

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ ΑΠΟ ΑΛΚΑΛΟΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΟΣ – ΕΚΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗ

ΜΑΡΓΕΤΗ ΟΛΥΜΠΙΑ

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών,
up1068038@ac.upatras.gr

Περίληψη

Λαμβάνοντας υπόψη τη σεισμική τρωτότητα των παλαιών κατασκευών και την αυξανόμενη ανάγκη για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του CO₂ και της κατανάλωσης ενέργειας, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ερευνάται η εφαρμογή ενός καινοτόμου συστήματος, το οποίο βασίζεται στη χρήση ΙΑΜ (ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα) σε αλκαλοενεργοποιημένο κονίαμα (κονίαμα που προέρχεται από βιομηχανικό παραπροϊόν) με ταυτόχρονη χρήση θερμικής μόνωσης, σαν ένα μέσο που συνδυάζει σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία. Με σκοπό τη μελέτη του παρόντος θέματος, έγινε αναλυτική και πειραματική διερεύνηση με τη χρήση δοκιμίων τοιχοποιίας, τα οποία μελετήθηκαν σε εκτός επιπέδου καταπόνηση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η τοιχοποιία αποτελεί ένα από τα παλαιότερα δομικά υλικά. Μπορεί να έχει τη λειτουργία μια φέρουσας τοιχοποιίας είτε μιας τοιχοποιίας πλήρωσης. Πιο συγκεκριμένα, εάν αποτελεί μέρος του φέροντα οργανισμού, που κυρίως όμως το συναντάμε σε παλαιότερες κατασκευές, είναι φέρουσα τοιχοποιία και τα φορτία ακολουθούν τη διαδρομή, φέρουσα τοιχοποιία, θεμελίωση και τέλος έδαφος. Παρ' όλα αυτά, στη Μεταπολεμική περίοδο, έως και σήμερα, η κύρια χρήση της είναι ως υλικό πλήρωσης, κυρίως λόγω της διευρυμένης χρήσης οπλισμένου σκυροδέματος και γάλυβα, που αποτελούν μεταγενέστερα υλικά στις κατασκευές.

Βάσει των παραπάνω δεδομένων, προκύπτει η επιτακτική ανάγκη για επισκευή των εν λόγω κατασκευών, εξ αιτίας της ύπαρξης φθοράς από το χρόνο, καθώς και των προβλημάτων που αφορούν τη στατικότητα και τη λειτουργικότητά τους. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, πως ο κανονισμός που διέπει τις κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία είναι ο Ευρωκώδικας 6 (EN1996, EC6). Τέλος, απαραίτητη κρίνεται πλέον και η ενεργειακή αναβάθμισή τους, για διττό σκοπό που σχετίζεται, τόσο με την υποχρέωση από τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης, όσο και με την ανάγκη ύπαρξης κατασκευών λιγότερο επιβαρυντικών για το περιβάλλον, δηλαδή με το όσο το δυνατόν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς το περιβάλλον χρήζει μέγιστης προστασία από τους ρύπους και την αλόγιστη κατανάλωση των παροχών του.

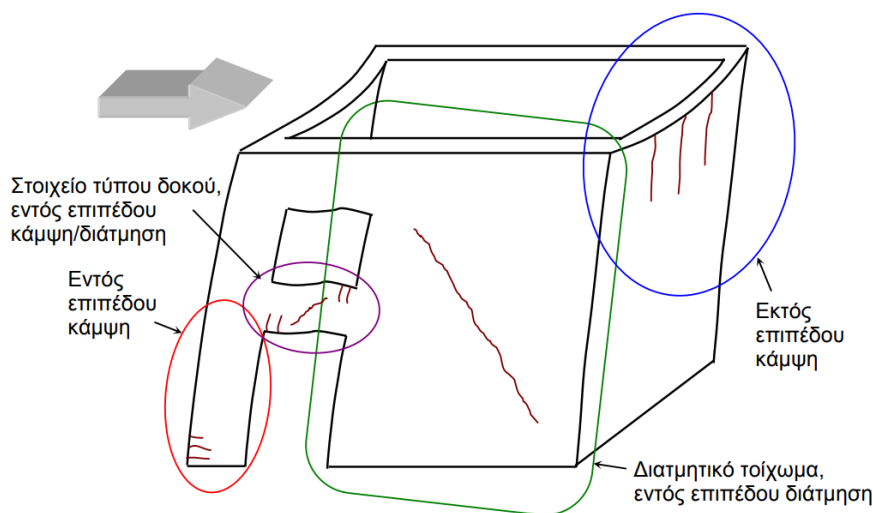
Λόγω του ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια άοπλης δρομικής τοιχοποιίας που προσομοιώνουν ανώφλι, κρίνεται απαραίτητο να δοθούν οι ορισμοί αυτών των όρων. Με τον όρο δρομική τοιχοποιία εννοείται η τοιχοποιία στην οποία τα τούβλα τοποθετούνται κατά το μήκος τους παράλληλα με το μήκος του τοίχου, με αποτέλεσμα ο τοίχος να έχει πάχος όσο το πλάτος του τούβλου.

