

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ ΑΠΟ ΑΛΚΑΛΟ-ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΟΣ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

ΤΟΥΛΙΤΣΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ-ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, up1068106@ac.upatras.gr

Περίληψη

Η παρούσα πειραματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης του 5^{ου} ακαδημαϊκού προπτυχιακού έτους σπουδών για την απολαβή του διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού. Η έρευνα αυτή ασχολείται με το αντικείμενο της κατασκευαστικής ενίσχυσης στοιχείων άοπλης τοιχοποιίας με την ταυτόχρονη ενεργειακή αναβάθμιση αυτών. Προτείνεται η εφαρμογή ενός καινοτόμου σύνθετου υλικού, των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM – TRM) για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας και παραμορφωσιμότητας της φέρουσας τοιχοποιίας. Το σύνθετο αυτό υλικό στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελείται από ινόπλεγμα άνθρακα και αλκαλικά ενεργοποιημένο κονίαμα στον ρόλο της ανόργανης μήτρας, τα οποία συνδυάζονται για να προσδώσουν στα δοκίμια τοιχοποιίας την αντισεισμική αναβάθμιση. Σε συνδυασμό όμως με την επίτευξη της αντισεισμικής αναβάθμισης, έγινε και μελέτη για την ενεργειακή προστασία τους χρησιμοποιώντας μονόπλευρα εξωτερική θερμομόνωση είτε εξηλασμένης πολυστερίνης είτε πετροβάμβακα. Όσον αφορά την δεύτερη περίπτωση, η πλάκα πετροβάμβακα χρησιμοποιείται σε δοκίμια τα οποία πρόκειται να υποβληθούν σε δοκιμές πυρός και μετέπειτα να ελεγχθούν σε ανακινιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη, όπως και τα δοκίμια με την πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης. Έτσι, ελέγχονται διάφορες διατάξεις έτσι ώστε να καταλήξουμε σε αυτή με την καλύτερη δυνατή μηχανική συμπεριφορά του συστήματος.

1. Εισαγωγή

Η ενίσχυση με χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (TRM) έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια στον τομέα των ενισχύσεων των κατασκευών τόσο σε γραμμικά όσο και σε επιφανειακά μέλη. Η υλοποίηση της ενίσχυσης με ινόπλεγμα σε σύνθετα αλκαλο-ενεργοποιημένα υλικά, εκτός από την ικανότητα της μήτρας στην αποφυγή διάβρωσης του ινοπλέγματος και της φιλικότητάς της στο περιβάλλον, εξασφαλίζει προστασία σε μέλη με ανεπαρκή αντοχή ή πλαστιμότητα, καθώς επιλύει ζητήματα στοιχείων και κυρίως τοιχοποιιών που είτε έχουν υποστεί ζημιά σε σεισμό είτε ενισχύονται προληπτικά. Η εφαρμογή των ινοπλεγμάτων απαιτεί τη χρήση κάποιου είδους μήτρας η οποία στην παρούσα περίπτωση πρόκειται για μία αλκαλικά ενεργοποιημένη ανόργανη μήτρα. Κύριο γνώρισμά τους είναι η ικανότητα ανάληψης εφελκυστικής δύναμης συνδυαστικά με το χαμηλό βάρος τους και την ανθεκτικότητα σε διάρκεια, φαινόμενα ερπυσμού και πυρκαγιάς, αλλά και το σχετικά οικονομικό κόστος των υλικών. Στα θετικά προσμετράται η ευκολία και η γνώριμη διαδικασία ενίσχυσης με το κονίαμα και το πλέγμα, ενώ δεν παρεμποδίζεται η χρήση τους σε υγρές επιφάνειες και χαμηλές θερμοκρασίες.

2. IAM (TRM) -ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (Textile Reinforced Mortars) αποτελεί μια μέθοδο ενίσχυσης με τα περισσότερα πλεονεκτήματα όσον αφορά την αντοχή και πλαστιμότητα της τοιχοποιίας. Τα αλκαλο-ενεργοποιημένα υλικά (Alkali-Activated Materials-AAM) συνθέτουν ένα ανόργανο μίγμα που προέρχεται από την αντίδραση μιας πηγής αλκαλιμετάλλου με μια πυριτική σκόνη, όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου. Αυτά τα υλικά διακρίνονται για τα εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά τους, την υψηλή αντοχή τους ειδικότερα όταν σκληραίνουν σε υψηλή θερμοκρασία, αλλά παράλληλα και για τα περιβαλλοντικά οφέλη που εμφανίζουν με τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, βοηθούν και στην αποφυγή της διάβρωσης του ινοπλέγματος από την

ανεπιθύμητη χημική αντίδραση που προκαλείται λόγω της αλκαλικότητας του τσιμεντοκονιάματος και τέλος διαμορφώνουν με το ινόπλεγμα ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ τους. Όσον αφορά την ενεργειακή αναβάθμιση χρησιμοποιούνται πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης και πετροβάμβακα στην περίπτωση έκθεσης σε φωτιά (600°C) και μελετάται η συνδυαστική συμπεριφορά τους με τη στρώση ενίσχυσης για ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου φόρτιση των φερουσών τοιχοποιιών.

2.1 ΙΝΕΣ

Οποιοδήποτε είδος ίνας εμφανίζει εξαιρετική αντοχή και ανθεκτικότητα στον χρόνο λόγω της απουσίας ατελειών σε αντίθεση με τον χάλυβα και αυτό οφείλεται στην εξαιρετικά μικρή διάμετρό της. Όταν ένας μεγάλος αριθμός ινών ενσωματωθεί σε μία παχύτερη λωρίδα ινών (κλώνος ινών) και αυτές οι λωρίδες δημιουργήσουν σε καθορισμένες ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ένα πλέγμα, τότε υπάρχει δυνατότητα παραλαβής υψηλής εφελκυστικής τάσης μεγαλύτερης από την εφελκυστική αντοχή του δομικού χάλυβα. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από την ικανότητα μεγάλης παραμορφωσιμότητας στην αστοχία και σε συνεργασία με το κονίαμα επιτυγχάνουν υψηλές τιμές συνάφειας.

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις ενισχύσεις των κατασκευών με σύνθετα υλικά είναι οι ίνες άνθρακα και οι ίνες γυαλιού, ενώ σπανιότερα χρησιμοποιούνται ίνες αραμιδίου και βασάλτη. Οι ίνες γυαλιού, αραμιδίου, άνθρακα, χάλυβα και αμιάντου διακρίνονται από την υψηλότερη εφελκυστική αντοχή, δυσθραυστότητα και το αυξημένο μέτρο ελαστικότητας. Όμως, οι ίνες χάλυβα διαβρώνονται ενώ έχουν και μεγαλύτερο κόστος. Αντίθετα, οι ίνες αμιάντου έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και πυραντίσταση, αν και η χρήση τους απαγορεύτηκε λόγω πρόκλησης σοβαρών προβλημάτων υγείας στον άνθρωπο. Κατά συνέπεια, οι ίνες γυαλιού, άνθρακα [1] και αραμιδίου είναι εκείνες που στη σημερινή εποχή χρησιμοποιούνται περισσότερο. Η επιλογή μεταξύ αυτών εξαρτάται από τους λόγους μέτρου ελαστικότητας/κόστους και εφελκυστικής αντοχής/κόστους.



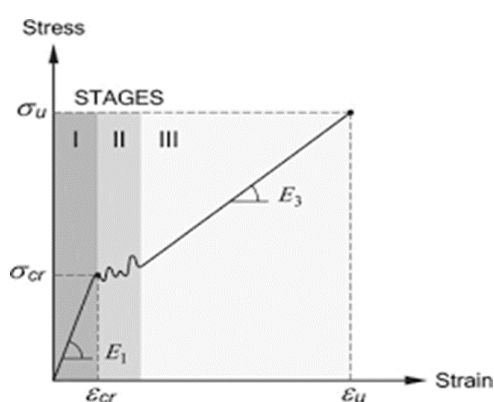
Σχήμα 2.1: Ίνες γυαλιού και άνθρακα αντίστοιχα [1]

2.2 ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ-ΚΟΝΙΑΜΑ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑ

Η αλκαλικά ενεργοποιημένη μήτρα-κονίαμα (Alkali-Activated Mortar-AAM) αποτελεί ένα ανόργανο μίγμα και στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελείται από σκωρία σιδηρονικελίου με μέγιστο κόκκο αδρανών 2mm, λεπτόκοκκο αδρανές σκωρίας, πυριτική παιπάλη (η οποία αυξάνει τη θλιπτική, καμπτική αντοχή και την εργασιμότητα του υλικού ενίσχυσης), αλλά και από έναν χημικό ενεργοποιητή ο οποίος περιέχει νερό, πυριτικό κάλιο και υδροξείδιο καλίου. Διακρίνεται από μικρή εφελκυστική αντοχή (6.5-7.5 MPa) και υψηλή αντίστοιχα θλιπτική (65-75 MPa) και ανάλογα με τον στόχο που θέλουμε να επιτύχουμε χρησιμοποιούνται διαφορετικές αναλογίες υλικών. Αυξάνοντας τη σκωρία αυξάνεται η αντοχή του κονιάματος και το μέτρο ελαστικότητας αλλά μειώνεται η ερασιμότητα και ο χρόνος πήξης του, ενώ με την προσθήκη πυριτικής παιπάλης βελτιστοποιείται η εργασιμότητα. Έπειτα από αρκετές δοκιμές μιγμάτων κρίθηκε ως περισσότερο ευεργετική η εξής αναλογία: σκωρία σιδηρονικελίου : λεπτόκοκκο αδρανές σκωρίας : πυριτική παιπάλη : χημικός ενεργοποιητής

(που αποτελείται από την αναλογία νερό : πυριτικό κάλιο : υδροξείδιο καλίου = 1 : 0.95 : 0.18)
= 1 : 0.68 : 0.05 : 0.33.

Το ινόπλεγμα σε ανόργανη μήτρα καθίσταται υπεύθυνο κυρίως για την απορρόφηση εφελκυστικών τάσεων. Σε θλίψη μπορεί να θεωρηθεί ότι το ινοπλισμένο ανόργανης μήτρας από τη στιγμή επιβολής της έως και το σημείο θραύσης συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά [2]. Ομοίως, στην περίπτωση του εφελκυσμού και προτού εμφανιστούν οι πρώτες ρωγμές συμπεριφέρεται ακόμη γραμμικά ελαστικά (Στάδιο I – Pre-cracking). Έπειτα, εμφανίζονται οι πρώτες ρωγμές οι οποίες με την πάροδο του χρόνου πληθαίνουν σε αριθμό και μεγαλώνουν σε μέγεθος, οδηγώντας σε μία εξαιρετικά μη γραμμική μηχανική συμπεριφορά (Στάδιο II – Multi-cracking). Έπειτα, ο αριθμός των ρηγματώσεων σταθεροποιείται και όσο αυξάνεται το φορτίο, αυξάνεται η καταπόνηση του ινοπλέγματος έως ότου επέλθει αστοχία ή εξαγωγή των ινών. Η ανόργανη μήτρα δεν μπορεί να παραλάβει περαιτέρω τάσεις αφού ήδη έχει αστοχήσει στην αρχή του Σταδίου II, οπότε το μέτρο ελαστικότητάς του θεωρείται ίσο με αυτό των ινών (Στάδιο III – Post-cracking).



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα σε εφελκυσμό [2]

2.3 ΠΛΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ

Ένα θερμομονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται αρκετά στην Ελλάδα είναι η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) [3] και στις περισσότερες περιπτώσεις τοποθετείται εξωτερικά του τοίχου. Η παραγωγή του αποτελείται από δύο στάδια και η σύνθεσή του είναι τέτοια, έτσι ώστε να χαρακτηρίζεται ως ένα ασφαλές, εύχρηστο και οικονομικό προϊόν θερμομόνωσης. Εκτός από αυτό το είδος υπάρχουν κι άλλα που ωφελούν την κατασκευή και χρησιμοποιούνται αναλόγως τον στόχο της εφαρμογής, όπως ο πετροβάμβακας [4] σε συνθήκες πυρκαγιάς. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών φαίνονται παρακάτω:

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Μονάδα Μέτρησης	Εξηλασμένη Πολυστερίνη FIBRAN _{xps} ETICS GF	Πρότυπο Ελέγχου
		Τιμή	
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (10°C)	W/(m*K)	0.033	EN 13164
Ονομαστικό πάχος	mm	20	EN 823
Μέγιστο φορτίο αντοχής	kN/m ²	<130	EN 13164
Θερμοκρασία λειτουργίας	°C	Από -50 έως +75	EN13501

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά εξηλασμένης πολυστερίνης FIBRAN_{xps} ETICS GF [3]

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Μονάδα Μέτρησης	Πετροβάμβακας FIBRANgeoBP-ETICS	Πρότυπο Ελέγχου
		Τιμή	
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (10°C)	W/(m*K)	0.035	EN 13162
			EN 12667
			EN 12939
Ονομαστικό πάχος	mm	30 - 300	EN 823
Μέγιστο φορτίο αντοχής	kN/m ²	<130	EN 13164
Σταθμισμένος συντελεστής ηχοαπορρόφησης σε πάχος πλακών 50mm, α_w		0,95 Κατηγορία A 0,9	ENISO11654
			EN ISO 354
Αντίσταση στη φωτιά		Κατηγορία A1 (Ακαυστο)	DIN 4102

Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά πετροβάμβακα FIBRANgeoBP-ETICS [4]

2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ (TRM) ΣΕ ΦΩΤΙΑ ΚΑΙ ΠΛΑΚΑ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗΣ

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του επικαλυμμένου ινοπλέγματος στην ανόργανη μήτρα είναι η ακαυστότητά του, αλλά και η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) χρησιμοποιούμενη ως θερμομονωτικό υλικό χαρακτηρίζεται από υψηλή αντίσταση στη φωτιά. Βέβαια, το ίδιο συμβαίνει και με τον σκελετό της φέρουσας τοιχοποιίας, δηλαδή οι οπτόπλινθοι από τους οποίους αποτελείται συνήθως παρουσιάζουν εξίσου υψηλή πυραντίσταση. Οπότε, η θερμική ικανότητα της ενισχυμένης τοιχοποιίας με μανδύες τύπου ινοπλέγματος και θερμομονωτικά υλικά είναι αρκετά μεγάλη και εξαρτάται από το πάχος και τις ιδιότητες των υλικών. Τα τρία αυτά ξεχωριστά υλικά και κυρίως το νερό που υπάρχει σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο κονιάμα συμβάλλουν ανασταλτικά στη διείδυση της φωτιάς στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Η απόκριση του σύνθετου κονιάματος κατά την έκθεση σε φωτιά δεν αναμένεται να διαφέρει δραματικά από την απόκριση του κονιάματος που είναι ενισχυμένο με ινόπλεγμα. Η θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα δε διακυμαίνονται τόσο από την ύπαρξη των ινών, αφού το συνολικό ογκομετρικό ποσοστό τους στο σύνθετο υλικό είναι αρκετά μικρό σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό της ανόργανης μήτρας. Επιπλέον, η σύνθεση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα θεωρείται μη εύφλεκτη χωρίς ακόμη να προκαλούνται εκπομπές επιβλαβών αερίων. Όμως, η παρουσία των ινών καθιστά εφικτή την πιθανότητα θρυμματισμού τους. Η ακαυστότητα που χαρακτηρίζει τα κονιάματα τους προσφέρει την ικανότητα να αντέχουν δίχως να χρειάζονται κάποιοι είδους προστασία, σε αντίθεση με τις εποξειδικές ρητίνες που είναι αρκετά ευαίσθητες στη φωτιά.

Έπειτα από πειραματικές έρευνες και χωρίς την παρουσία κάποιας επίσημης βιβλιογραφίας, έχουν προκύψει ορισμένα συμπεράσματα που προσπαθούν να προσεγγίσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα. Έχει προκύψει ότι η μηχανική απόκριση της σύνθεσης ινοπλέγματος-ανόργανης μήτρας σε χαμηλά επίπεδα θερμοκρασίας (μικρότερα των 200°C) εξαρτάται από τον τύπο του ινοπλέγματος και του κονιάματος, καθώς οι θερμικές ιδιότητες του κονιάματος επηρεάζονται αρκετά από την εξάτμιση του νερού στους 100°C.

Όσον αφορά τις ίνες άνθρακα, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα μελέτη, αυτές δεν υφίστανται γενικά οξείδωση και επακόλουθη αποδόμηση ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες. Από μελέτη των Παπακωνσταντίνου (2001) και Long (1996) αποδείχθηκε μία επαρκής οξείδωση των ινών άνθρακα στους 500°C, βέβαια αργότερα ο Tran (2018) απέδειξε ότι η οξείδωση αυτή μπορεί να ξεκινήσει από τους 400°C. Παρ' όλ' αυτά, αυτό μπορεί να

αντιμετωπιστεί με τη χρήση μονοξειδίου του άνθρακα στις ίνες. Επίσης, σε ινοπλέγματα από άνθρακα ή βασάλτη παρατηρείται μία διγραμμική απόκριση και ένα καθορισμένο σημείο θραύσης λόγω της αστοχίας των ινών.

Όμως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες των ινών αυτών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν πολύ προσεκτικά κατά τη μελέτη της απόδοσης του σύνθετου υλικού. Αφού οι συνθήκες δοκιμής, το φινίρισμα του ινοπλέγματος και η απόδοση του δεσμού ινοπλέγματος - μήτρας είναι αυτές που τελικά καθορίζουν την απόδοση του σύνθετου αυτού υλικού σε αυξημένες θερμοκρασίες.

Σχετικά με τη συμπεριφορά της ανόργανης μήτρας του σύνθετου αυτού υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες και πιο συγκεκριμένα με το αλκαλικά ενεργοποιημένο κονίαμα ΑΑΜ, παρόλο που υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες έρευνες καθίσταται σχεδόν αδύνατον να προβεί κανείς σε καθολικά συμπεράσματα. Η μελέτη “Textile Reinforced Mortars (TRM) tensile behavior after high temperature exposure” των Luis Estevan, Francisco B., Varona, F. Javier Baeza, Benjamín Torres, David Bru φέρει παρόμοια αποτελέσματα με τις υπόλοιπες μελέτες και συμπεραίνει ότι σε μέτρια επίπεδα θερμοκρασιών (θερμοκρασίες χαμηλότερες από 200°C) τα υλικά διατηρούν τις μηχανικές και θερμικές τους ιδιότητες σχεδόν αναλλοίωτες. Όμως, στην πραγματικότητα έχουν υπάρξει ακόμα και βελτιώσεις στην ικανότητα αντοχής του σύνθετου υλικού ινοπλέγματος-κονιάματος σε αυτές τις θερμοκρασίες. Αυτές οι βελτιώσεις οφείλονται κυρίως σε δύο παράγοντες. Ο ένας από αυτούς είναι η συρρίκνωση του κονιάματος κατά τη ψύξη ισχυροποιώντας το δέσιμό του με το ινόπλεγμα. Από την άλλη μεριά, οι βελτιώσεις αυτές παρατηρούνται σε πλέγματα με πολυμερή, στα οποία η πρόσφυση κονιάματος-ινοπλέγματος αυξάνεται όσο αλλοιώνεται η επικάλυψη της επιφάνειας λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.

Αντίθετα, στους 400°C το σύνθετο υλικό TRM χάνει ένα μεγάλο κομμάτι της αντοχής του, με εξαίρεση το ενισχυμένο κονίαμα με ίνες άνθρακα όπου συγκρατεί κάποιο ικανοποιητικό ποσοστό της αντοχής του. Έτσι, η σύνθεση μεταξύ κονιάματος-ινοπλέγματος με βάση τον άνθρακα κρίνεται ως η μοναδική λύση, ώστε να διατηρηθεί σε επαρκή βαθμό η μηχανική ικανότητα του υλικού. Τέλος, στους 600°C το υλικό εμφανίζει πλέον ισχυρές βλάβες ανεξαρτήτως του τύπου ινών, διακυβεύονται σοβαρά οι μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας και υποβαθμίζονται τα χαρακτηριστικά της. Αρχικά, τα πλέγματα καταλήγουν εντελώς υποβαθμισμένα και η πρόσφυση στη μήτρα του κονιάματος εξαφανίζεται. Οπότε, το σύνθετο υλικό καθίσταται πλέον σχεδόν άχρηστο ως προς την αντίστασή του στη φωτιά αλλά και τη λειτουργικότητά του.

Τέλος, σύμφωνα με τη μελέτη “Textile Fibre Composites in Civil Engineering” του Τριανταφύλλου (2016), όλα τα τσιμεντοειδή υλικά ανόργανης μήτρας σε υψηλές θερμοκρασίες υπόκεινται σε αποφλοίωση της στρώσης τους από την κατασκευή. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό διαφορετικών θερμικών τάσεων σε βάθος εντός του κονιάματος κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς σε συνδυασμό με τη συσσωρευμένη πίεση των πόρων που σχετίζεται με τη μαζική μεταφορά των υδρατμών μέσα στο κονίαμα.

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Έπειτα από δοκιμές, που εξήχθησαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας των Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, μέσω της υδραυλικής μηχανής “MTS” για την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της σεισμικής ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για το κονίαμα δόμησης, την τοιχοποιία, το αλκαλικά ενεργοποιημένο κονίαμα και το ινόπλεγμα άνθρακα:

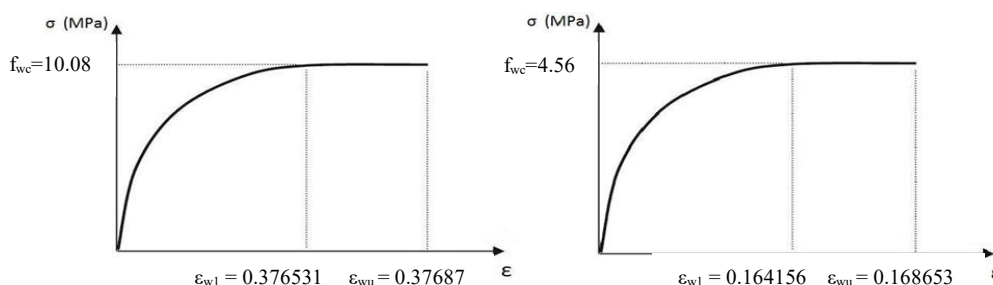
3.1 Κονίαμα δόμησης

Το κονίαμα δόμησης ελέγχθηκε μέσω πρισμάτων διαστάσεων 40x40x160mm για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής από κάμψη και διεξήχθησαν τα εξής:

Μέση εφελκυστική και θλιπτική αντοχή κονιάματος:	3.12 MPa	10.27 MPa
--	----------	-----------

3.2 Τοιχοποιία

Επίσης, έγινε έρευνα για την τιμή της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας κάθετα και παράλληλα στους αρμούς σε δοκίμια διαστάσεων 40x40x8.5cm με τελικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης τοιχοποιίας για κάθε περίπτωση τα παρακάτω:



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων τοιχοποιίας παράλληλα και κάθετα στους αρμούς αντίστοιχα

Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης σε μικρά δοκίμια τύπου τριπλέτες (από 3 στρώσεις οπτόπλινθων) βάσει του προτύπου EN 1052-3 (2002) με επιβολές θλιπτικών τάσεων με τιμές $\sigma=0.15$ MPa και $\sigma=0.30$ MPa.

Δοκίμιο	Θλιπτική τάση σ (MPa)	Μέγιστο διατμητικό φορτίο V_{max} (kN)	Διατμητική αντοχή (MPa)
Μέσος όρος	0.15	14.15	0.45
Μέσος όρος	0.30	21.96	0.70

Πίνακας 3.1 Πειραματικά αποτελέσματα διατμητικής αντοχής άοπλης τοιχοποιίας

3.3 Ινόπλεγμα και αλκαλικά ενεργοποιημένο κονίαμα

Στη συγκεκριμένη έρευνα, για την ενίσχυση των δοκιμίων εφαρμόστηκε πλέγμα ινών Mapeigrig C 170 της εταιρίας Mapei Hellas με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά παραγωγής	
Τύπος ινών	υψηλής αντοχής ίνες άνθρακα
Βάρος (g/m ²)	>170
Μέγεθος τετραγωνικής διάταξης (mm)	10 x 10
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.83
Μηχανικά χαρακτηριστικά εταιρίας	
Εφελκυστική αντοχή (kN/m)	>240
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	252 ± 2%
Περιοχή αντοχής ανά μέτρο πλάτους (mm ² /m)	48.00
Ισοδύναμο πάχος ξηρού πάχους (mm)	0.048
Παραμόρφωση αστοχίας (%)	2

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά ανθρακο-πλέγματος Mapeigrig C 170

Το ινόπλεγμα υποβλήθηκε σε δοκιμή άμεσου εφελκυσμού προέκυψαν τα εξής:

Μηχανικά χαρακτηριστικά δοκιμής εφελκυσμού	
Μέση εφελκυστική αντοχή (MPa)	2230.9
Μέσο μέτρο ελαστικότητας (GPa)	212.5
Μέση παραμόρφωση αστοχίας (%)	1.05

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά ανθρακο-πλέγματος Mapeigrig C 170 από δοκιμή εφελκυσμού

Για την εύρεση της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη και της θλιπτικής αντοχής του αλκαλικά ενεργοποιημένου κονιάματος, έγινε λήψη δειγμάτων σε μήτρες διαστάσεων 40x40x160 mm τα οποία ελήφθησαν κατά τη διάρκεια παρασκευής του κονιάματος και συντηρήθηκαν για 28 ημέρες και υπολογίστηκαν οι τιμές αντοχών:

Μέση εφελκυστική αντοχή κονιάματος:	7.44 MPa
Μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος:	72.30 MPa

3.4 Ινόπλεγμα σε ανόργανη μήτρα

Αφού πλέον είναι γνωστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών του ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα είναι δυνατόν να προσδιορισθούν θεωρητικά οι ιδιότητες ολόκληρου του υλικού ως σύνολο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του <<κανόνα ανάμιξης>> όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και απαιτείται ο υπολογισμός των ογκομετρικών ποσοστών των δύο επιμέρους υλικών. Ισχύουν:

$$E = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.1)$$

$$f_{t,TRM} = f_{t,f} \cdot V_f + f_{m,t} \cdot (1 - V_f) \quad (3.2)$$

Όπου: E_f το μέτρο ελαστικότητας των ινών

E_m το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας

V_f ο λόγος όγκου των ινών

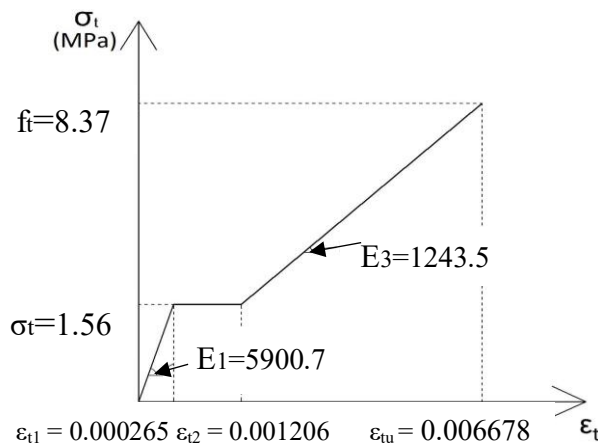
V_m ο λόγος όγκου της μήτρας

$f_{t,TRM}$ η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού TRM

$f_{t,f}$ η εφελκυστική αντοχή της ίνας

$f_{m,t}$ η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την αστοχία της ίνας




