκριση δοκιμών: Αναφοράς - Ενισχυμένα με ίνες βασάλτη

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης και τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών σε ομάδες, έτσι ώστε να είναι εφικτή η σύγκρισή τους. Με αυτόν τον τρόπο, θα γίνει κατανοητή η επιρροή που είχε η ενίσχυση στα δοκίμια, αλλά και ο ρόλος που έπαιξαν τα διαφορετικά είδη ενίσχυσης.

Στα **Σχήματα 4.14** και **4.15** απεικονίζεται η πρώτη ομάδα διαγραμμάτων, η οποία αποτελεί τα δοκίμια αναφοράς συγκριτικά με τα δοκίμια ενισχυμένα με ίνες βασάλτη.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια αναφοράς

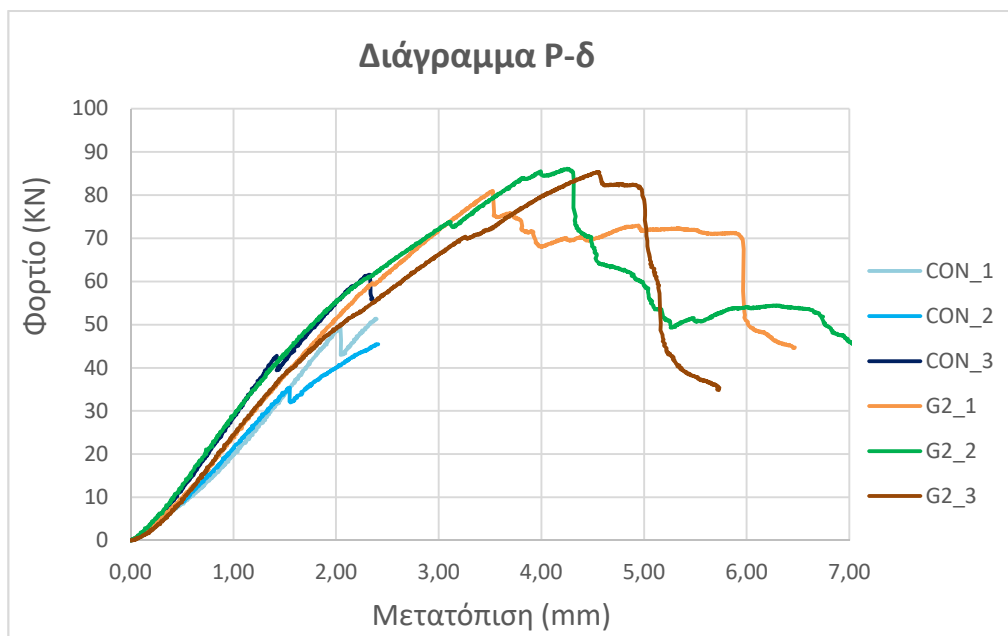


Σχήμα 4.15: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια αναφοράς

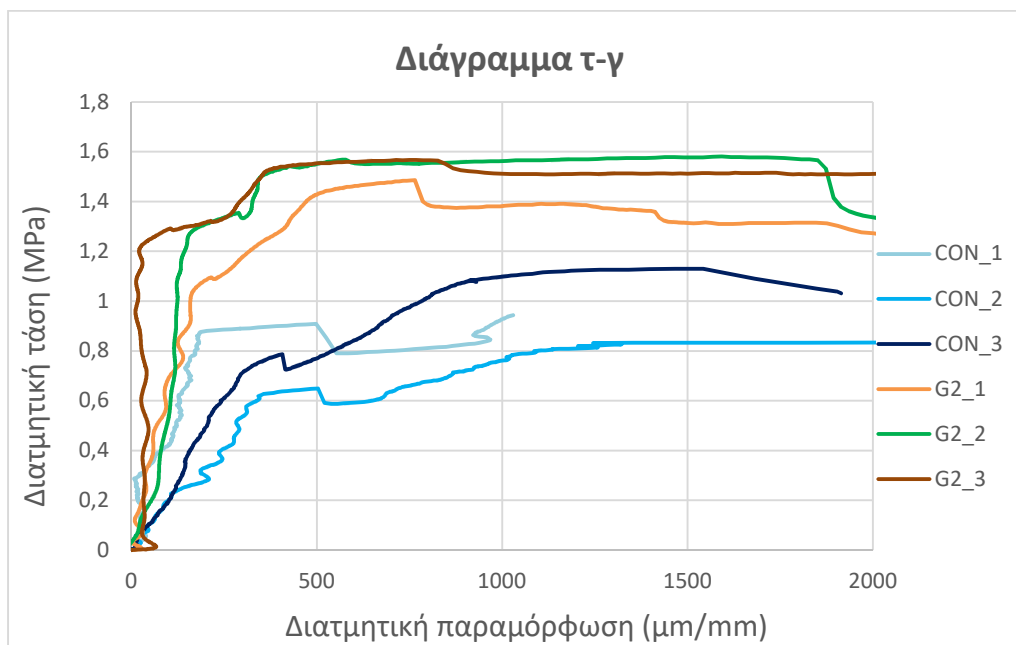
Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα, η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με ίνες βασάλτη είναι φανερή. Η αποδοτικότητα των ενισχυμένων δοκιμών σε σχέση με των δοκιμών αναφοράς αποδεικνύεται καλύτερη καθώς όπως φαίνεται στο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης, το μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας παρατηρείται στο δοκίμιο B2_3, ενώ κατά μέσο όρο, τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας από τα δοκίμια αναφοράς. Ομοίως, στο διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης, τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο δοκίμιο B2_3, ενώ στα αποτελέσματα των δοκιμών αναφοράς παρατηρείται μεγάλη απόκλιση συγκριτικά με τα ενισχυμένα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του δοκιμίου B2_2, είναι αδύνατο να συγκριθεί με τα υπόλοιπα, λόγω της έλλειψης δεδομένων από τη χρονική στιγμή που σταμάτησε ο υπολογιστής να καταγράφει παραμορφώσεις.