Επειδή όμως είναι απαραίτητο οι κατακόρυφοι αρμοί να μην είναι συνεχείς, ο τοίχος κτίζεται εναλλάξ, με δύο διαφορετικές στρώσεις. Με τον όρο άοπλη τοιχοποιία γίνεται αναφορά σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία χωρίς ύπαρξη οπλισμού. Τέλος, αναφορικά με τα «υπέρθυρα» ή «ανώφλια», η συμπεριφορά τους μοιάζει περισσότερο με αυτήν της δοκού. Αποτελούν στοιχεία μικρού ύψους, που απαντώνται πάνω από ανοίγματα, που παραλαμβάνουν μικρό κατακόρυφο φορτίο, το οποίο μεταφέρουν στο οριζόντιο διάζωμα στο οποίο στηρίζονται.

Γενικά ένα στοιχείο τοιχοποιίας καταπονείται από κατακόρυφη θλίψη λόγω των μεγάλων αξονικών φορτίων που καλείται να παραλάβει. Παρ' όλα αυτά, λόγω της μεγάλης θλιπτικής αντοχής που τη χαρακτηρίζει (ενν. τη τοιχοποιία), δεν είναι τόσο σημαντική η παραπάνω φόρτιση, ίσα – ίσα που κάποιες φορές αυτή η θλιπτική καταπόνηση δρα και ευεργετικά στο στοιχείο της τοιχοποιίας, αφού μειώνονται οι εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες δύσκολα παραλαμβάνονται λόγω της ελάχιστης εφελκυστικής αντοχής της. Ωστόσο, μια κατασκευή από φέρουσα τοιχοποιία, μπορεί να παραλάβει τις παρακάτω φορτίσεις, οι οποίες χωρίζονται αρχικά ανάλογα με το εάν η φόρτιση είναι κάθετη ή παράλληλη στο επίπεδο της τοιχοποιίας και στη συνέχεια ανάλογα με τον τρόπο καταπόνησης, δηλαδή καμπτικό ή διατμητικό.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, υπάρχουν οι εξής τέσσερις παρακάτω περιπτώσεις (Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος 2006, “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά”):

- 1) Εκτός επιπέδου κάμψη
- 2) Εντός επιπέδου κάμψη (π.χ. σε πεσσούς ή υπέρθυρα)
- 3) Εντός επιπέδου διάτμηση σε στοιχεία τύπου διατμητικού τοιχώματος
- 4) Εντός επιπέδου διάτμηση σε στοιχεία τύπου δοκού



Σχήμα 1: Συνήθεις τύποι καταπόνησης τοιχοποιίας (Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος) [7].

Η εκτός επιπέδου κάμψη, η οποία λαμβάνει χώρα λόγω φόρτισης κάθετα στο επίπεδο ενός τοίχου, καθιστά τη συμπεριφορά του κτιρίου απρόβλεπτη.

Στην παρούσα εργασία, θα μελετηθεί άοπλη και ενισχυμένη τοιχοποιία και συγκεκριμένα «ανώφλι» σε εκτός επιπέδου κάμψη.