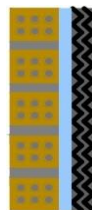

Ο <<κανόνας ανάμιξης>>, όμως, προϋποθέτει μία σχεδόν ουτοπική τέλεια πρόσφυση μεταξύ των ινών και του κονιάματος η οποία δεν υφίσταται. Το ογκομετρικό ποσοστό των ινών δεν έχει στο σύνολό του άμεση επαφή με το κονίαμα αλλά μόνο με την εξωτερική επιφάνεια. Στην πραγματικότητα η συμπεριφορά του σύνθετου αυτού υλικού κατά την αστοχία χαρακτηρίζεται από μία προοδευτική θραύση του συνόλου των ινών σε κάθε κλώνο, οπότε οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα χαρακτηρίζονται πειραματικά με δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια. Ο προσανατολισμός του πλέγματος στο δοκίμιο ήταν τέτοιος ώστε να προσδιοριστεί η εφελκυστική αντοχή του υλικού θέτοντας σε εφελκυσμό τις ίνες κατά τη διεύθυνση του πλέγματος όπου το μήκος του είναι μεγαλύτερο. Το τελικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του σύνθετου υλικού απλοποιείται σε μία καμπύλη που αποτελείται από τρεις γραμμικούς κλάδους:



Σχήμα 3.2 Απλοποιημένη καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης σύνθετου υλικού TRM

3.5 ΤΥΠΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ – ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Στην προκειμένη δημοσίευση θα μελετηθούν ορισμένες διαφορετικές μεταξύ τους διατάξεις τοποθέτησης του υλικού ενίσχυσης μαζί με το υλικό θερμομόνωσης, έτσι ώστε να κριθεί η ευμενέστερη όσον αφορά την αποδοτικότητα της ενίσχυσης. Κατασκευάζονται δοκίμια με μονόπλευρη τοποθέτηση των υλικών για τη σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση των φερουσών τοιχοποιιών με τις παρακάτω διατάξεις:

Χαρακτηρισμός δοκιμίων		
Ονοματοδοσία Δοκιμίου	Περιγραφή Υλικού	Σχηματική Απεικόνιση Υλικού
C (ή Control)	Το δοκίμιο C ή αλλιώς Control ή Masonry αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς ή ελέγχου. Δηλαδή, είναι αυτό που δεν έχει υποστεί καμία επέμβαση.	
M_2L_f	Το δοκίμιο M_2L_f αποτελείται από δύο στρώσεις πλέγματος ινών άνθρακα με αλκαλο-ενεργοποιημένο κονίαμα που έχουν τοποθετηθεί μονόπλευρα του τοίχου και πρόκειται να υποστεί δοκιμή φωτιάς (f).	
M_2L_iX	Το δοκίμιο M_2L_iX αποτελείται από δύο στρώσεις πλέγματος ινών άνθρακα με αλκαλο-ενεργοποιημένο κονίαμα που έχουν τοποθετηθεί μονόπλευρα του τοίχου και εξωτερικά μία στρώση θερμομονωτικού υλικού εξηλασμένης πολυστερίνης XPS (2cm).	
M_iX_2L	Το δοκίμιο M_iX_2L αποτελείται από τις ίδιες στρώσεις όπως το δοκίμιο M_2L_iX , αλλά με την αντίστροφη σειρά του σύνθετου υλικού και της θερμομόνωσης (2cm).	
M_2L_iR_f	Το δοκίμιο M_2L_iR_f αποτελείται από δύο στρώσεις πλέγματος ινών άνθρακα με αλκαλο-ενεργοποιημένο κονίαμα που έχουν τοποθετηθεί μονόπλευρα του τοίχου και εξωτερικά μία στρώση θερμομονωτικού υλικού πετροβάμβακα Rockwool (3cm), ενώ πρόκειται να υποστεί δοκιμή φωτιάς (f).	

Πίνακας 3.3 Ονοματολογία και περιγραφή των υλικών των δοκιμίων

4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Παρακάτω παρατίθεται η κατασκευή και ενίσχυση των δοκιμίων φέρουσας τοιχοποιίας που θα υποβληθούν σε εντός επιπέδου ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

4.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η κατασκευή των τοίχων τύπου υπερθύρων [5] πραγματοποιήθηκε εντός του χώρου του εργαστηρίου σε διαστάσεις 1300×400×85 mm. Η κατασκευή τους έγινε με τις οπτόπλινθους και το τσιμεντοκονίαμα δόμησης με πάχος αρμών ήταν 10 mm και ακολούθησε η συντήρησή τους.



Σχήμα 4.1 Κατασκευή δοκιμίων-υπερθύρων [5]

4.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Αρχικά, παρήχθη το αλκαλικά ενεργοποιημένο κονίαμα για τον εμποτισμό του ανθρακοπλέγματος και έπειτα το οργανικό Portland τσιμεντοκονίαμα thermocoat για την περίπτωση συγκόλλησης της θερμομονωτικής πλάκας XPS πάνω στην επιφάνεια του τοίχου. Αφού ζυγίστηκαν τα απαιτούμενα υλικά, αναμίχθηκαν με τη χρήση ηλεκτρικού αναδευτήρα.

Αφότου ομογενοποιήθηκε επαρκώς το μίγμα, προηγείται ρητά ο καθαρισμός της επιφάνειάς τους από σαθρά υλικά και το υπόστρωμα πρέπει να είναι σταθερό. Έπειτα, ακολουθεί η εφαρμογή του αλκαλικά ενεργοποιημένου κονιάματος στην επιφάνεια του τοίχου με τη χρήση μεταλλικής σπάτουλας με σκοπό την εξομάλυνσή του και τη συγκόλληση του ανθρακοπλέγματος. Για την τοποθέτηση του ινοπλέγματος στην ανόργανη μήτρα δημιουργούνται οδοντώσεις στο αλκαλικά ενεργοποιημένο κονίαμα για τον καλύτερο εμποτισμό του πλέγματος με το κονίαμα. Αφού τοποθετείται το ανθρακό-πλεγμα, με τη λεία πλευρά της σπάτουλας και ασκώντας μικρή πίεση σε αυτό, η επιφάνεια λειαινείται ενώ το πλέγμα εισχωρεί στη στρώση του κονιάματος. Η τελική αυτή επιφάνεια μπορεί να αποτελέσει την υπόβαση είτε για δεύτερη στρώση σύνθετου υλικού ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (TRM), είτε για εφαρμογή θερμομονωτικής πλάκας, είτε να χαρακτηριστεί ως η τελική επιφάνεια του δοκιμίου. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση που το σύνθετο αυτό υλικό (TRM) εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια της θερμομονωτικής πλάκας αντί του τοίχου.



Σχήμα 4.2 Διαδικασία τοποθέτηση της στρώσης ανθρακο-πλέγματος

Όσον αφορά την επικόλληση των θερμομονωτικών πλακών (είτε εξηλασμένης πολυστερίνης, είτε πετροβάμβακα) ως εξωτερικό στρώμα της ενίσχυσης, πριν την τοποθέτησή τους στην επιφάνεια του σεισμικά ενισχυμένου τοίχου προηγήθηκε η κοπή τους σε τμήματα όπως και το ινόπλεγμα σε διαστάσεις 1.3×0.4 m. Με δεδομένη τη λεία υπόβαση του αλκαλο-ενεργοποιημένου κονιάματος τοποθετείται επιπλέον κονίαμα στη θερμομονωτική πλάκα που αυλακώνεται και τοποθετείται στην επιφάνεια του σεισμικά ενισχυμένου τοίχου πιέζοντας ελαφρά με το χέρι, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αποφυγή δημιουργίας κενών αέρα στο κονίαμα και έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατόν πιο επίπεδη η στρώση της.



Σχήμα 4.3 Τοποθέτηση θερμομονωτικών πλακών εξηλασμένης πολυστερίνης/πετροβάμβακα

Στην περίπτωση όπου η θερμομονωτική πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) τοποθετείται ως ενδιάμεση στρώση σε επαφή με την τοιχοποιία, χρησιμοποιείται ως συγκολλητική κόλλα το οργανικό Portland τσιμεντο-κονίαμα λόγω της καλύτερης συγκολλητικής ιδιότητας που διαθέτει.



Σχήμα 4.4 Εφαρμογή στρώσης κονιάματος OPC στην τοιχοποιία πριν την τοποθέτηση πλάκας εξηλασμένης πολυστερίνης και εφαρμογή στρώσης κονιάματος AAM μετά την τοποθέτησή της

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΙΑΣ-ΔΟΚΙΜΗ ΠΥΡΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΚΛΙΒΑΝΟ

Οι δοκιμές πυρός έλαβαν χώρα στην Εργαστηριακή Μονάδα Δοκιμών Πυρός του Πανεπιστημίου Πατρών με τη μοναδική εργαστηριακή υποδομή πανελλαδικά, που μπορεί να παρέχει υποστήριξη σε θέματα έρευνας και παροχής υπηρεσιών στο πεδίο της πυραντίστασης στοιχείων. Βασικός εξοπλισμός αποτελεί ένας κατακόρυφος κλίβανος διαστάσεων $3 \times 3 \times 1.2$ m, (ύψος×μήκος×βάθος) διεξαγωγής δοκιμών πυραντίστασης δίνοντας μέσω υπολογιστή καμπύλες θερμοκρασίας – χρόνου που του ορίζονται.

Τα δοκίμια που εκτέθηκαν σε συνθήκες πυρκαγιάς ήταν τρία. Αυτά είναι τα C (Control), M_2L_f και M_2L_iR_f, τα οποία τοποθετήθηκαν παράλληλα στη θερμομονωτική βάση, ώστε η ενισχυμένη πλευρά της τοιχοποιίας να έρχεται σε επαφή με τη φωτιά, ενώ οι υπόλοιπες πλευρές παρέμειναν πολύ καλά μονωμένες.

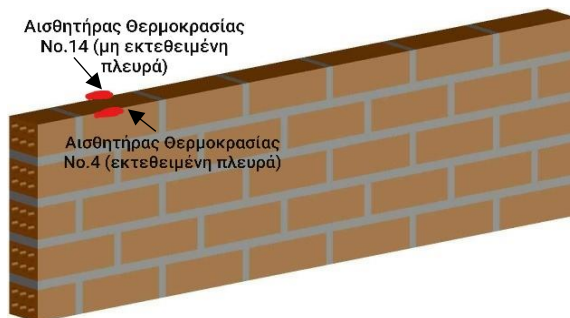
Εκτός από τους αισθητήρες θερμοκρασίας αέρα που είναι τοποθετημένοι καθ' ύψος του κλιβάνου, τοποθετήθηκαν πέντε ακόμη αισθητήρες στο ενισχυμένο δοκίμιο M_2L_f,

τέσσερις στο ενισχυμένο πάλι δοκίμιο M_2L_iR_f και άλλοι δύο στο δοκίμιο ελέγχου C (Control) στην εκτεθειμένη και μη επιφάνεια κάθε δοκιμίου και στις διεπιφάνειες TRM-τοιχοποιίας, TRM-θερμομόνωσης. Τοποθετήθηκαν έτσι προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο το μονωτικό υλικό προστάτεψε το πλέγμα ινών άνθρακα και ολόκληρο το δοκίμιο, ενώ θα παρατηρηθεί η απομένουσα αντοχή του σύνθετου υλικού, όταν αυτό έχει εκτεθεί σε συγκεκριμένες υψηλές θερμοκρασίες.