4.3.2 Σύγκριση δοκιμών: Αναφοράς - Ενισχυμένα με ίνες υάλου

Η δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων, η οποία αποτελείται από τα δοκίμια αναφοράς συγκριτικά με τα δοκίμια ενισχυμένα με ίνες υάλου απεικονίζεται στα Σχήματα 4.16 και 4.17.



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου και τα δοκίμια αναφοράς

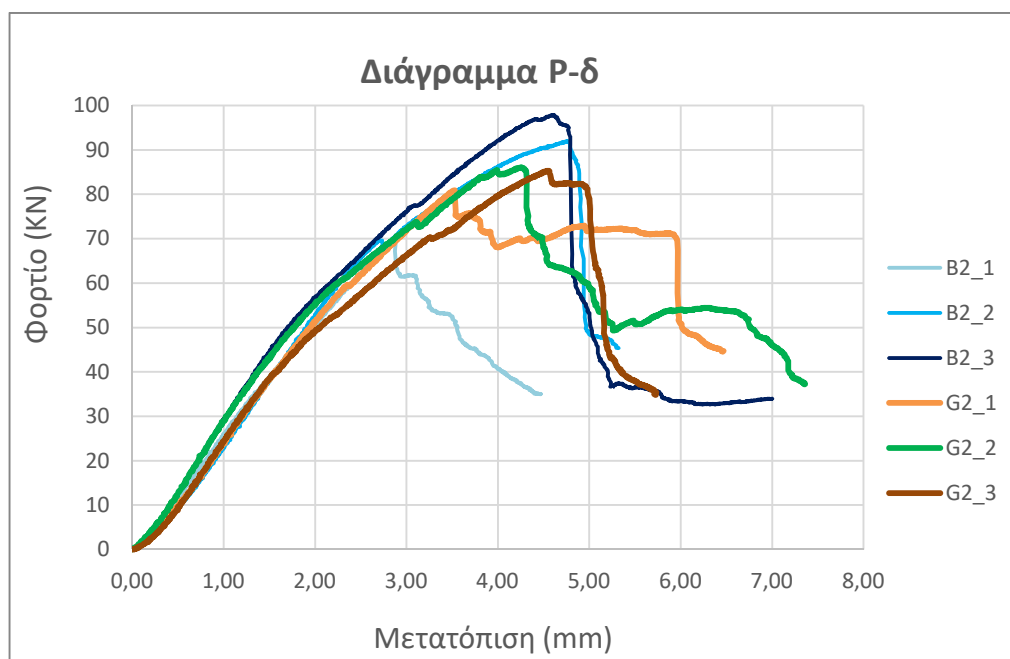


Σχήμα 4.17: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου και τα δοκίμια αναφοράς

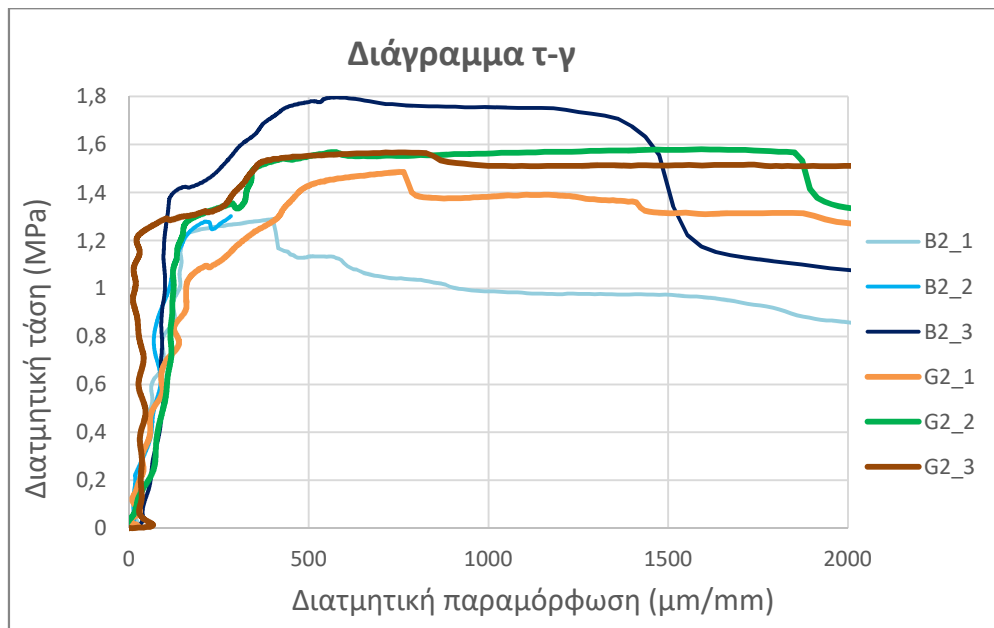
Ομοίως με την προηγούμενη ομάδα διαγραμμάτων, μετά από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, είναι ξεκάθαρη η επιρροή της ενίσχυσης στα δοκίμια. Σύμφωνα με το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, το μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας εντοπίζεται στα δοκίμια G2_2 και G2_3, και ακολουθεί το δοκίμιο G2_1 με μικρή απόκλιση. Τα δοκίμια αναφοράς ωστόσο, παρατηρείται πως παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τα ενισχυμένα με ίνες υάλου, με το μέγιστο φορτίο αστοχίας να ισούται με 61,52 kN. Στη συνέχεια, αναλύοντας το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με προηγουμένως. Τα δοκίμια G2_2 και G2_3, παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διατμητική τάση, ενώ στα αποτελέσματα των δοκιμών αναφοράς παρατηρείται μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα ενισχυμένα δοκίμια.