Γενικώς, όσον αφορά την καμπτική ενίσχυση, οι ίνες άνθρακα είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συχνότερα στο πεδίο των ενισχύσεων και ο λόγος προτίμησής τους είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Πιο συγκεκριμένα, παράλληλα με την υψηλή αντοχή τους και το υψηλό μέτρο Ελαστικότητας, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε

αλκαλικό περιβάλλον (απαραίτητο και στην παρούσα μελέτη, αφού χρησιμοποιείται αλκαλοενεργοποιημένο κονίαμα το οποίο είναι βασικό) καθώς επίσης δεν αποτελούνται από κάποιο διαβρωτικό συστατικό. Αναφορικά με τα υφάσματα, και στις δύο υφάνσεις τους, υπάρχει η ίδια ποσότητα ινών άνθρακα ή άλλου υλικού σε κάθε διεύθυνση και οι αντοχές τους είναι παρόμοιες, ενώ η ύφανσή τους είναι τέτοια ώστε να έχει τη μορφή υφάσματος. Από την άλλη, στα πλέγματα που θα χρησιμοποιηθούν και στην εργασία, οι κλώνοι απέχουν σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτή η πλέξη καθιστά δυνατή την εισχώρηση του σχετικά παχύρευστου κονιάματος ή του σκυροδέματος της μήτρας.

Εν συνεχεία, αναφορικά με τις θερμομονώσεις, τα παλαιότερα χρόνια, επικρατούσε η αντίληψη ότι δεν απαιτούνταν ειδικές θερμομονωτικές επικαλύψεις σαν τις σημερινές, καθώς υπήρχε ως μέσο «ελέγχου» της ροής ενέργειας από και προς το κτίριο, η θερμοχωρητικότητα των τοίχων μεγάλου πάχους. Με τον όρο θερμοχωρητικότητα, εννοείται η ικανότητα που χαρακτηρίζει τους τοίχους μεγάλου πάχους να αποθηκεύουν ενέργεια. Παρ' όλα αυτά, οι απαιτήσεις των κανονισμών ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων που ισχύουν σήμερα, καθιστούν ανεπαρκή αυτά τα πάχη, όσον αφορά τη θερμοπερατότητα, με αποτέλεσμα να απαιτούνται σχετικές επεμβάσεις.

Γενικά, ο όρος σύστημα Ινοπλέγματος σε Ανόργανη Μήτρα (σύστημα IAM – Textile Reinforced Mortar TRM) αφορά ένα πλέγμα ινών (π.χ. γυαλί, άνθρακα, βασάλτης, χάλυβας) ανοιχτής πλέξης με συνήθη ανοίγματα βρογχίδας 5 – 35 mm εμπεπηγμένο σε μια ανόργανη μήτρα (π.χ. κονίαμα). Ο όγκος και τα κενά των ινών σε κάθε διεύθυνση μπορούν να προσδιοριστούν ανεξάρτητα και ως εκ τούτου επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος και το βαθμό της διείδυσης του κονιάματος στο πλέγμα.

Οι εφαρμογές με τα IAM συνδυάζουν τις ευνοϊκές ιδιότητες που προσφέρουν τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ – Fiber Reinforced Polymers FRP) (π.χ. ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, ελάχιστη επιρροή στην γεωμετρία, ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης, υψηλή αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με το βάρος του, υψηλή παραμορφωσιμότητα), ενώ αντιμετωπίζουν τις περισσότερες αδυναμίες οι οποίες σχετίζονται με τη χρήση οργανικών ρητινών: ασυμβατότητα με τα υποστρώματα, ευκολία αφαίρεσης μετά την εφαρμογή, υψηλό κόστος των επωξειδικών ρητινών, κακή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, έλλειψη ικανότητας διαπνοής, πιθανοί κίνδυνοι για τους εργάτες, ικανότητα καύσης και δυσκολία διεξαγωγής εκτιμήσεως μετά από σεισμικές διεγέρσεις αναφορικά με τα ΙΟΠ.