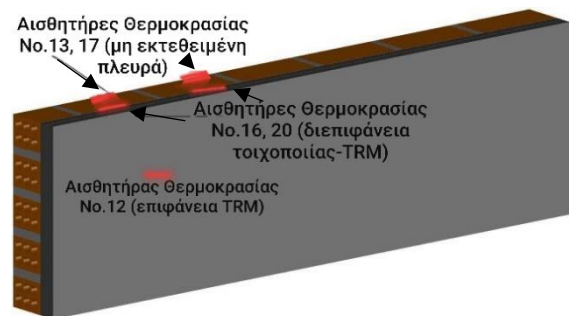


Σχήμα 5.1 Διάταξη δοκιμίων στον κλίβανο

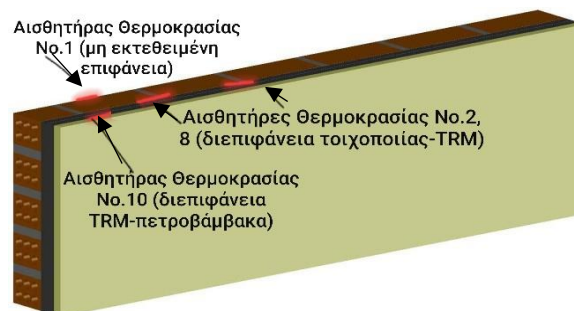
--Δοκίμιο ελέγχου C (ή Control)



--Ενισχυμένο δοκίμιο M_2L_f



--Ενισχυμένο δοκίμιο M_2L_iR_f



Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων που υποβάλλονται σε δοκιμή πυρός

Η δοκιμή πυρός διαρκεί 90 λεπτά και φτάνει ως μέγιστη θερμοκρασία τους 600°C. Η μέση θερμοκρασία που πρέπει να έχει ο κλίβανος συναρτήσσει του χρόνου προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

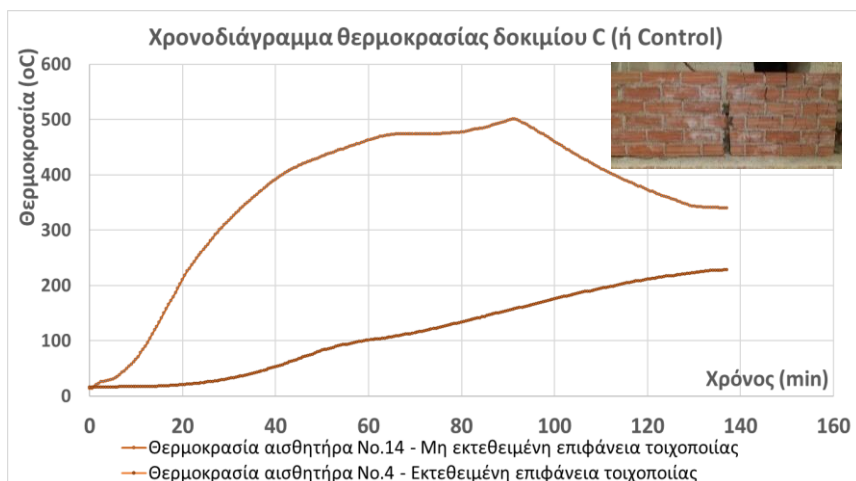
$$T = 20 * t , \quad 0 \leq t \leq 30 \text{ min} \quad (5.1)$$

$$T = 600 , \quad 30 \leq t \leq 90 \text{ min} \quad (5.2)$$

όπου, T : μέση θερμοκρασία κλιβάνου (°C)

t : χρονική στιγμή (min)

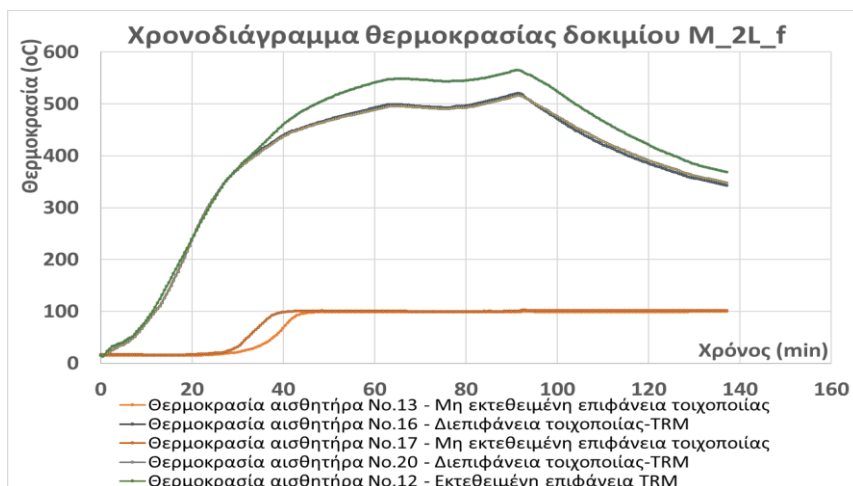
- Δοκίμιο ελέγχου C (ή Control)



Σχήμα 5.3 Καμπύλη θερμοκρασίας δοκιμίου C συναρτήσει του χρόνου

Η εκτεθειμένη επιφάνεια του δοκιμίου φτάνει τους 501°C, οπότε η τοιχοποιία απορρόφησε ένα μεγάλο ποσοστό της θερμοκρασίας του κλιβάνου, όπου αυτή κυμαίνεται στους 600°C. Μετά το πέρας των 90 λεπτών, η θερμοκρασία του δοκιμίου εμφανίζει σταδιακή πτώση έως το τέλος της καταμέτρησης. Ενώ, η μη εκτεθειμένη επιφάνεια φτάνει έως τους 229°C (λιγότερο από τη μισή θερμοκρασία της εκτεθειμένης επιφάνειας) χωρίς να εμφανίζεται πτώση της θερμοκρασίας. Κατά την εξαγωγή του δοκιμίου, αυτό αστόχησε και διαχωρίστηκε σε δύο μέλη υποδεικνύοντας τη μηδενική πλέον παραμένονσα αντοχή του.

- Ενισχυμένο δοκίμιο M_2L_f

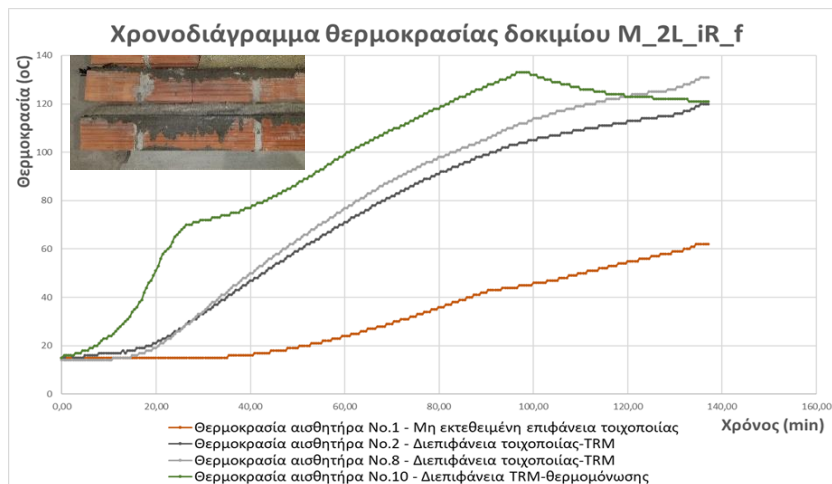


Σχήμα 5.4 Καμπύλη θερμοκρασίας δοκιμίου M_2L_f συναρτήσει του χρόνου

Η εκτεθειμένη επιφάνεια σύνθετου υλικού TRM φτάνει τους 565°C, οπότε η επιφάνεια αυτή απορροφά σχεδόν όλη τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον κλίβανο έχοντας εκμεταλλευτεί πλήρως την υγρασία του υλικού. Έπειτα, η θερμοκρασία της διεπιφάνειας τοιχοποιίας - TRM εμφανίζει θερμοκρασίες έως 521°C, πολύ κοντά στις θερμοκρασίες που έχει η επιφάνεια TRM. Έτσι, σχεδόν όση θερμοκρασία εμφανίζεται στην επιφάνεια αυτή διαπερνάται και στη διεπιφάνεια τοιχοποιίας - TRM, χάνεται η υγρασία του σύνθετου υλικού και υποβαθμίζονται οι μηχανικές του ιδιότητες. Τέλος, η μη εκτεθειμένη επιφάνεια φτάνει έως τους 103°C παρουσιάζοντας ένα αρκετά μεγάλο πλατώ με σταθερή τιμή θερμοκρασίας στους 102°C σε ολόκληρο το δεύτερο μισό της δοκιμής πυρός, καθώς εξατμίζεται όση υγρασία υπάρχει στο δοκίμιο. Σημειώνεται διαφορετική συμπεριφορά της μη εκτεθειμένης

επιφάνειας του M_2L_f από αυτή του δοκιμίου C με πιθανή αιτία τη μεγαλύτερη ποσότητα υγρασίας. Παρατηρήθηκαν εμφανείς ρηγματώσεις όσες και στο δοκίμιο ελέγχου και η ενισχυμένη πλευρά του δοκιμίου συρρικνώθηκε λόγω του αρνητικού συντελεστή θερμικής διαστολής α του άνθρακα.

- **Ενισχυμένο δοκίμιο M_2L_iR_f**



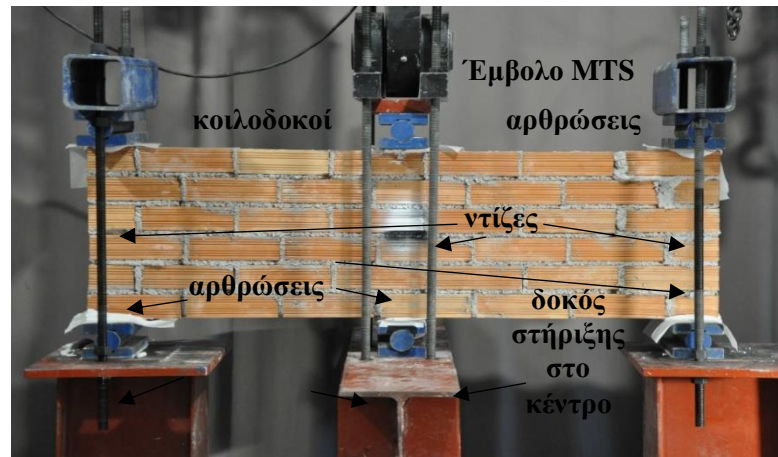
Σχήμα 5.5 Καμπύλη θερμοκρασίας δοκιμίου M_2L_iR_f συναρτήσει του χρόνου

Η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας των 133°C εμφανίζεται στη διεπιφάνεια θερμομόνωσης –TRM και άρα διαπιστώνουμε ότι η θερμομόνωση πετροβάμβακα απορροφά ένα πολύ μεγάλο κομμάτι (σχεδόν το 80%) από τη θερμοκρασία των 600°C που αναπτύσσεται στον κλίβανο. Έπειτα, η θερμοκρασία της διεπιφάνειας τοιχοποιίας - TRM εμφανίζει θερμοκρασίες έως 131°C, αρκετά κοντά στις θερμοκρασίες που έχει η διεπιφάνεια θερμομόνωσης –TRM και έτσι χάνεται ένα μεγάλο μέρος της υγρασίας του σύνθετου υλικού. Τέλος, η μη εκτεθειμένη επιφάνεια τοιχοποιίας φτάνει τους 62°C χωρίς να εμφανίζεται κάποια πτώση της θερμοκρασίας, οπότε διατηρεί σε ένα καλό επίπεδο τα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Το δοκίμιο δεν εμφάνισε ρηγματώσεις στη μη εκτεθειμένη του πλευρά, οπότε λόγω του πετροβάμβακα άντεξε στις υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να επηρεασθεί τόσο η εικόνα του, αλλά και η αντοχή του. Σε κάποια ελάχιστα σημεία παρατηρήθηκε επίσης η αποκόλληση της θερμομόνωσης.

6. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

6.1 ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Τα δοκίμια υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη τριών σημείων. Οι δοκιμές αυτές προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των υπερθύρων της τοιχοποιίας μίας κατασκευής όταν αυτά υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε άκαμπτο μεταλλικό πλαίσιο στο οποίο συνδέθηκε κατακόρυφο υδραυλικό έμβολο ‘MTS’ με ρυθμό επιβολής μετακίνησης 0.05 mm/sec για τον 1^ο κύκλο, οι κύκλοι 3 έως 5 είχαν ρυθμό 0.1 mm/sec ενώ στους υπόλοιπους κύκλους ο ρυθμός ήταν ίσος με 0.5 mm/sec.

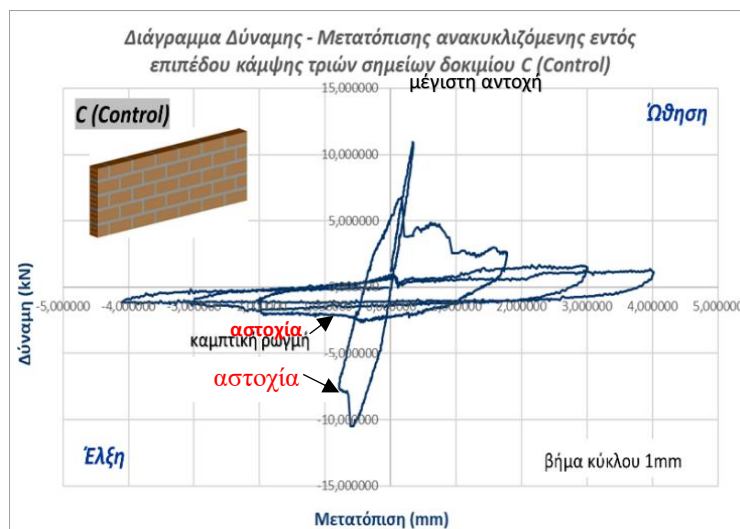


Σχήμα 6.1 Πειραματική διάταξη για την προσομοίωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης εντός επιπέδου κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια τύπου υπερθύρου

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καταγραφών δύναμης (kN)-μετακίνησης (mm).