4.3.3 Σύγκριση δοκιμών: Ενισχυμένα με ίνες βασάλτη - Ενισχυμένα με ίνες υάλου

Η τελευταία ομάδα διαγραμμάτων αποτελείται από τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη συγκριτικά με τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου, και παρουσιάζεται στα **Σχήματα 4.18** και **4.19**.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου

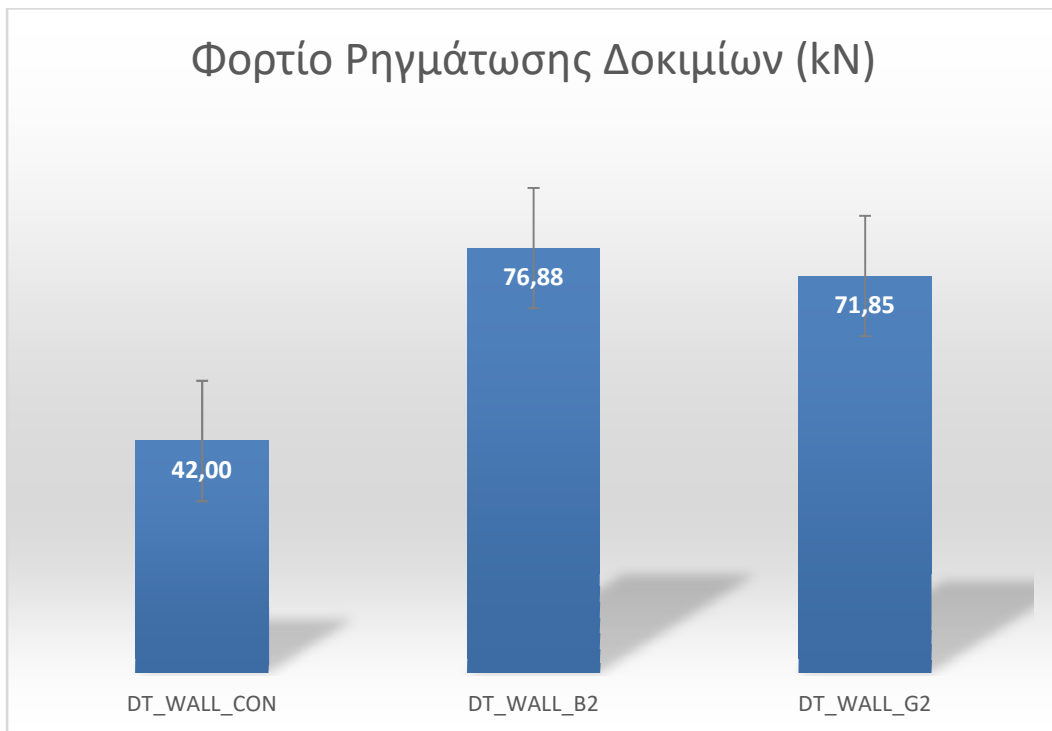


Σχήμα 4.19: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη και τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου

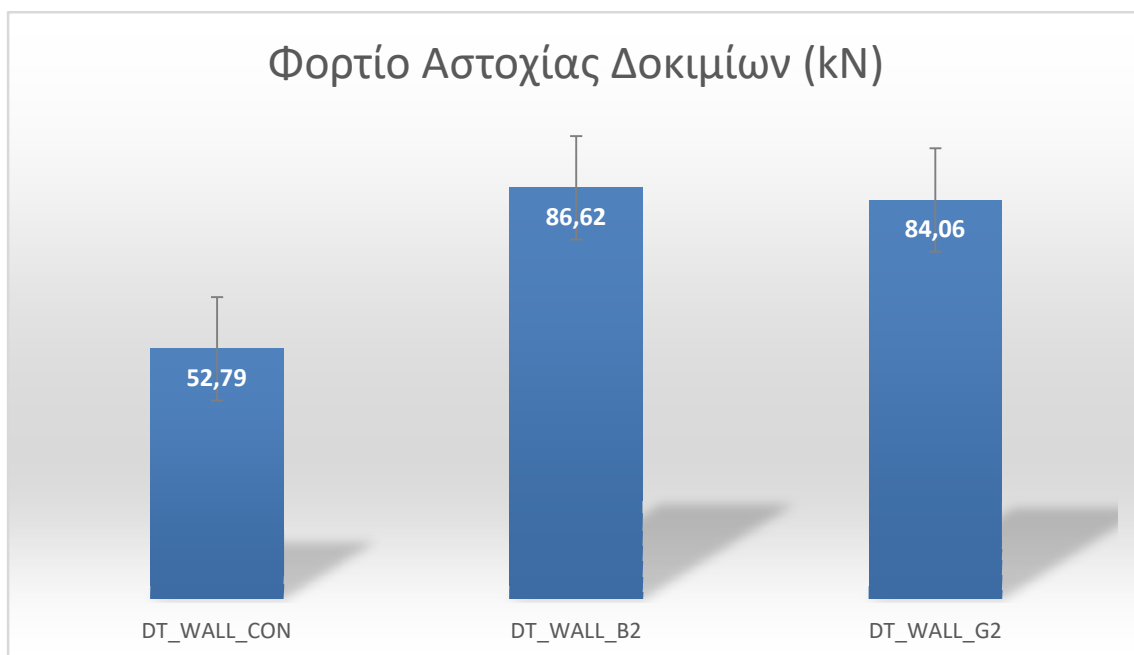
Συγκρίνοντας τις δύο ενισχύσεις, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο δοκίμιο B2_3 και στα δύο διαγράμματα. Στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, το δεύτερο μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας εμφανίζεται στο δοκίμιο B2_2, με μικρή απόκλιση από το B2_3, ενώ ακολουθούν τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου τα οποία παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές μεταξύ τους, επίσης με μικρή διαφορά με τα δοκίμια B2_2 και B2_3. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στο δοκίμιο B2_1, γεγονός το οποίο οφείλεται στη διαφορετική εκτέλεση του πειράματος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, οι υψηλότερες τιμές μετά το B2_3 παρουσιάζονται στα δοκίμια με ενίσχυση υάλου, ενώ ομοίως με το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στο δοκίμιο B2_1. Η σύγκριση του δοκιμίου B2_2 με τα υπόλοιπα δεν καθίσταται δυνατή, λόγω της μη ολοκληρωμένης απεικόνισης του διαγράμματος του λόγω το ελλιπών μετρήσεων που προαναφέρθηκαν.