Η ενίσχυση με IAM έχει πολύ μικρή έως ανύπαρκτη θερμομονωτική ικανότητα, ενώ η εξωτερική ή η εσωτερική θερμομόνωση, δε συνεισφέρει στη φέρουσα ικανότητα. Επομένως, σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω συστημάτων με στόχο την ταυτόχρονη σεισμική και ενεργειακή αναβάθμιση της τοιχοποιίας. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν, έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποδοτικό, η ενίσχυση να τοποθετείται αμφίπλευρα (καθώς μια κατασκευή υπόκειται σχεδόν πάντα σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις). Παρ' όλα αυτά, στην παρούσα πειραματική εφαρμογή, ο τοίχος μελετήθηκε σε μονόπλευρη φόρτιση, οπότε θεωρήθηκε σκόπιμο να τοποθετηθεί μονόπλευρη ενίσχυση, στην πλευρά που βρίσκεται στο εφελκόμενο πέλμα. Τέλος, να σημειωθεί ότι έχει αποδειχθεί (Thanasis Triantafyllou et al. 2016) ότι στην περίπτωση της εκτός επιπέδου φόρτισης, η τοποθέτηση της ενίσχυσης εξωτερικά της θερμομόνωσης αυξάνει σημαντικά την αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης όταν συγκρίνεται με την ενίσχυση με IAM χωρίς θερμομονωτικό υλικό.

Ο πλανήτης αναζητά να απομειώσει και αν είναι δυνατόν να εκμηδενίσει τις εκπομπές άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Κάθε χρόνο, ο κατασκευαστικός τομέας

καταναλώνει περίπου 1.6 δις τόνους τσιμέντου, το οποίο μεταφράζεται σε απελευθέρωση 1.28 δις τόνων CO₂. Η βιομηχανία τσιμέντου αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο παραγωγό εκπομπών άνθρακα, το οποίο αντιστοιχεί στο 5 – 8 % των συνολικών εκπομπών παγκοσμίως. Ενώ το συμβατικό σκυρόδεμα τύπου Portland είναι και θα είναι για πολλά χρόνια το κύριο υλικό για την κατασκευή, υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικό με την αειφορία αυτού του υλικού και γι' αυτό, υπάρχει ανάγκη να διερευνηθούν εναλλακτικά συνδετικά μέσα με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε διάρκεια και μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά την παραγωγή τους. Τα αλκαλοενεργοποιημένα υλικά (AAM) αποτελούν ένα συνδετικό υλικό, το οποίο προέρχεται από την αντίδραση μιας βάσης (σε στερεή μορφή ή διαλυμένη) με μια στερεή σκόνη πυριτίου, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία. Τα AAM έχουν χαρακτηριστεί ως ένα πολλά υποσχόμενο συνδετικό υλικό εναλλακτικό του κοινού σκυροδέματος, χάρη στα περιβαλλοντικά τους οφέλη και στις ανώτερες μηχανικές τους ιδιότητες.

Γενικώς, η παραγωγή του κοινού σκυροδέματος, παράγει σημαντική ποσότητα εκπομπών CO₂, που συμβάλλουν στην εξέλιξη του φαινομένου του θερμοκηπίου, παράγοντας κοντά στο 5 % της παγκόσμιας εκπομπής CO₂. Σε αντίθεση, η παραγωγή ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας, έχει περίπου 55 – 75 % μικρότερη επιρροή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή AAM ως συνδετικό υλικό, θα συμβάλλει αποτελεσματικά στη μείωση των εκπομπών του CO₂ κατά την παραγωγή σκυροδέματος.

Αναφορικά με τα αλκαλοενεργοποιημένα υλικά ένα εκ των οποίων εφαρμόστηκε και στην παρούσα πειραματική μελέτη, είναι ενδιαφέρον να δοθούν κάποιες εισαγωγικές πρώτες πληροφορίες. Ένα αλκαλοενεργοποιημένο υλικό χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, αποτελείται από μια αλουμινοπυριτική πηγή, η οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο και ένα βασικό διάλυμα. Αυτό το είδος του υλικού, έχει την ικανότητα να αναπτύξει υψηλή μηχανική αντοχή και εξαιρετική ανθεκτικότητα έναντι φωτιάς και χημικών ουσιών, άρα και έναντι χημικής διάβρωσης. Η τεχνολογία πίσω από τα αλκαλοενεργοποιημένα υλικά χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να μειώσει τις εκπομπές του CO₂ κατά 80 % σε σύγκριση με το OPC (Ordinary Portland Cement – κοινό τσιμέντο τύπου Portland).