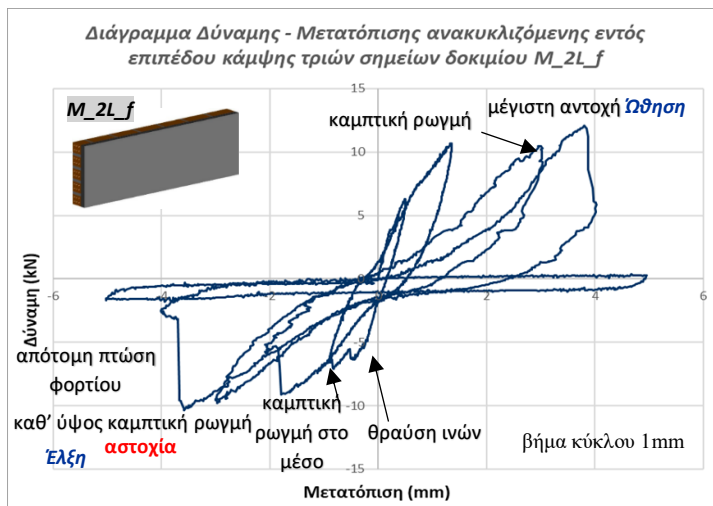
- Δοκίμιο ελέγχου C (ή Control)



Σχήμα 6.2 Το δοκίμιο ελέγχου C το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη τριών σημείων και οι αστοχίες του

Η εμφάνιση της πρώτης ρωγμής έγινε τη χρονική στιγμή της μέγιστης έλξης της τοιχοποιίας κατά τον 1^ο κύκλο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Εκείνη τη στιγμή συνέβη και η αστοχία αφού ακολούθησε πτώση του φορτίου άνω του 20%. Η κατακόρυφη δύναμη του εμβόλου ήταν -10.52 kN στο σημείο μέγιστης έλξης με μετατόπιση προς την αρνητική φορά -0.58 mm. Παρατηρήθηκε η επέκταση των ρωγμών και η εμφάνιση νέων μικρο-ρωγμών στους οπτόπλινθους και στο κονίαμα δόμησης στους επόμενους κύκλους, ενώ στο τέλος το δοκίμιο διαχωρίστηκε στα δύο και δεν ήταν δυνατόν να παραλάβει επιπλέον φορτίο.

- Δοκίμιο M_2L_f

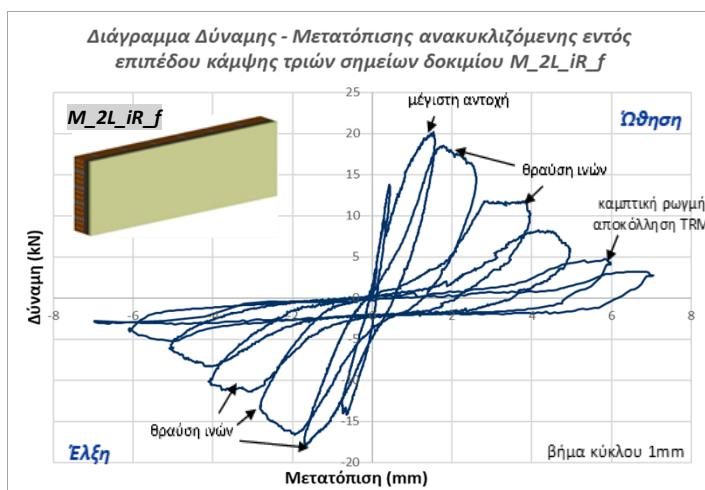


Σχήμα 6.2 Το δοκίμιο M_2L_f το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη τριών σημείων και οι αστοχίες του

Η απότομη πτώση του φορτίου τη χρονική στιγμή της μέγιστης έλξης του 4^{ου} κύκλου ήταν αυτή που σηματοδότησε και την αστοχία του δοκιμίου σε φορτίο -10.34 kN και μετατόπιση -3.58 mm, αφού είχαν ήδη προκληθεί καμπτικές ρωγμές, θραύση ινών και η διάνοιξη των ρωγμών από τους προηγούμενους κύκλους. Ενώ, το μέγιστο φορτίο στο οποίο άντεξε η τοιχοποιία ήταν 12.07 kN με αντίστοιχη θετική μετατόπιση 3.80 mm.

Κατά τη μεταφορά του δοκιμίου εκτός της διάταξης παρατηρήθηκε ότι η τοιχοποιία είχε διαχωριστεί στο σημείο καμπτικής ρωγμής, αλλά τη συγκρατούσε ο μανδύας TRM. Επίσης, σημειώνεται ότι οι ίνες εκμεταλλεύθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό καθώς στη μεγάλη καμπτική ρωγμή του δοκιμίου είχαν θραυτεί καθ' ύψος.

- Δοκίμιο M_2L_iR_f



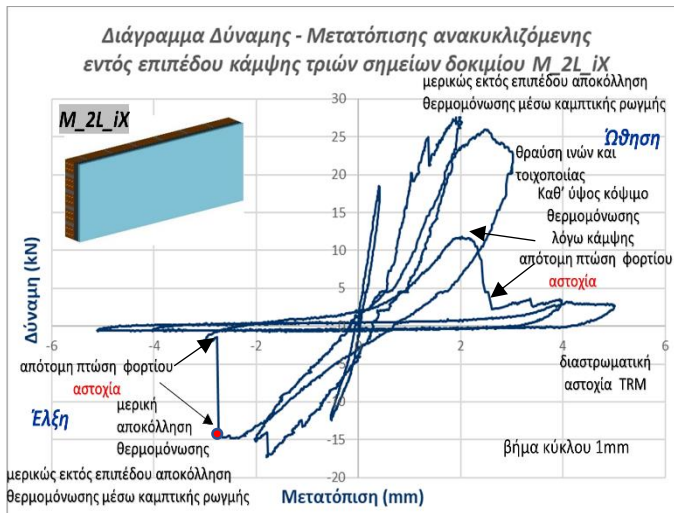
Σχήμα 6.3 Το δοκίμιο M_2L_iR_f το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη τριών σημείων και οι αστοχίες του

Το δοκίμιο M_2L_iR_f εμφάνισε τη μέγιστη αντοχή του στο σημείο μέγιστης ώθησης του 2^{ου} κύκλου με μέγιστη κατακόρυφη δύναμη 20.22 kN και θετική μετατόπιση 1.53 mm. Στη συνέχεια μέχρι τον 5^ο κύκλο πραγματοποιείται θραύση ινών και στον 6^ο εμφανίζεται μία καθ' ύψος καμπτική ρωγμή στο μέσο. Συμπεραίνεται ότι η αστοχία μέσω της θραύσης των ινών ήταν σταδιακή κατά την διάρκεια του 3^{ου} κύκλου φόρτισης όπου και ξεκίνησε. Όμως, μπορεί

να θεωρηθεί ως στιγμή αστοχίας εκείνη όπου το φορτίο θα έχει μειωθεί κατά 20% συγκριτικά με τη μέγιστη τιμή αντοχής του. Αφού, το μέγιστο φορτίο είναι 20.22 kN, η αστοχία προσδιορίζεται περίπου στα 16.20 kN με μετακίνηση 2.45 mm.

Τέλος, κατά τη μεταφορά του δοκιμίου εκτός της διάταξης παρατηρήθηκε ότι η τοιχοποιία είχε ρηγματωθεί διαμπερώς, ενώ υπήρξε και εκτός επιπέδου κάμψη με μετατόπιση της τάξεως 0.7 mm και ρωγμές ποικίλων ανοιγμάτων, ενώ ο διαχωρισμός της τοιχοποιίας συγκρατούνταν από τον μανδύα ενίσχυσης. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι ίνες εκμεταλλεύθηκαν κατά 100% καθώς στη μεγάλη καμπτική ρωγή του δοκιμίου είχαν θραυτεί καθ' ύψος εντελώς.

- Δοκίμιο M_2L_iX

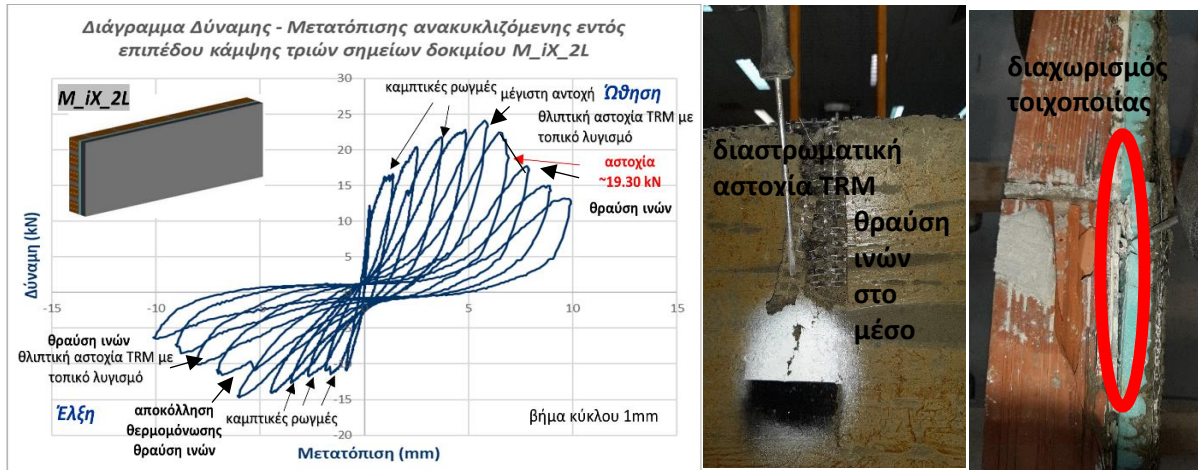


Σχήμα 6.4 Το δοκίμιο M_2L_iX το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη τριών σημείων και οι αστοχίες του

Ως αστοχία της τοιχοποιίας θεωρείται η εντός επιπέδου αστοχία μέσω καμπτικής ρωγμής που δημιουργείται από τον 3^ο κιόλας κύκλο φόρτισης μέσω του κατακόρυφου κοψίματος της θερμομόνωσης XPS, της θραύσης ινών λόγω κάμψης αλλά και της θλιπτικής αστοχίας του TRM. Υπήρξαν, όμως, και εκτός επιπέδου αστοχίες, όπως η μερική αποκόλληση της θερμομόνωσης σχεδόν κεντρικά της τοιχοποιίας λόγω της καμπτικής ρωγμής, που συνέβη αφού φτάνει τη μέγιστη αντοχή του κατά τον 2^ο κύκλο αλλά και στον 3^ο, η θραύση των οπτόπλινθων και του κονιάματος δόμησης της τοιχοποιίας, αλλά και η θλιπτική αστοχία του TRM κατά τον 3^ο κύκλο φόρτισης. Επίσης, η εξωτερική στρώση αλκαλοενεργοποιημένου κονιάματος-πλέγματος με τις επόμενες δύο στρώσεις αλκαλοενεργοποιημένου κονιάματος και πλέγματος-αλκαλοενεργοποιημένου κονιάματος διαχωρίστηκαν (διαστρωματική αστοχία).

Η απότομη πτώση του φορτίου κατά τον 3^ο κύκλο έγινε σε φορτίο -14.47 kN όπου και επήλθε η αστοχία. Ενώ, το μέγιστο φορτίο στο οποίο άντεξε η τοιχοποιία ήταν στη θέση της μέγιστης ώθησης του 2^{ου} κύκλου με μέγιστη κατακόρυφη δύναμη 27.60 kN και αντίστοιχη θετική μετατόπιση 1.90 mm. Μετά το πέρας της δοκιμής παρατηρήθηκε ότι ολόκληρη η ενισχυμένη τοιχοποιία είχε διαχωριστεί σε δύο τμήματα.

• Δοκίμιο **M_iX_2L**



Σχήμα 6.5 Το δοκίμιο M_iX_2L το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου κάμψη τριών σημείων και οι αστοχίες του

Το δοκίμιο M_iX_2L εμφάνισε καμπτικές ρωγμές έως και τον 5^ο κύκλο φόρτισης. Συμπεραίνεται ότι η αστοχία των ινών ήταν σταδιακή μετά τον 6^ο κύκλο φόρτισης όπου έκανε την εμφάνισή της μέσω της αποκόλλησης της θερμομόνωσης και της θραύσης ινών. Οπότε, θεωρείται ως στιγμή αστοχίας εκείνη όπου το φορτίο θα έχει μειωθεί κατά 20% από τη μέγιστη τιμή αντοχής του. Το μέγιστο φορτίο που εμφανίσθηκε στον 6^ο κύκλο είναι 24.10 kN, οπότε η αστοχία προσδιορίζεται περίπου στα 19.30 kN μετατόπισης 6.80 mm. Στους επόμενους κύκλους παρατηρήθηκε μία εκτός επιπέδου αστοχία μέσω της θλιπτικής αστοχίας του TRM μετά από τοπικό λυγισμό και θραύση ινών.

Όσον αφορά τη θλιπτική αστοχία του TRM, παρατηρήθηκε ότι είχαν αποκολληθεί κομμάτια από την εσωτερική αλλά και την εξωτερική διεπιφάνεια του αλκαλικά ενεργοποιημένου κονιάματος με το ανθρακόπλεγμα. Αυτό συνέβη λόγω της θλίψης της εσωτερικής και εξωτερικής στρώσης που διαχωρίστηκαν από τον μανδύα και αφορά τη διαστρωματική αστοχία, ενώ η μη ενισχυμένη πλευρά της τοιχοποιίας είχε διαμπερείς καθ' ύψος ρωγμές.