4.4 Σχολιασμός φορτίσεων και διατμητικής τάσης δοκιμίων

Ακολουθούν γραφήματα με το μέσο όρο του φορτίου ρηγματώσης (**Σχήμα 4.20**) και του φορτίου αστοχίας (**Σχήμα 4.21**) της κάθε τριάδας δοκιμίων (αναφοράς-με ίνες βασάλτη-με ίνες γυαλιού).



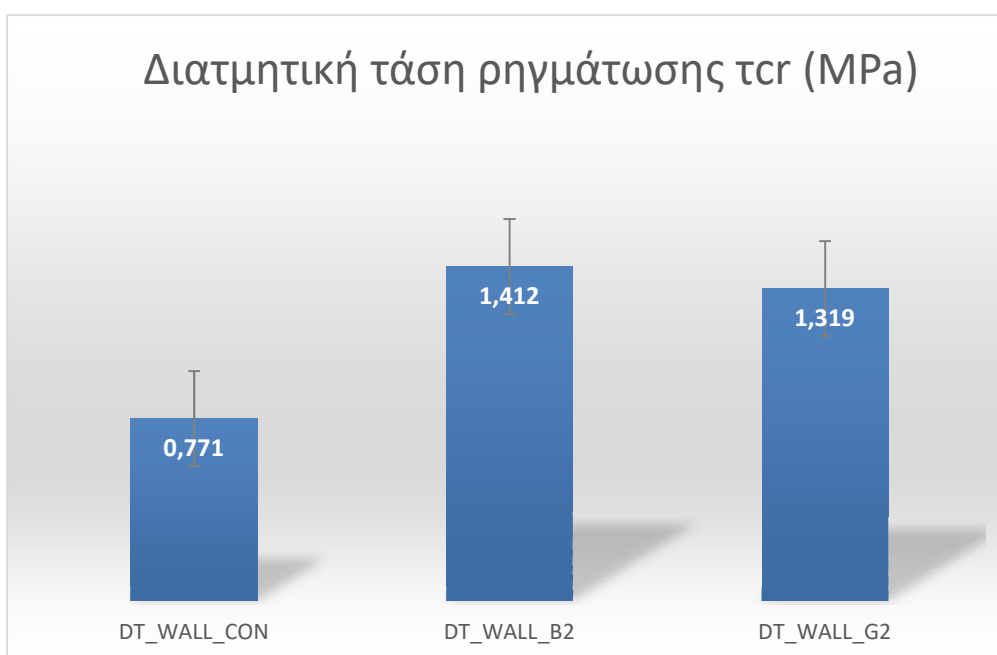
Σχήμα 4.20: Γράφημα για το φορτίο ρηγμάτωσης των δοκιμών



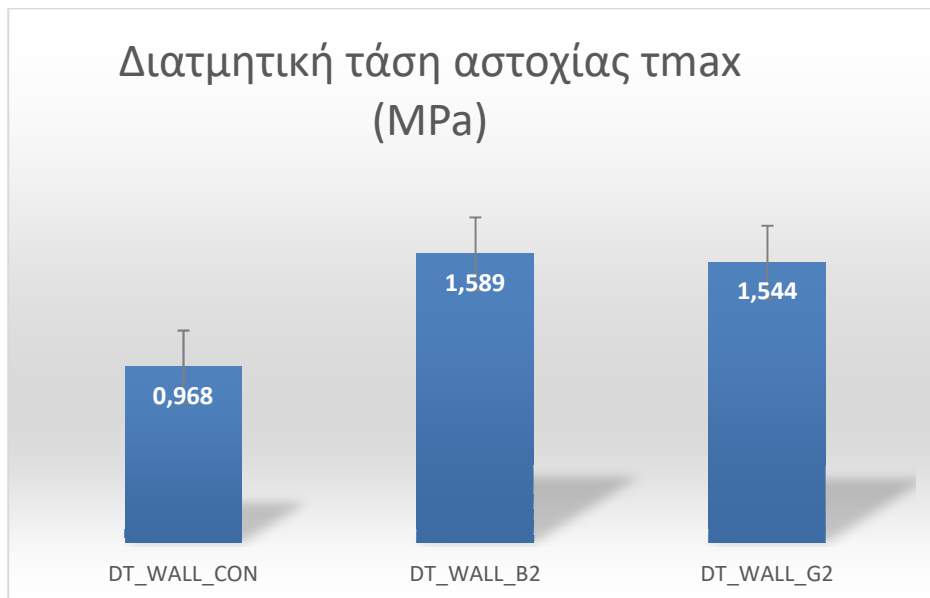
Σχήμα 4.21: Γράφημα για το φορτίο αστοχίας των δοκιμών

- Το φορτίο ρηγμάτωσης των δοκιμών με ίνες βασάλτη υπολογίστηκε ίσο με 76,88 kN κατά μέση τιμή, συνεπώς παρατηρήθηκε αύξηση κατά 83,09% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Ο μέσος όρος του φορτίου αστοχίας τους υπολογίστηκε ήταν ίσος με 86,62 kN, συνεπώς σημειώθηκε αύξηση κατά 64,08% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Αντίστοιχα για τις ίνες υάλου, το φορτίο ρηγμάτωσης υπολογίστηκε ίσο με 71,85 kN, δηλαδή αυξήθηκε κατά 71,11% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς και το φορτίο αστοχίας τους υπολογίστηκε ίσο με 84,06 kN, με αύξηση της τάξης του 59,23% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.
- Τα ενισχυμένα δοκίμια δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους κατά μέσο όρο, με τα δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη να εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές από τα δοκίμια με ενίσχυση υάλου. Πιο συγκεκριμένα, στο φορτίο αστοχίας οι τιμές του βασάλτη είναι κατά 7% μεγαλύτερες και στο φορτίο ρηγμάτωσης κατά 3,05% από αυτές του υάλου.

Στα **Σχήματα 4.22** και **4.23** παρουσιάζεται η μέση τιμή της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης και της διατμητικής τάσης αστοχίας της κάθε τριάδας δοκιμών (αναφοράς-με ίνες βασάλτη-με ίνες γυαλιού), προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



Σχήμα 4.22: Γράφημα για τη διατμητική τάση ρηγμάτωσης των δοκιμών.