Σχετικά με την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, η τοιχοποιία παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή έναντι πυρκαγιάς, πρώτον λόγω της ακαυστότητας του υλικού, δεύτερον λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας και της μεγάλης θερμοχωρητικότητας και τρίτον λόγω της ικανότητας του υλικού να διατηρεί τις ιδιότητες του σε θερμοκρασίες της τάξης των 1000°C. Επομένως, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η τοιχοποιία αποτελεί ένα μη αναφλέξιμο και άκαυστο δομικό στοιχείο που προσφέρει θερμική μόνωση, έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα ενώ τέλος χρησιμεύει και στη διαμερισματοποίηση.

Όσον αφορά τις ίνες άνθρακα, έχουν υψηλή απόδοση έναντι υψηλών θερμοκρασιών, αρκεί να μην εκτίθενται σε οξειδωτικό περιβάλλον και συνακόλουθη αποσύνθεση (Hatta et al., 1999). Σύμφωνα με τους Yin et al. (1994), το πιθανό κατώφλι θερμοκρασίας είναι στους 600°C. Στην ίδια μελέτη, το μέγεθος της ίνας μειώθηκε σύμφωνα με τη διάρκεια έκθεσης, σε θερμοκρασίες μεταξύ 550°C και 860°C, ακολουθώντας γραμμική συμπεριφορά. Στις έρευνες των Papakonstantinou et al. (2001) και Long (1996), αποδείχθηκε ότι η διαδικασία οξείδωσης των ινών άνθρακα ξεκινά σε θερμοκρασίες κάτω των 500°C, κάτι το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση της αντοχής.

Αρχικά, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί πως δεν έχει προηγηθεί ένας καινοπονητικός αριθμός μελετών σχετικά με το συγκεκριμένο αντικείμενο (δηλαδή την

έκθεση συστημάτων IAM σε υψηλά θερμικά φορτία), καθώς είναι μια έρευνα η οποία ξεκίνησε σχετικά πρόσφατα και βρίσκεται σε εξέλιξη για την εξαγωγή αντίστοιχων συμπερασμάτων. Παρ' όλα αυτά, από όσες μελέτες έχουν ήδη διεξαχθεί, έχει αποδειχθεί ότι η χρήση ιών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την διατήρηση της απομένουσας αντοχής μετά την έκθεση σε φωτιά. Πιο συγκεκριμένα, σε παλαιότερη μελέτη των Panagiotis Kapsalis et al. (2022), προέκυψε το συμπέρασμα ότι παρά τη μερική ενεργοποίηση των ιών άνθρακα χωρίς επικάλυψη σε ουδέτερες συνθήκες, η χρήση τους είναι η καλύτερη λύση για κατασκευές ασφαλείς έναντι πυρκαγιάς, από τη στιγμή που υποφέρουν από μικρότερη υποβάθμιση μετά την έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Επιπλέον, όπως έχει αποδειχθεί και σε δύο άλλες μελέτες των Saad Raouf et al. (2017), τα IAM παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά ως υλικό ενίσχυσης, με απώτερο σκοπό την αύξηση της καμπτικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη μια εκ των δύο μελετών που διεξήχθησαν, αποδείχθηκε ότι τα IAM διατήρησαν μια μέση αποτελεσματικότητα της τάξεως του 55 %, συγκρινόμενη με την αποτελεσματικότητα που παρουσιάζουν σε ουδέτερες συνθήκες, σε αντίθεση με τα ΙΟΠ, τα οποία χάνουν εξ ολοκλήρου την αποτελεσματικότητά τους όταν υπόκεινται σε υψηλές θερμικές φορτίσεις. Επίσης, σημαντική ανακάλυψη, ήταν και το γεγονός ότι η αύξηση του αριθμού των στρώσεων IAM (από μία σε τρεις) βελτίωσε την καμπτική αντοχή και διαφοροποίησε τον τρόπο αστοχίας. Σε αντίθετη περίπτωση, στα ΙΟΠ, η αύξηση των στρώσεων δεν παρουσίασε καμία βελτίωση. Στην άλλη μελέτη τους οι Saad Raouf et al. (2017), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα IAM μπορούν να ξεπεράσουν τα συστήματα ΙΟΠ σε υψηλή θερμοκρασία ή φωτιά λόγω της διαπνοής και της ικανότητας μη ανάφλεξης και καύσης όταν εκτίθενται σε φωτιά, ιδιότητες οι οποίες οφείλονται στην παρουσία μετάλλων στα τσιμεντοκονιάματα που χρησιμοποιούνται ως συνδετικά υλικά. Στην ίδια μελέτη, υπήρξε επίσης η αναφορά ότι η σύνδεση μεταξύ του συστήματος IAM και του υποστρώματος από σκυρόδεμα, παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, σε μια πειραματική διερεύνηση των Isabella Colombo et al., αποδείχθηκε ότι, οι απομένουσες μηχανικές ιδιότητες των IAM που εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, εξαρτώνται από την απώλεια αντοχής του πλέγματος.