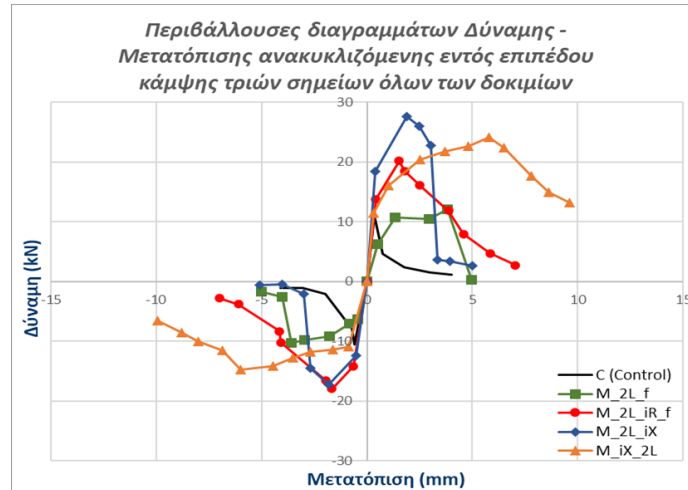
6.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Δοκίμιο	Μέγιστη αντοχή				ΑΣΤΟΧΙΑ					
	Pmax (kN)	u (mm)	MR (kNm)	Τρόπος αστοχίας	Φορά	Pf (kN)	uf (mm)	Κύκλος αστοχίας	Ενέργεια αστοχίας (kNmm)	
C	10.97	1ος	0.34	3.15	Καμπτική ρωγμή	Έλξη	-10.52	-0.58	1ος	5.77
M_2L_f	12.07	4ος	3.80	3.47	Θραύση ινών	Έλξη	-10.34	-3.58	4ος	74.13
M_2L_iR_f	20.22	2ος	1.53	5.81	Θραύση ινών	Ώθηση	16.20	2.45	3ος	78.05
M_2L_iX	27.60	2ος	1.90	7.94	Εκτός επιπέδου κάμψη	Έλξη	-17.25	-1.80	3ος	86.42
M_iX_2L	24.10	6ος	5.80	6.93	Θλιπτική αστοχία TRM	Ώθηση	19.30	6.80	7ος-8ος	324.42

Πίνακας 6.1 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

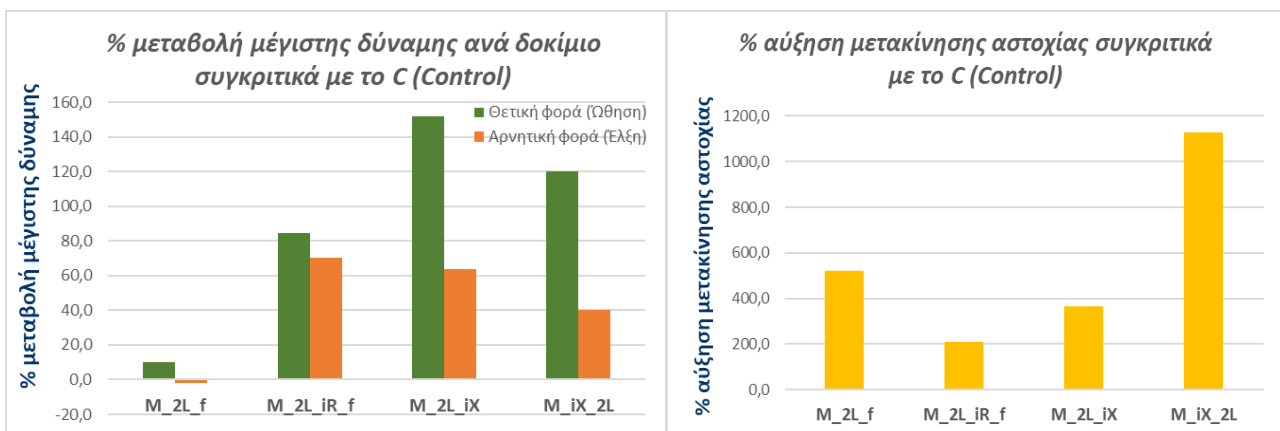
7. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται συνολικά όλες οι περιβάλλουσες των κύκλων φόρτισης των διαγραμμάτων δύναμης – μετατόπισης που παρουσιάστηκαν για όλα τα δοκίμια. Γίνεται αντιληπτό ότι τα ενισχυμένα δοκίμια είχαν όλα μεγαλύτερο φορτίο αντοχής αλλά και παραμόρφωση αστοχίας από το δοκίμιο αναφοράς. Επίσης, παρατίθενται επιπλέον διαγράμματα που απεικονίζουν την ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης δύναμης που λαμβάνει κάθε δοκίμιο αλλά και της αντίστοιχης μεταβολής της μετακίνησης αστοχίας.



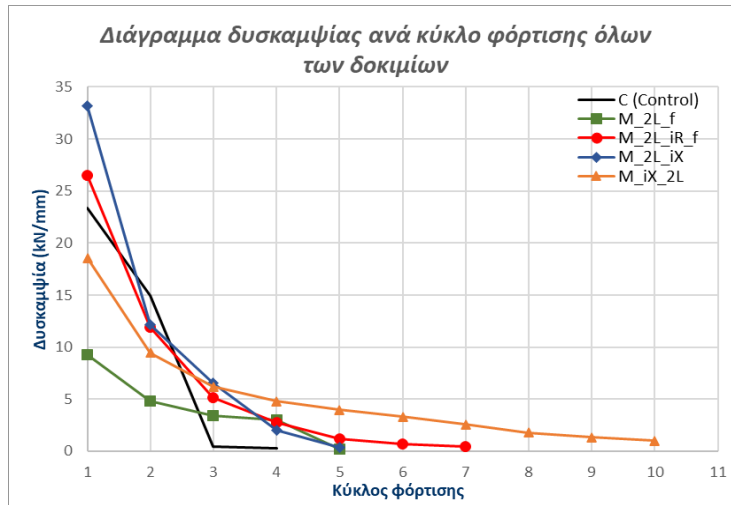
Σχήμα 7.1 Συγκριτικό διάγραμμα περιβάλλουσων καμπυλών όλων των δοκιμίων

Η μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης δύναμης των δοκιμίων μετά την ενίσχυση για τη θετική φορά του εμβόλου φαίνεται να είναι αυτή του ενισχυμένου τοίχου M_2L_iX με αύξηση ίση με 151.73%. Ενώ, η αντίστοιχη αύξηση για την αρνητική φορά του εμβόλου ισούται με 70.48% και αντιστοιχεί σε αυτή του δοκιμίου M_2L_iR_f σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς C (Control). Επίσης, αξίζει να σχολιασθεί ότι η αύξηση της μέγιστης δύναμης στην ώθηση του δοκιμίου M_2L_f συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς αλλά και με την αντίστοιχη αύξηση των υπόλοιπων δοκιμίων ήταν αρκετά μικρή (10.05%). Ενώ, κατά την αρνητική φορά του εμβόλου η μέγιστη δύναμη όχι μόνο δεν αυξάνεται, αλλά μειώνεται κατά ένα μικρό ποσοστό του 1.71%. Ενώ, μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση που υπήρξε όσον αφορά τη μετακίνηση αστοχίας εμφανίστηκε στο δοκίμιο M_iX_2L, το οποίο είχε αύξηση 1124.14%.



Σχήμα 7.2 Συγκριτικά ραβδογράμματα που δείχνουν την ποσοστιαία μεταβολή της μέγιστης δύναμης και της μετακίνησης αστοχίας κάθε δοκιμίου από τις αντίστοιχες του δοκιμίου ελέγχου

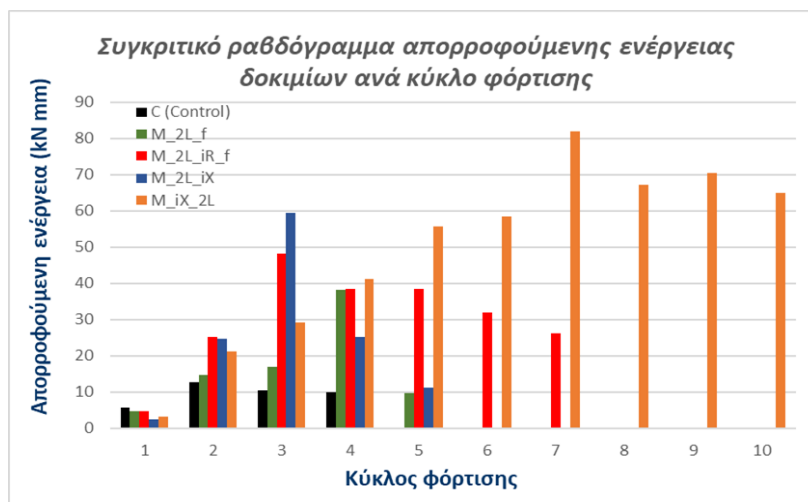
Παρακάτω παραδίδεται συγκριτικό διάγραμμα δυσκαμψίας όλων των δοκιμών ανά κύκλο φόρτισης:



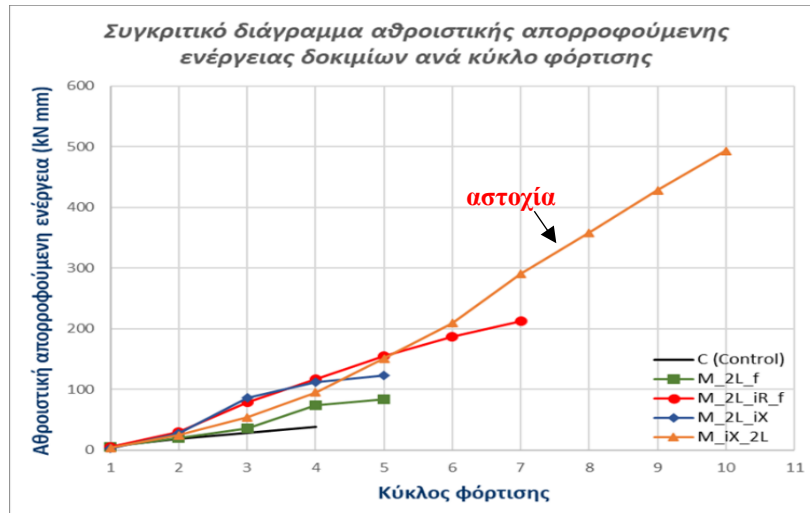
Σχήμα 7.3 Συγκριτικό διάγραμμα δυσκαμψίας όλων των δοκιμών ανά κύκλο φόρτισης

Συγκριτικά με το δοκίμιο C, φαίνεται ότι η μέγιστη αύξηση στη δυσκαμψία δίνεται από το ενισχυμένο δοκίμιο M_2L_iX και αμέσως μετά από το M_2L_iR_f, ενώ τη μικρότερη δυσκαμψία την προσέφερε το δοκίμιο M_2L_f. Επιπλέον, οι αρχικές δυσκαμψίες των δοκιμών M_2L_f και M_iX_2L έως και τον 2^ο κύκλο είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του δοκιμίου αναφοράς C παρόλο που αυτό αστόχησε από τον 1^ο κιάλας κύκλο φόρτισης. Αυτό το γεγονός αποδεικνύει την καταστροφική επίδραση της φωτιάς τέτοιου βεληνεκούς στη μηχανική ακεραιότητα μίας σεισμικά ή/και ενεργειακά ενισχυμένης τοιχοποιίας. Ενώ, κατά τον 2^ο κύκλο η δυσκαμψία του δοκιμίου ελέγχου C ξεπερνά τις δυσκαμψίες όλων των ενισχυμένων δοκιμών, ακόμα και αυτών που δεν υποβλήθηκαν σε συνθήκες πυρκαγιάς. Παρ' όλ' αυτά, από τον 3^ο κύκλο φόρτισης και έπειτα οι δυσκαμψίες των παραπάνω δοκιμών ανά κύκλο είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του C. Όμως, τα συγκεκριμένα δοκίμια χάνουν σταδιακά και πιο ομαλά τη δυσκαμψία τους ανά κύκλο φόρτισης σε αντίθεση με τα δοκίμια M_2L_iX και M_2L_iR_f.

Παρακάτω, παρατίθενται συγκριτικό ραβδόγραμμα με την απορροφούμενη ενέργεια που δίδεται σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά για κάθε κύκλο ανακυκλιζόμενης φόρτισης καθώς και αντίστοιχο ραβδόγραμμα με την αθροιστική απορροφούμενη ενέργεια.



Σχήμα 7.4 Συγκριτικό ραβδόγραμμα απορροφούμενης ενέργειας όλων των δοκιμών ανά κύκλο φόρτισης



Σχήμα 7.5 Συγκριτικό ραβδόγραμμα αθροιστικής απορροφούμενης ενέργειας όλων των δοκιμών ανά κύκλο φόρτισης

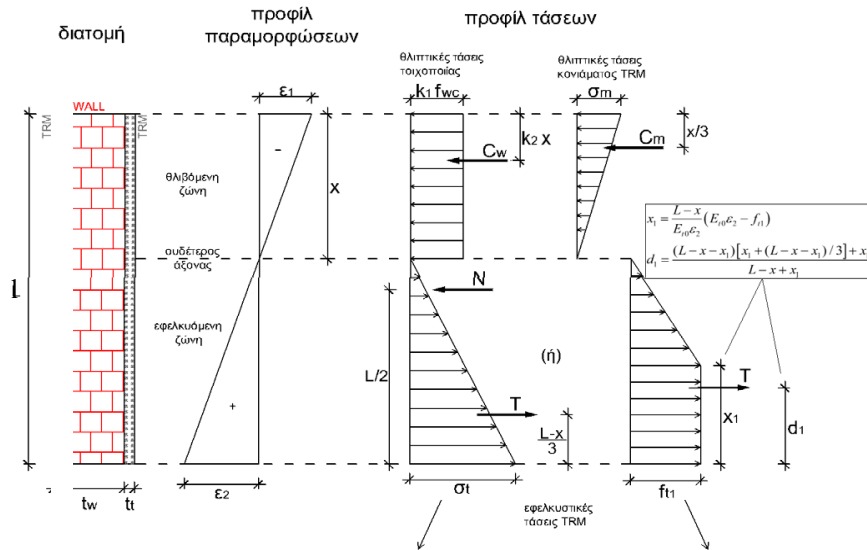
Παρατηρείται ότι η απορροφούμενη ενέργεια των δοκιμών φαίνεται να είναι παραπλήσια για όλα μόνο κατά τον 1^ο και οριακά για τον 2^ο κύκλο φόρτισης, ενώ η μη ενισχυμένη τοιχοποιία έχει τη μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια. Εμφανώς στον 3^ο κύκλο φόρτισης οι τιμές απορροφούμενης ενέργειας των δοκιμών διαφέρουν και η υψηλότερη είναι αυτή του δοκιμίου M_2L_iX και έπεται το δοκίμιο M_2L_iR_f. Αξίζει να σχολιασθεί ότι στον 2^ο, 3^ο και 4^ο κύκλο το δοκίμιο αναφοράς C (Control) ανέδειξε σχεδόν ίδιες τιμές και στο τέλος του 4^{ου} αυτού κύκλου η δοκιμή του έλαβε τέλος.