Σχήμα 4.23: Γράφημα για τη διατμητική τάση αστοχίας των δοκιμών

Για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τιμών της κάθε ομάδας, με βάση τα οποία υπολογίστηκε και το ποσοστό απόκλισης (COV) όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.2**.

Πίνακας 4.2: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV διατμητικής τάσης

Τάση	Δοκίμια Αναφοράς		Δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη		Δοκίμια με ενίσχυση υάλου	
	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Αστοχίας
Μέσος όρος	0,771	0,968	1,412	1,589	1,319	1,544
Τυπική Απόκλιση	0,146	0,151	0,273	0,266	0,209	0,050
COV (%)	18,88	15,58	19,37	16,72	15,86	3,26

Παρατηρείται πως και στη διατμητική τάση ρηγμάτωσης αλλά και στη διατμητική τάση αστοχίας τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται κατά μέσο όρο στα δοκίμια με ενίσχυση από ίνες βασάλτη, ενώ ακολουθούν τα δοκίμια με ενίσχυση από ίνες υάλου με μικρή απόκλιση. Τα δοκίμια αναφοράς ωστόσο και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζουν πολύ μικρότερες τιμές, φανερώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με IAM σε πειράματα διαγώνιας θλίψης. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα ποσοστά αύξησης της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης και της διατμητικής τάσης αστοχίας των ενισχυμένων δοκιμών έναντι των δοκιμών αναφοράς,

σχεδόν ταυτίζονται με τα ποσοστά αύξησης του φορτίου ρηγμάτωσης και του φορτίου αστοχίας (με μέγιστη απόκλιση 0,17%) για αυτό και θεωρήθηκε περιττή η αναφορά τους.

Συμπεραίνεται ότι οι αυξήσεις στα φορτία και τις διατμητικές τάσεις πιθανότατα οφείλονται στην αυξημένη εφελκυστική αντοχή των ΙΑΜ, τα οποία συγκρατούν τα δομικά μέρη της τοιχοπλήρωσης μεταξύ τους καθυστερώντας κατ' αυτόν τον τρόπο της αστοχία της. Όσο αναφορά τους τύπους ενίσχυσης, τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με ίνες βασάλτη σημείωσαν μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με ίνες υάλου. Οι παράγοντες που μπορεί να επηρέασαν αυτά τα μεγέθη είναι το μέτρο ελαστικότητας των ινών (καθώς οι ίνες βασάλτη έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τις ίνες υάλου) και η διαφορετική διάμετρος των κλώνων των ινών. Συγκεκριμένα, η αύξηση της διαμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του φορτίου αστοχίας.

4.5 Σχολιασμός μέτρου διάτμησης δοκιμίων

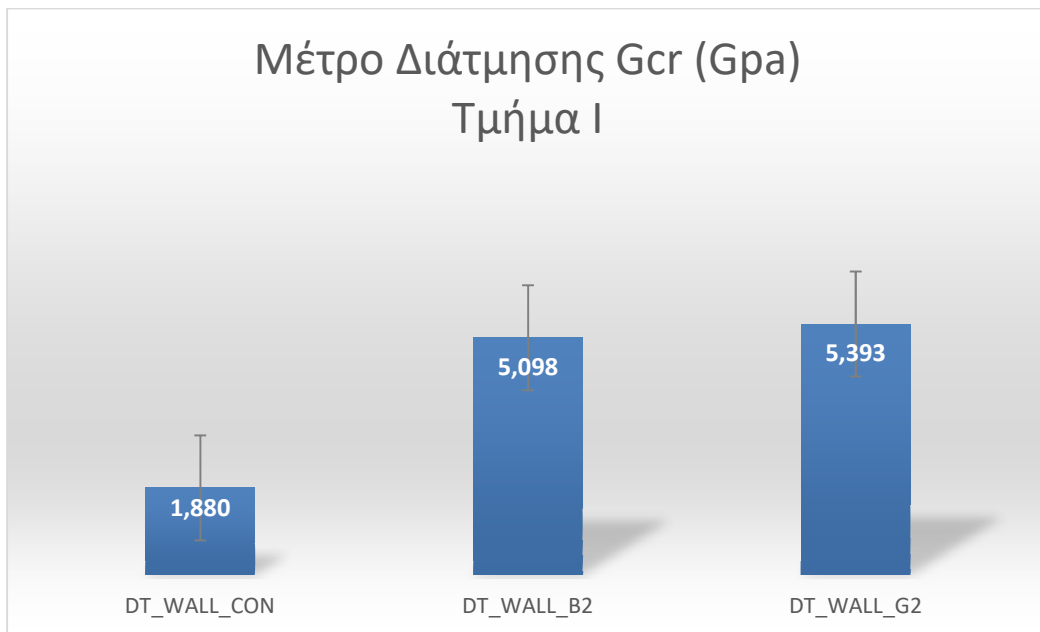
Το μέτρο διάτμησης εκφράζεται από την κλίση του διαγράμματος διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης. Έτσι, κάνοντας την παραδοχή ότι το διάγραμμα αποτελείται από δύο τμήματα γραμμικής κατανομής, υπολογίζεται ξεχωριστά για τα δύο αυτά τμήματα. Το πρώτο εκφράζει το μέτρο διάτμησης μέχρι το σημείο που εμφανίζονται οι πρώτες ρηγματώσεις και το δεύτερο, από τη στιγμή που εμφανίζονται οι πρώτες ρηγματώσεις μέχρι το σημείο αστοχίας. Ο υπολογισμός του μέτρου διάτμησης έγινε μέσω της **Σχέσης 4.3**, ενώ ο σχολιασμός και η σύγκριση του μέτρου διάτμησης για την κάθε τριάδα δοκιμίων (αναφοράς-με ίνες βασάλτη-με ίνες γυαλιού) έγινε με τη βοήθεια των γραφημάτων των **Σχημάτων 4.24** και **4.25**.

$$G = \frac{\tau}{\gamma \cdot 1000}, \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