Η έκθεση του κοινού σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (υψηλότερες από τους 330°C) έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του εξ αιτίας της αλλαγής στη χημική σύσταση των παραγόμενων υδρατμών και των μικρορωγμών που προκύπτουν από τις διαφορικές θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα. Η υποβάθμιση των χημικών ενώσεων και των δεσμών, λαμβάνει χώρα καθώς τα μόρια του υδροξειδίου του ασβεστίου αρχίζουν να αποσυντίθενται μεταξύ των 330°C και 400°C. Το ανθρακικό ασβέστιο αποσυντίθεται στους 700°C και λιώνει στους 800°C. Η βασική διαφορά και πλεονέκτημα στην ανθεκτικότητα σε φωτιά των AAM με χαμηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (Ca) είναι η απουσία ή η παρουσία σε μικρό ποσοστό της C-S-H γέλης (C-S-H gel). Η αποσύνθεση αυτής της γέλης μετά τους 300°C είναι ο πρωταρχικός λόγος για την απομείωση της μηχανικής αντοχής στα προϊόντα που έχουν ως συστατικό το OPC.

Για τα AAM χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, η απομένουσα αντοχή μετά την έκθεση σε φωτιά εξαρτάται από τα αντιδρώντα και τους καταλύτες του διαλύματος με τα αποτελέσματα να ποικίλουν σημαντικά. Οι Martin et al. ανέφεραν υψηλότερη μηχανική αντοχή και καλύτερη συμπεριφορά κατά την αστοχία για τα αλκαλοενεργοποιημένα υλικά, όταν αυτά συγκρίνονται με τα OPC έπειτα από ένα υψηλό θερμικό φορτίο.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Κονίαμα Δόμησης

Για την κατασκευή των δοκιμών που θα αξιοποιηθούν καθ' όλη την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν οπτόπλινθοι με έξι οπές (το πιο κοινό είδος οπτόπλινθου) με διαστάσεις $5.5 \times 8.3 \times 19$ cm, από τοπικό παραγωγό της Αχαΐας. Το κονίαμα δόμησης που χρησιμοποιήθηκε για τη σύμπλεξη των οπτόπλινθων κατά την κατασκευή της τοιχοποιίας, παρήχθη με «εργοταξιακή» διαδικασία (Εικ. 2.1 (α)), με συστατικά τσιμέντο, άσβεστο, άμμο και νερό με σκοπό την παραγωγή κονιάματος γενικής εφαρμογής. Οι ποσότητες των συστατικών που προστέθηκαν κατά προσέγγιση δίνονται από την αναλογία (κατά βάρος) των συστατικών τσιμέντο : άσβεστος : άμμος, στην τελική σύνθεση, όπου ήταν: 1 : 0.68 : 4.8 κατά βάρος ενώ ο λόγος N/T (νερό/τσιμέντο) ήταν 0.8 ή 80% w/w.

Κατά τη φάση της κατασκευής, ελήφθησαν 6 πρίσματα (2 τριπλέτες) κονιάματος δόμησης σε μεταλλικές μήτρες, επαλειμμένες με λάδι, διαστάσεων $40 \times 40 \times 150$ mm. Τα πρίσματα του κονιάματος δόμησης, αφού ξεκαλουπώθηκαν από τις μήτρες με προσοχή, υπεβλήθησαν σε δοκιμές αντοχής στην υδραυλική μηχανή (θλίψης, εφελκυσμού, κόπωσης) της «MTS» του εργαστηρίου με δυναμικότητα 250 kN.