Στον 5^ο κύκλο φόρτισης τα δοκίμια M_2L_f και M_2L_iX απορροφούν αρκετά λιγότερη ενέργεια συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτό συνέβη γιατί έχει επέλθει η αστοχία τους προηγουμένως και ο 5^{ος} κύκλος αποτελεί τον τελευταίο κύκλο της δοκιμής τους. Οπότε, συνεχίζοντας στον 6^ο κύκλο φόρτισης πλέον μόνο με τα δοκίμια M_2L_iR_f και M_iX_2L, περισσότερη ενέργεια απορροφήθηκε από τον ενισχυμένο τοίχο M_iX_2L. Αντίθετα, το δοκίμιο M_2L_iR_f παρουσίασε σχεδόν τη μισή τιμή από αυτή που απορρόφησε ο τοίχος M_iX_2L. Στον 7^ο κύκλο φόρτισης παρατηρήθηκε αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας του δοκιμίου M_iX_2L και μείωση της αντίστοιχης τιμής του δοκιμίου M_2L_iR_f. Τέλος, κατά τον 8^ο, 9^ο και 10^ο κύκλο φόρτισης το μοναδικό δοκίμιο που ήταν ικανό να συνεχίσει στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση ήταν το M_iX_2L και οι τιμές της απορροφούμενης ενέργειας κατά τους τρεις αυτούς κύκλους ήταν αρκετά κοντά μεταξύ τους.

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αστοχία του δοκιμίου M_iX_2L εκδηλώθηκε σε φορτίο περίπου 19.30 kN μεταξύ του 7ου και 8ου κύκλου φόρτισης. Όμως, παρατηρείται από το διάγραμμα της αθροιστικής απορροφούμενης ενέργειας ότι παρά την αστοχία του δοκιμίου σε ενδιάμεσο σημείο των παραπάνω κύκλων το δοκίμιο συνέχισε να απορροφά ενέργεια με τον ίδιο αυξανόμενο ρυθμό όπως πριν την αστοχία. Αντίθετα, τα υπόλοιπα ενισχυμένα δοκίμια μετά την αντίστοιχη αστοχία τους συνέχισαν να απορροφούν ενέργεια αλλά σε μικρότερη ποσότητα, οπότε η αθροιστική απορροφούμενη ενέργεια αυξανόταν αλλά με μικρότερο πλέον ρυθμό.

8. ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται οι θεωρητικές τιμές των ροπών αντοχής σύμφωνα με τις σχέσεις ισορροπίας της ενισχυμένης τοιχοποιίας για αστοχία TRM:



Σχήμα 8.1 Ανάλυση διατομής ενισχυμένης τοιχοποιίας με μία στρώση TRM ($n = 1$)

Για κάθε περίπτωση ισχύει η εξίσωση ισοροπίας:

$$C_w + C_m - T = N \quad (8.1)$$

,όπου $N=0$ για δοκίμια τύπου υπερθύρου.

$$\frac{\varepsilon_1}{x} = \frac{\varepsilon_2}{l-x} \quad (8.2)$$

Για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής εξετάζονται ως γνωστόν οι εξής περιπτώσεις:

➤ **1η Περίπτωση: Εφελκυστική αστοχία TRM λόγω θραύσης ινών**

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει για το TRM: $\varepsilon_2 = \varepsilon_{tu} > \varepsilon_{t2}$ (8.3)

$$\sigma_t = f_t \quad (8.4)$$

και για τη τοιχοποιία: $\varepsilon_1 < \varepsilon_{w1}$ (8.5)

Άρα, έχουμε τριγωνικό προφίλ τάσεων στο TRM και από την εξίσωση (8.19) προκύπτει:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2}{l-x} x = \frac{x}{l-x} \varepsilon_{tu} \quad (8.6)$$

Από τις εξισώσεις (8.11) και (8.12) βρίσκονται οι συντελεστές k_1 και k_2 υποθέτοντας ότι ισχύει $\varepsilon_w \leq \varepsilon_{w1}$ κι αν απορριφθεί εν τέλει υπολογίζονται οι συντελεστές μέσω των σχέσεων που ισχύουν για την περίπτωση που $\varepsilon_{w1} \leq \varepsilon_w \leq \varepsilon_{wu}$.

Οι τάσεις και οι δυνάμεις κάθε υλικού δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_w = k_1 f_{wc} \quad (8.7)$$

$$C_w = \sigma_w \times t_w \quad (8.8)$$

$$\sigma_m = \varepsilon_1 E_m \quad (8.9)$$

$$C_m = 0.5 \sigma_m \times n t_m \quad (8.10)$$

$$\sigma_t = f_t \quad (8.11)$$

$$T = 0.5 \sigma_t (l-x) n t_t \quad (8.12)$$

Από την εξίσωση (8.18) βρίσκεται η τιμή του ύψους της θλιβόμενης ζώνης.

Γίνεται έλεγχος των υποθέσεων για τις παραμορφώσεις και αφού επαληθεύονται, υπολογίζονται οι μοχλοβραχίονες 'd' των εσωτερικών δυνάμεων C_w , C_m και T ως προς το μέσο της διατομής.

$$d_w = 1/2 - k_2 x \quad (8.13)$$

$$d_m = 1/2 - x/3 \quad (8.14)$$

$$d_t = 1/2 - (l-x)/3 \quad (8.15)$$

Η ροπή αντοχής δίνεται τελικά από τη σχέση:

$$M_R = C_w d_w + C_m d_m + T d_t \quad (8.16)$$

➤ **2η Περίπτωση: Θλιπτική αστοχία τοιχοποιίας**

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει για την τοιχοποιία: $\varepsilon_1 = \varepsilon_{wu}$ (8.17)

Από την εξίσωση (8.19) προκύπτει:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1(1-x)/x \quad (8.18)$$

Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση, από τις εξισώσεις (8.11) και (8.12) βρίσκονται οι συντελεστές k_1 και k_2 .

Οι θλιπτικές τάσεις και οι δυνάμεις της τοιχοποιίας και του κονιάματος ενίσχυσης δίνονται από τις σχέσεις (8.7)-(8.10), ενώ για την κατανομή των εφελκυστικών τάσεων του σύνθετου υλικού TRM υφίστανται οι εξής περιπτώσεις:

$\varepsilon_2 \leq \varepsilon_{t1}$: τριγωνική κατανομή των τάσεων, μέτρο ελαστικότητας E_1

$$\sigma_t = E_1 \varepsilon_2 \quad (8.19)$$

$$T = 0.5 \sigma_t (1-x) n t_t \quad (8.20)$$

$\varepsilon_{t1} \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{t2}$: τραπεζοειδής κατανομή των τάσεων

$$T = \frac{l-x+x_1}{2} f_{t1} n t_t \quad (8.21)$$

$\varepsilon_2 \geq \varepsilon_{t2}$: τριγωνική κατανομή των τάσεων, μέτρο ελαστικότητας E_3

$$\sigma_t = E_3 \varepsilon_2 \quad (8.22)$$

$$T = 0.5 \sigma_t (1-x) n t_t \quad (8.23)$$

Οπότε τώρα από την εξίσωση (8.18) υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, αφού υποτεθεί μία από τις παραπάνω κατανομές και επαληθευτεί ότι αυτή ισχύει.

Από την εξίσωση (8.34) υπολογίζεται η παραμόρφωση της ακραίας εφελκυστικής ίνας, ε_2 . Ελέγχεται αν επαληθεύεται η υπόθεση που έγινε για το ε_2 . Εφόσον βρεθεί λύση, υπολογίζονται οι μοχλοβραχίονες των εσωτερικών δυνάμεων από τις σχέσεις (8.13)-(8.14) και για τριγωνική κατανομή τάσεων:

$$d_t = l/2 - (1-x)/3 \quad (8.24)$$

,ενώ για τραπεζοειδή κατανομή τάσεων:

$$d_t = l/2 - d_1 \quad (8.25)$$

Η ροπή αντοχής θα δίνεται πάλι από τη σχέση (8.16).

❖ **Διατμητική αστοχία**

Η μέγιστη δύναμη που παραλαμβάνεται από την ενισχυμένη τοιχοποιία είναι:

$$V_R = \min(V_{R,w} + V_{R,t}, V_{R,max}) \quad (8.26)$$

$$V_{R,w} = \tau_u t l \quad (8.27)$$

$$V_{R,t} = 0.9 l (n t_t) f_t \quad (8.28)$$

$$\frac{V_{R,max}}{t l} = 2 \quad (8.29)$$

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ				
Δοκίμιο	Μέγιστη διατμητική δύναμη $V_{R,max}$ (kN)	Διατμητική δύναμη που παραλαμβάνει η τοιχοποιία $V_{R,w}$ (kN)	Διατμητική δύναμη που παραλαμβάνει το TRM $V_{R,t}$ (kN)	Διατμητική αντοχή V_R (kN)
M_2L_iX	68	32.4	39.2	68
M_iX_2L				

Πίνακας 8.1 Αποτελέσματα θεωρητικού ελέγχου διάτμησης δοκιμίων σε συνθήκες περιβάλλοντος

Οι παραδοχές στις οποίες στηρίζεται το τροποποιημένο προσομοίωμα που περιγράφει τη συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκιμίων της παρούσας εργασίας σε εντός επιπέδου κάμψη εμπεριέχουν τις παρακάτω παραδοχές:

- Επιπεδότητα διατομών
- Συμβιβαστό των παραμορφώσεων

- Μηδενική εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας και του κονιάματος ενίσχυσης
- Ομοιόμορφη κατανομή του οπλισμού (ίνες) στο μήκος της διατομής
- Πλήρης συνεργασία ινών και κονιάματος ενίσχυσης
- Αγνόηση των θερμομονωτικών πλακών και του κονιάματος επικόλλησής τους
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν αν ο μανδύας του ΙΑΜ είναι η εσωτερική ή η εξωτερική στρώση ενίσχυσης της τοιχοποιίας, καθώς θεωρείται πλήρης μεταφορά των τάσεων από την τοιχοποιία στον μανδύα ενίσχυσης δια μέσου του θερμομονωτικού υλικού
- Αγνόηση της εκκεντρότητας των ινών για τη μονόπλευρη ενίσχυση
- Ανάλυση ορθών τάσεων λόγω κάμψης μόνο από τις ίνες στην κατακόρυφη διεύθυνση
- Ανάλυση διατμητικών τάσεων μόνο από τις ίνες στην οριζόντια διεύθυνση
- Πιθανές μορφές αστοχίας: (α) Θλιπτική αστοχία τοιχοποιίας ή (β) εφελκυστική αστοχία TRM ή (γ) διατμητική αστοχία
- Για τον έλεγχο κάμψης γίνεται υπόθεση καθαρά καμπτικής συμπεριφοράς του στοιχείου, ενώ για τον έλεγχο σε διάτμηση γίνεται αντίστοιχα υπόθεση ύπαρξης καθαρά διατμητικής συμπεριφοράς. Με αυτό τον τρόπο αγνοούνται φαινόμενα όπως η λειτουργία θόλου ή διαγώνιου θλιπτήρα, καθώς και η αλληλεπίδραση των ορθών και διατμητικών τάσεων στην τελική αντοχή του στοιχείου.

Για κάθε ενισχυμένο δοκίμιο και εξάγονται τα εξής αποτελέσματα για την καμπτική αντοχή τους:

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΡΟΠΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ					
Δοκίμιο	Ροπές αντοχής (kNm)				Σύγκριση τιμών
	Πείραμα		Θεωρία		Διαφορά θεωρητικής τιμής από την πειραματική (%)
	max τιμή	μορφή αστοχίας	τιμή	μορφή αστοχίας	
M_2L_iX	7.94	Θλιπτική αστοχία τοιχοποιίας	1.71	Εφελκυστική αστοχία TRM	364%
M_iX_2L	6.93	Εφελκυστική αστοχία TRM			305%

Πίνακας 8.2 Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής αστοχίας σε κάμψη

Η θεωρητική ροπή αντοχής τους προκύπτει πολύ μικρότερη συγκριτικά με τις πειραματικές. Η μεγάλη αυτή απόκλιση υπάρχει εξαιτίας όλων των απλοποιητικών παραδοχών που έγιναν εξαρχής, της αβεβαιότητας της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών και της στατικής συμπεριφοράς των δοκιμίων, αλλά και των ατελειών της προσομοίωσης στήριξης των δοκιμίων.