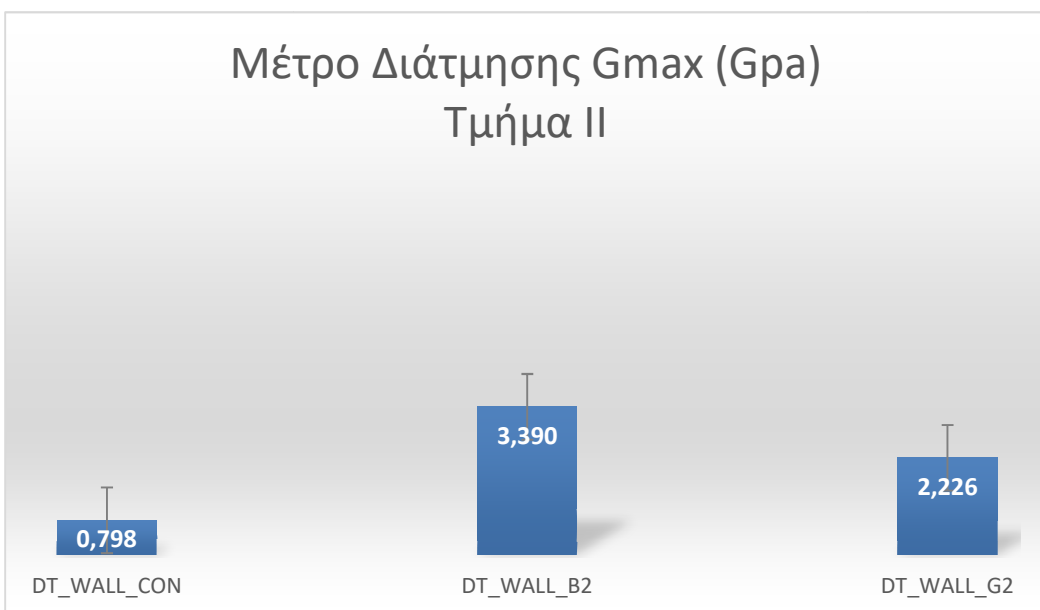
Όπου:

τ : διατμητική τάση

γ : διατμητική παραμόρφωση



Σχήμα 4.24: Γράφημα για το μέτρο διάτμησης στο Τμήμα Ι



Σχήμα 4.25: Γράφημα για το μέτρο διάτμησης στο Τμήμα ΙΙ

Για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τιμών της κάθε ομάδας, με τη βοήθεια τους υπολογίστηκε το ποσοστό απόκλισης (COV) όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.3**

Πίνακας 4.3: Μέσος όρος, τυπική απόκλιση και COV μέτρου διάτμησης

	Δοκίμια Αναφοράς		Δοκίμια με ενίσχυση βασάλτη		Δοκίμια με ενίσχυση υάλου	
	Τμήμα Ι	Τμήμα ΙΙ	Τμήμα Ι	Τμήμα ΙΙ	Τμήμα Ι	Τμήμα ΙΙ
Μέσος όρος	1,88	0,798	5,098	3,39	5,393	2,226
Τυπική Απόκλιση	0,109	0,125	1,264	0,589	1,321	0,185
COV (%)	5,81	15,71	24,8	17,39	24,49	8,32

4.5.1 Μέτρο διάτμησης δοκιμίων με ίνες βασάλτη

Τα δοκίμια με ίνες βασάλτη παρουσίασαν μέτρο διάτμησης ίσο με 5,098 GPa κατά μέσο όρο στο πρώτο στάδιο, συνεπώς παρατηρήθηκε αύξηση ίση με 171,12% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς στο πρώτο στάδιο. Στο δεύτερο στάδιο παρουσίασαν μέτρο διάτμησης ίσο με 3,390 GPa κατά μέσο όρο, κατά συνέπεια αυξήθηκε κατά 324,81% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς στο δεύτερο στάδιο. Επομένως, είναι φανερή η απόδοση της ενίσχυσης βασάλτη, καθώς παρουσίασε πολύ μεγάλη αύξηση στο μέτρο διάτμησης των δοκιμίων. Σημειώνεται πως στον υπολογισμό του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης στο Τμήμα Ι δεν συμπεριλαμβάνεται το δοκίμιο B2_1, καθώς παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση στο μέτρο διάτμησης από τα δοκίμια B2_2 και B2_3, γεγονός το οποίο πιθανώς οφείλεται στην εκτέλεση του πειράματος, η οποία ήταν διαφορετική από τα άλλα.

4.5.2 Μέτρο διάτμησης δοκιμίων με ίνες υάλου

Τα δοκίμια με ίνες υάλου παρουσίασαν στο πρώτο στάδιο μέτρο διάτμησης ίσο με 5,393 GPa, δηλαδή αυξήθηκε κατά 186,86% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Στο δεύτερο στάδιο παρουσίασαν μέτρο διάτμησης ίσο με 2,226 GPa, συνεπώς παρατηρήθηκε αύξηση ίση με 178,95 % σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Κατά συνέπεια, η απόδοση της ενίσχυσης υάλου είναι επίσης πολύ υψηλή, καθώς παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη αύξηση του μέτρου διάτμησης των δοκιμίων. Διαπιστώνεται πως στο Τμήμα Ι οι δύο κατηγορίες ενισχύσεων έχουν μικρή απόκλιση στο μέτρο διάτμησης, με την ενίσχυση υάλου να εμφανίζει λίγο μεγαλύτερες τιμές κατά μέσο όρο, ενώ στο Τμήμα ΙΙ παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των ενισχύσεων, με τα δοκίμια βασάλτη να παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέτρο διάτμησης.