Τόσο για τον προσδιορισμό της θλιπτικής όσο και της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη, πραγματοποιήθηκαν έξι δοκιμές κάμψης και εν συνεχεία προέκυψαν δώδεκα πρίσματα τα οποία δοκιμάστηκαν σε θλίψη, επομένως και δώδεκα δοκιμές θλίψης.

Πίνακας 1: Μέσες τιμές αντοχών κονιάματος δόμησης τοιχοποιίας.

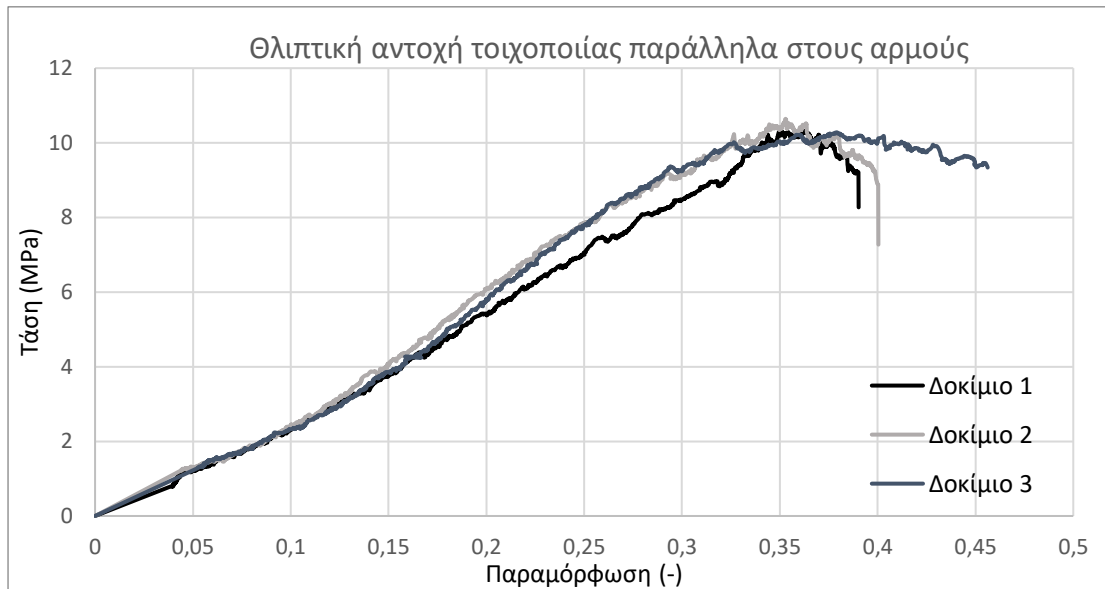
<i>Μέση εφελκυστική αντοχή κονιάματος</i>	<i>Μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος</i>
$f_{mt} = 3.12$ MPa	$f_{mc} = 10.265$ MPa