Όμως, ο σημαντικότερος λόγος αυτής της διαφοράς των ροπών αντοχής οφείλεται στην παραδοχή της καθαρής κάμψης των δοκιμίων βάσει της οποίας γίνεται ο αναλυτικός έλεγχος κάμψης. Για δοκίμια τύπου υπερθύρου παρουσιάζεται το φαινόμενο της λειτουργίας θόλου. Όμως, τα πειραματικά δοκίμια αναμένεται να συμπεριφερθούν έτσι ώστε να έχουν αποτελέσματα που καθιστούν καμπτική αλλά και διατμητική τη συμπεριφορά τους αφού προκύπτει $l < a_s = M/Vh = L/2h = 1.43 < 2$ και διαφέρει από την καθαρά καμπτική συμπεριφορά. Το μεγάλο ύψος του συντελεί στη μεταφορά τάσεων από το σημείο όπου ασκείται το φορτίο P απευθείας προς τις στηρίξεις της δοκού. Το γεγονός αυτό μετατρέπει τη συμπεριφορά του στοιχείου αυτού ευμενέστερη συγκριτικά με μία δοκό μικρότερου ύψους με καθαρά καμπτική συμπεριφορά. Αρκεί μόνο η διατμητική αντοχή του να είναι επαρκής ώστε να μην αστοχήσει λόγω τέμνουσας.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Όσον αφορά όλα τα δοκίμια που ενισχύθηκαν σεισμικά με μανδύα αλκαλο-ενεργοποιημένων σύνθετων υλικών και ανθρακο-πλέγματος (TRM), παρατηρείται ότι **σε όλα τα δοκίμια, εκτός του M_2L_f που ενισχύθηκε μόνο σεισμικά και υποβλήθηκε σε συνθήκες φωτιάς, αυξήθηκε κατά μεγάλο ποσοστό η αντοχή τους**. Τη μεγαλύτερη αύξηση εμφάνισε το δοκίμιο M_2L_iX κατά ποσοστό 151.73% και ακολούθησε το δοκίμιο M_iX_2L με 119.79% αύξηση. Δηλαδή, οι ενισχυμένοι τοίχοι που βρίσκονταν σε συνθήκες περιβάλλοντος παρουσίασαν αύξηση της αντοχής τους σε σχέση με το δοκίμιο ελέγχου πάνω από 100%. Αντίθετα, το δοκίμιο M_2L_f εμφάνισε αύξηση μόνο κατά 10.05% και παράλληλα μία μικρή μείωση της αντοχής κατά την έλξη του τοίχου από το έμβολο. Αυτό σημαίνει ότι ένας σεισμικά ενισχυμένος τοίχος με αλκαλικά ενεργοποιημένα σύνθετα υλικά ο οποίος έχει εκτεθεί σε πυρκαγιά θερμοκρασίας της τάξεως 600°C έχει την ίδια σχεδόν μηχανική αντοχή με έναν άοπλο τοίχο. Ενώ, το δοκίμιο M_2L_iR_f, που επίσης υποβλήθηκε σε συνθήκες φωτιάς, εμφάνισε αύξηση 84.41%, η οποία είναι αρκετή αλλά μικρότερη του 100%.
- Σχετικά με την **πλαστιμότητα όλων των ενισχυμένων τοίχων, αυτή αυξάνεται σε ποσοστά άνω των 200% και φτάνει σε ποσοστό αύξησης άνω των 1000%**. Τη μεγαλύτερη αύξηση εμφάνισε το δοκίμιο M_iX_2L κατά ποσοστό 1124.14% και ακολούθησε το δοκίμιο M_2L_f με 517.24% αύξηση. Οπότε, ο ρυθμός αύξησης της αντοχής των δοκιμίων δεν συμβαδίζει και με τον ρυθμό αύξησης της πλαστιμότητας. Παρόλο που το δοκίμιο M_2L_f δεν αύξησε τόσο την αντοχή του μετά την ενίσχυση και τη δοκιμή πυρός, εμφάνισε αρκετά μεγάλο ποσοστό αύξησης της πλαστιμότητάς του καθώς άντεξε σε μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι τη χρονική στιγμή της αστοχίας του. Αντίθετα, η πλαστιμότητα των δοκιμίων M_2L_iR_f και M_2L_iX με την εξωτερική τοποθέτηση της θερμομόνωσης δεν αυξήθηκε όσο τα παραπάνω δοκίμια αλλά κατά 209.90% και 362.07% αντίστοιχα.
- Επίσης, ένα **μεγάλο πλεονέκτημα που φέρει η τοποθέτηση της εξηλασμένης πολυστερίνης μεταξύ της τοιχοποιίας και του αλκαλικά ενεργοποιημένου μανδύα TRM είναι η τεράστια αύξηση της πλαστιμότητάς του αλλά και της αντοχής του**. Επιπλέον, **απορροφάει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας** από όλα τα υπόλοιπα δοκίμια κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης. Η εξηλασμένη πολυστερίνη που είναι σε επαφή με την τοιχοποιία παραμορφώνεται μαζί με αυτήν, οπότε απορροφάει ενέργεια και το δοκίμιο καταλήγει να έχει ακόμα μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Οπότε, συμπεραίνεται ότι η τοποθέτηση της εξηλασμένης πολυστερίνης ως ενδιάμεση στρώση είναι ευνοϊκή και αρκετά αποτελεσματική όσον αφορά τόσο την αντοχή του δοκιμίου όσο και την πλαστιμότητα και την ποσότητα απορροφούμενης ενέργειας που εμφανίζει.
- **Όσο μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης έχει το δοκίμιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πλαστιμότητά του**. Αυτό φαίνεται από το δοκίμιο M_iX_2L, το οποίο προσφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση πλαστιμότητας σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς και συνδυαστικά εμφανίζει τη μεγαλύτερη ποσότητα απορροφούμενης ενέργειας τη στιγμή της αστοχίας.
- Ο **τρόπος αστοχίας είναι επιθυμητό να επέρχεται μέσω μίας ομαλής πτώσης του φορτίου** και συγκεκριμένα με τη **σταδιακή θραύση ινών** ώστε να εκμεταλλεύονται 100% αφού τοποθετούνται για αυτόν τον λόγο. Αντίθετα, η αποκόλληση του μανδύα ενίσχυσης, αλλά και η θλιπτική αστοχία της τοιχοποιίας αποτελούν ανεπιθύμητες αστοχίες, καθώς με αυτούς τους τρόπους αστοχούν ψαθυρά.
- Η **χρήση του αλκαλικά ενεργοποιημένου κονιάματος ως ανόργανη μήτρα των ινοπλεγμάτων άνθρακα** είναι σε γενικές γραμμές **ευεργετική**, όπως και η **χρήση της πλάκας πετροβάμβακα** έναντι συνθηκών φωτιάς. Η αντοχή του κονιάματος αυτού είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντοχή ενός συνήθους κονιάματος τύπου Portland, αλλά η εργασιμότητά του και η συνοχή του ινοπλέγματος άνθρακα με το κονίαμα ενίσχυσης δεν ήταν αυτές που αναμενόταν. Ενώ, η χρήση της πλάκας πετροβάμβακα προσέφερε τη διπλάσια αντοχή στο πυρακτωμένο και σεισμικά ενισχυμένο δοκίμιο συγκριτικά με το δοκίμιο χωρίς τον πετροβάμβακα που επίσης πυρακτώθηκε.

- Τέλος, η αναλυτική προσέγγιση των αποτελεσμάτων για τους ελέγχους κάμψης και διάτμησης δεν είναι έγκυρη όταν γίνεται χρήση απλοποιημένων παραδοχών. Παρ' όλ' αυτά είναι υπέρ της ασφάλειας αφού η αντοχή των δοκιμών υποτιμήθηκε στο θεωρητικό πλαίσιο καθώς δε λαμβάνεται υπόψιν η λειτουργία θόλου του υπερθύρου.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]http://www.boutosd.gr/images/DomikaYlika/keramopoiha/Toybla/Toybla_kokkinogenis/toybla_kokkinogenis.jpg
- [2]<http://www.carbontrim.com/carbon-fiber-fabric-plain-weave-100m-roll-1-54m-60-in-roll.html#>
- [3]<http://compositesdirect.com/3k-carbon-fiber-fabric-twill-weave-100m-roll-1-54m-60-in-roll.html>
- [4]http://jxsuretex.en.alibaba.com/product/470393976-212187035/carbon_fiber_cloth_unidirectional_plain_twill_biaxial_.html
- [5]<http://www.made-in-china.com/showroom/fiberglass-wujiang/productdetailVbenTrKOZUcq/China-Fiberglass-Filament-Winding-Roving.html>
- [6] Hendry W., «Structural Masonry». Mac Millan
- [7] Optimal design of ferronickel slag alkali-activated mortar for repair exposed to high thermal load (Andres Arce, Cassandre Le Galliard , Anastasija Komkova , Catherine G. Papanicolaou, Thanasis C. Triantafyllou)
- [8] Optimal design of ferronickel slag alkali-activated material for high thermal load applications developed by design of experiment (Andres Arce, Jorn Van De Sande , Anastasija Komkova, Catherine G. Papanicolaou, Thanasis C. Triantafyllou)
- [9] Overview of combined seismic and energy upgrading technologies for existing buildings (Pohoryles, DA • Bournas, DA • Da Porto, F • Santarsiero, G • Triantafyllou)
- [10] Papanicolaou, C.G., Triantafyllou T.C., Karlos K. and Papathanasiou M., (2006), “Textile- reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading”, Department of civil Engineering, University of Patras, p.p 1
- [11] Papanicolaou, C.G., Triantafyllou T.C., (2006), “Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets”, Department of civil Engineering, University of Patras
- [12] Pellegrino C., Jose Sena-Cruz, “Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures”, RILEM 2016
- [13] Residual performance of fire-exposed textile reinforced concrete: experimental investigations and modeling techniques
- [14] State-of-the-Art Review on Experimental Investigations of Textile-Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures (Panagiotis Kapsalis, Tine Tysmans, Danny Van Hemelrijck and Thanasis Triantafyllou)
- [15] STRENGTHENING AND SEISMIC RETROFITTING OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES WITH COMPOSITES (Thanasis Triantafyllou), Πάτρα 2006, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- [16] Textile Fibre Composites in Civil Engineering (L. Bisby, D. Bournas, W. Brameshuber, R. Chudoba, M. Curbach, T. Gries, J. Hegger, V. Mechtcherine, E. Müller, B. Mobasher, C. Morales Cruz, A.E. Naaman, C.G. Papanicolaou, I.C. Papantoniou, A. Peled, T. Quadflieg, M. Raina, M. Raupach, S. Scheerer, K. Schneider, A. Scholzen, O. Stolyaro, T. Triantafyllou, N. Will)
- [17] Textile Reinforced Mortars (TRM) tensile behavior after high temperature exposure (Luis Estevan , Francisco B. Varona , F. Javier Baeza, Benjamín Torres , David Bru)
- [18] Tomazevic M. (2004), «Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων από τοιχοποιία», Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [19] Wiberg A. “Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fiber

- Composites ”, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003, pp. 21-22
- [20] Θεοδοσίου Θ., “Τεχνικές Βελτίωσης Ενεργειακής Συμπεριφοράς Υφιστάμενων Κτιρίων -Επεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων στο κέλυφός τους”, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Έρευνας και Μελέτης του Θερμικού Περιβάλλοντος
- [21] Καραντώνη Φ.Β. (2012), "Κατασκευές από Τοιχοποιία – Σχεδιασμός και Επισκευές (2η έκδοση)", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2012, Πρόλογος 1ης έκδοσης, σελ. 21-22, 150-151, 59, 104-107
- [22] Κάρλος Κ., «Ενίσχυση Φέρουσα Τοιχοποιίας για Εντός Επιπέδου Φόρτιση με Σύνθετα Υλικά Ανόργανης Μήτρας και με Ράβδους Σύνθετων Υλικών σε Εγκοπές», Πάτρα 2005, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- [23] Μακαρώνας Στ.-Σ. (2012), "Μηχανική Συμπεριφορά Πλακών από Παραμένοντες Τύπους Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανες Μήτρες και Οπλισμένο Σκυροδέμα", Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- [24] Μπουρνάς Δ. (2008), "Ενίσχυση Υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Νέα Υλικά: Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας, Οπλισμοί Σύνθετων Υλικών ή Ανοξειδωτού Χάλυβα σε Εγκοπές", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- [25] Οδηγός θερμομόνωσης κτιρίων, 2η έκδοση, Σεπτέμβριος 2010, Υπηρεσία ενέργειας, Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού
- [26] Παπαντωνίου Ι. (2007), "Πειραματική Διερεύνηση Στοιχείων Σκυροδέματος επί/εντός Προκατασκευασμένων Τύπων από Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας", Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- [27] Σκεύη Κ., «Εισαγωγή "Εσωτερικής Θερμοκρασίας Ηλίου-Αέρος" κατ' αναλογίαν της εξωτερικής για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της απόδοσης των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε εσωτερικούς τοίχους κτιρίων», Αθήνα 2014, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας θερμότητας
- [28] Τριανταφύλλου Α., “Δομικά Υλικά”, Πάτρα 2008, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
- [29] Χατζηκωνσταντίνου Α., «Σύγκριση μεθόδων αποτίμησης σεισμικής επάρκειας κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία», Πάτρα 2014, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

11. ΕΠΙΒΛΕΨΗ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης του 5^{ου} ακαδημαϊκού προπτυχιακού έτους σπουδών για την απολαβή του διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Τριανταφύλλου Αθανάσιου.

Ευχαριστίες απευθύνονται στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Αθανάσιο Τριανταφύλλου για την καθοδήγηση που μου προσέφερε, στον μεταδιδάκτορα Καψάλη Παναγιώτη για την πολύτιμη βοήθειά του αλλά και στους φοιτητές που συνεργάστηκα και συμμετείχαν στην πειραματική αυτή διαδικασία.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει σε όλους τους τομείς και αδιάκοπα με ανυπέρβλητη αγάπη γεμίζοντας με καθημερινά με δύναμη για να συνεχίζω τον ακαδημαϊκό μου <<αγώνα>> και όχι μόνο.