Με βάση την **Εξίσωση 4.3** γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μεγάλη αύξηση του μέτρου διάτμησης που παρατηρήθηκε λόγω της ενίσχυσης με IAM είναι αναμενόμενη, κυρίως λόγω της αύξησης της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης και αστοχίας που παρατηρήθηκε στα ενισχυμένα δοκίμια. Εκτός όμως από αναμενόμενη, η συγκεκριμένη αύξηση είναι και επιθυμητή, καθώς φανερώνει ότι τα ενισχυμένα δοκίμια έχουν τη δυνατότητα να παραλάβουν πολύ μεγαλύτερες τάσεις από τα δοκίμια αναφοράς πριν την εμφάνιση των πρώτων ρηγματώσεων, αλλά και μέχρι την αστοχία τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

5.1 Συμπεράσματα

Μέσω της τρέχουσας εργασίας επιτυγχάνεται εκτενέστερη κατανόηση της διαδικασίας ενίσχυσης με IAM καθώς και της πληθώρας των μεταβλητών της, όπως τα υλικά ενίσχυσης, ο αριθμός των στρώσεων ενίσχυσης κλπ. Παράλληλα, με όσα αναφέρθηκαν και με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν μέσω των πειραμάτων γίνεται εύκολα αντιληπτή η αξία των IAM όσο αναφορά την ενίσχυση και αναβάθμιση των κατασκευών στον τομέα των τοιχοπληρώσεων. Τα συμπεράσματα που συνάχθηκαν μέσω της διαδικασίας αυτής είναι:

- Σε όλα τα δοκίμια αναφοράς η αστοχία επήλθε σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εμφάνιση της πρώτης ρηγμάτωσης και είχε ιδιαίτερα έντονη μορφή καθώς όλα τα τοιχοσώματα διαχωρίστηκαν σε δύο μεγάλα τμήματα. Αιτία του φαινομένου αυτού ήταν η ψαθυρότητα που χαρακτηρίζει την τοιχοποιία σαν δομικό στοιχείο, με αποτέλεσμα όταν αδυνατεί να αναλάβει τα φορτία η αστοχία να είναι απότομη.
- Στα δοκίμια που ενισχύθηκαν μονόπλευρα με δύο στρώσεις βασάλτη σημειώθηκε θεαματική αύξηση τόσο της διατμητικής τάσης ρηγμάτωσης και της μέγιστης διατμητικής τάσης, όσο και της μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης. Εξαίρεση αποτελούσε το πρώτο δοκίμιο (B-2-1), στο οποίο επίσης παρατηρήθηκε αύξηση αλλά όχι τόσο ραγδαία. Αυτό αποδίδεται στη χρήση μεταλλικών θηκών μικρότερων διαστάσεων, οι οποίες στη συνέχεια κρίθηκαν ανεπαρκείς και για όλα τα υπόλοιπα πειράματα αντικαταστάθηκαν με μεγαλύτερες.
- Με εξαίρεση το δοκίμιο B-2-1 στο οποίο παρουσιάστηκε τοπική αστοχία στο σημείο επαφής με την άνω μεταλλική θήκη και μια ρηγμάτωση κατά μήκος των αρμών, στα άλλα δύο δοκίμια η αστοχία επήλθε με ρωγμές που ακολουθούσαν τους αρμούς και σε ορισμένα σημεία επεκτείνονταν και στους οπτόπλινθους, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε μερική εκτός επιπέδου παραμόρφωση του δοκιμίου. Το γεγονός ότι

οι ρηγματώσεις στην πλευρά της ενίσχυσης ήταν περιορισμένες σε συνδυασμό με τις σχεδόν διπλάσιες διατμητικές αντοχές των δοκιμίων καταδεικνύει τη συμβολή των IAM με ίνες βασάλτη στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας.

- Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με ίνες υάλου είχαν μορφή αστοχίας παρόμοια με αυτή των ενισχυμένων με ίνες βασάλτη με κάποιες διαφορές. Μετά την αστοχία του τοιχοσώματος υπήρχε μια εναπομένουσα αντοχή, η οποία προκάλεσε εμφανώς εντονότερη εκτός επιπέδου παραμόρφωση του αντί να υπάρξει κατακόρυφη πτώση του φορτίου. Η μέγιστες παραμορφώσεις επομένως των συγκεκριμένων πειραμάτων, είχαν υψηλότερες τιμές συγκριτικά με αυτά του βασάλτη. Η μέγιστη διατμητική τάση που έφτασαν ωστόσο, ενώ ήταν ιδιαίτερα αυξημένη σε σύγκριση με αυτή των δοκιμίων αναφοράς, ήταν χαμηλότερη από τα δοκίμια του βασάλτη που εξετάστηκαν.
- Συνεπώς, ενώ τα IAM με ίνες βασάλτη έχουν υψηλότερο κόστος και μικρότερη δυνατότητα παραμόρφωσης σε σύγκριση με τις ίνες υάλου, αποτελούν ιδανικότερη μορφή ενίσχυσης καθώς προσδίδουν στο τοιχώσωμα αρκετά υψηλότερη διατμητική αντοχή.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Μερικά από τα ερωτήματα που έμειναν αναπάντητα και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω εργασίας είναι:

- Εκτενέστερη μελέτη θα μπορούσε να γίνει στο κομμάτι των ινών ενίσχυσης, τόσο πάνω στα υλικά των ινών (να δοκιμαστούν ίνες άνθρακα αλλά και αραμιδίου και διαφορετικά είδη ινών υάλου ή βασάλτη), όσο και στις διαστάσεις των κενών των βρόχων.
- Επιπλέον έρευνα με χρήση διαφορετικού αριθμού στρώσεων ενίσχυσης, αλλά ακόμα και αμφίπλευρη ενίσχυση τοιχοποιίας με IAM.

- Πειραματική διερεύνηση διαφορετικών διαστάσεων τοιχοσωμάτων αυτών καθ' αυτών, αλλά και υλικών των που τα απαρτίζουν όπως είναι οι διαστάσεις και ο τύπος των οπτόπλινθων και το πάχος του αρμού.
- Τέλος, ενώ έγινε μελέτη για το υλικό των ινών ενίσχυσης δεν έγινε διερεύνηση πάνω στο υλικό της μήτρας, αφήνοντας μια έλλειψη όσο αναφορά την συμβολή των διαφόρων ειδών μήτρας τόσο τσιμεντοειδούς μορφής όσο και μη στην ενίσχυση τοιχοποιίας, όπως για παράδειγμα οι μήτρες γεωπολυμερούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 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.
- [2] Mehrabi, A. B., Shing P. B., Schuller, M. P., and Noland, J. L. (1996). "Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames." *J. Struct. Eng.*, 122(3), 228-237.
- [3] Fardis, M. N., and Panagiotakos, T. B. (1997). "Seismic design and response of bare and infilled reinforced concrete buildings – Part II: Infilled structures." *J. Earthquake Eng.*, 1(3), 473-503.
- [4] 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.
- [5] Θωμόγλου Κ. Αθανασία (2021). "Ενίσχυση άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά." Διατριβή Διδακτορικού Διπλώματος, Ξάνθη: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θράκης.
- [6] Rousakis T.C. (2014). Retrofitting and Strengthening of Contemporary Structures: Materials Used. In: Beer M., Patelli E., Kougoumtzoglou I., Au I. (Ed.) *Encyclopedia of Earthquake Engineering: Chapter Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2014, 03-23.
- [7] Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., and Laourdekis, T. (2006). "Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets." *ACI Struct. J.*, 103(1), 28-37.
- [8] Bournas, D., Lontou, P., Papanicolaou, C. G. and Triantafillou, T. C. (2007). "Textilereinforced mortar (TRM) versus FRP confinement in reinforced concrete columns." *ACI Struct. J.*, 104(6), 740-748.
- [9] Bournas, D., Triantafillou, T. C., Zygouris, K., and Stavropoulos, F. (2009). "Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars." *J. Comp. Constr.*, 13(5), 360–371.

- [10] Triantafillou, T. C., and Papanicolaou, C. G. (2005). "Textile reinforced mortars (TRM) versus fiber reinforced polymers (FRP) as strengthening materials of concrete structures." SP- 230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Paper 20, 341-354, Shield C., Busel J., Walkup S., Gremel D., (eds.), American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [11] D' Ambrici, A., and Focacci, F. (2011). "Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites." *J. Comp. Constr.*, 15(1), 707-720
- [12] Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., and Al-Salloum, Y. A. (2013). "Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study." *Comp. Struct.*, 97, 40-55.
- [13] Bruckner, A., Ortlepp, R., and Curbach, M. (2006). "Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear." *Mater. Struct.*, 39, 741-748.
- [14] Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papantoniou, I., and Balioukos, C. (2009). "Strengthening of two-way slabs with textile reinforced mortars (TRM)." *Proc. 11th fib Symposium, London, UK.*
- [15] Loreto, G., Leardini, L., Arboleda, D., and Nanni, A. (2014). "Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites." *J. Compos. Constr.*, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000415.
- [16] Al-Salloum, Y. A., Siddiqui, N. A., Elsanadedy, H. M., Abadel, A.A., and Aqel, M. A. (2011). "Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints." *J. Comp. Constr.*, 15(6), 920-933.
- [17] Triantafillou, T. C., and Papanicolaou, C. G. (2006). "Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets." *Mater. Struct.*, 39(1), 93-103
- [18] Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Karlos, K., and Papathanasiou, M. (2007). "Textilereinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading." *Mater. Struct.*, 40(10), 1081-1097.

- [19] Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Papathanasiou, M., and Karlos, K. (2008). "Textilereinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading." *Mater. Struct.*, 41(1), 143-157
- [20] Ombres, L. (2015). "Confinement effectiveness in eccentrically loaded masonry columns strengthened by fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) jackets." *Key Eng. Mater.*, 624, 551-558.
- [21] Garcia-Ramonda, Larisa, Luca Pelá, Pere Roca, and Guido Camata (2020). "In-Plane Shear Behaviour by Diagonal Compression Testing of Brick Masonry Walls Strengthened with Basalt and Steel Textile Reinforced Mortars." *Construction and Building Materials*. 240:117905. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117905.
- [22] El-Dakhakhni, Wael W., Ahmad A. Hamid, and Mohamed Elgaaly (2004). "Strength and Stiffness Prediction of Masonry Infill Panels." 13th World Conference on Earthquake Engineering. University Centre for Effective Design of Structures, Hamilton (Paper No. 3089).
- [23] Gattesco, N., I. Boem, and A. Dudine (2015). "Diagonal Compression Tests on Masonry Walls Strengthened with a GFRP Mesh Reinforced Mortar Coating." *Bulletin of Earthquake Engineering*. 13(6), 1703–1726. doi: 10.1007/s10518-014-9684-z.
- [24] Lucchini, Sara S., Luca Facconi, Fausto Minelli, and Giovanni Plizzari (2020). "Retrofitting Unreinforced Masonry by Steel Fiber Reinforced Mortar Coating: Uniaxial and Diagonal Compression Tests." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 53(6), 1–22. doi: 10.1617/s11527-020-01574-w.
- [25] Gulinelli, Pietro, Alessandra Aprile, Raffaella Rizzoni, Yves Henri Grunevald, Frédéric Lebon, Roberto Lovisetto, and Sergio Tralli (2019). "A FE Model for TRM Reinforced Masonry Walls with Interface Effects." *Trans Tech Publications Ltd.*, Vol. 817, 57–64 in *Key Engineering Materials*.
- [26] Gulinelli, Pietro, Alessandra Aprile, Raffaella Rizzoni, Yves Henri Grunevald, and Frédéric Lebon (2020). "Multiscale Numerical Analysis of Trm-Reinforced Masonry under Diagonal Compression Tests." *Buildings* 10(11), 1–20. doi: 10.3390/buildings10110196.
- [27] Prota, A., Marcari, G., Fabbrocino, G., Manfredi, G., and Aldea, C. (2006). "Experimental in- plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix–grid composites."

J. Compos. Constr., 10(3), 223–233.

[28] Parisi, F., Iovinella, A., Balsamo, A., Augenti, N., and Prota, A. (2013). "In-plane behavior of tuff masonry strengthened with inorganic matrix–grid composites." *Compos: Part B*, 45(1), 1657-1666.

[29] Koutas, L., Triantafillou, T. C., & Bousias, S. N. (2015). Analytical modeling of masonry-infilled RC frames retrofitted with textile-reinforced mortar. *Journal of Composites for Construction*, 19(5), 04014082.

[30] RILEM LUMB6 (1991), "Diagonal tensile strength tests of small wall specimens". TC76-LUM.

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