2.2 Δοκίμια Τοιχοποιίας

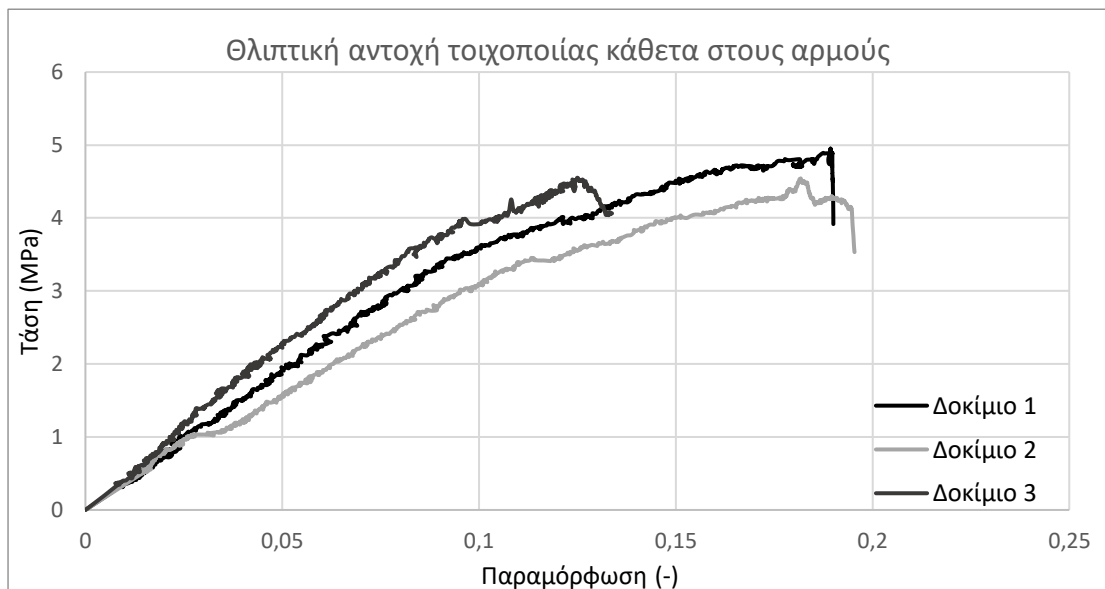
Για τη μέτρηση μέσω πειράματος της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας, έγινε θλίψη τοιχίσκων διαστάσεων $40 \times 40 \times 85$ cm (σύμφωνα με το σύνολο των προτύπων EN 1052-1), οι οποίοι κατασκευάστηκαν παράλληλα με τα βασικά δοκίμια των πειραμάτων, με τα ίδια υλικά και συντηρήθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε υδραυλική πρέσα δυναμικότητας 4000 kN.

Πίνακας 2: Τιμές μέσης θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας παράλληλα & κάθετα στους οριζόντιους αρμούς.

<i>Μέση θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας (MPa)</i>	
// αρμούς	10.41
⊥ αρμούς	4.68



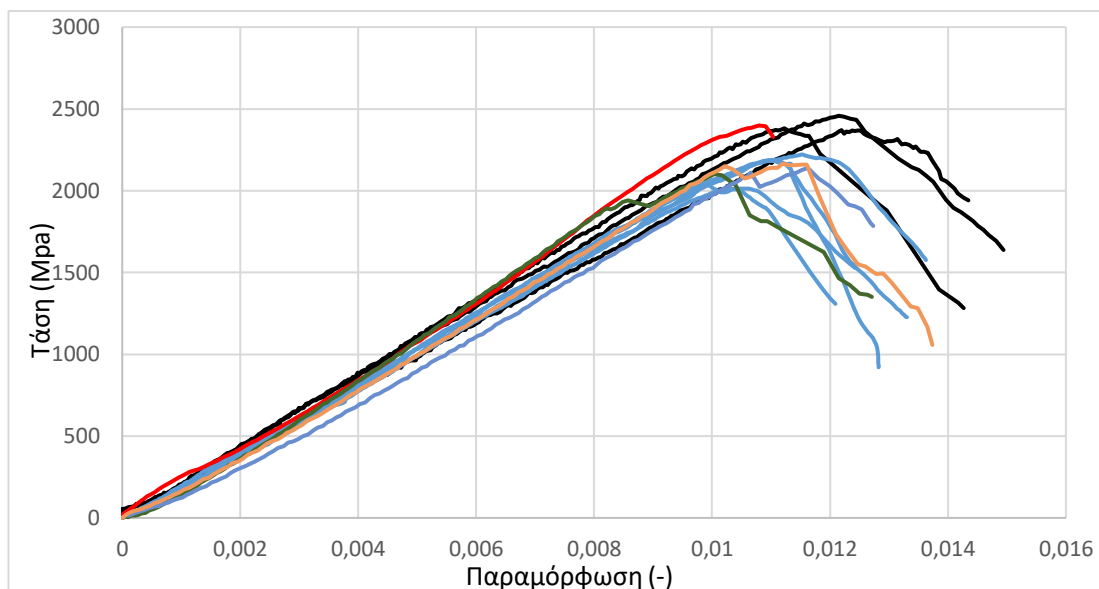
Σχήμα 2: Διάγραμμα τάσης σ – παραμόρφωσης ϵ της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας παράλληλα στους οριζόντιους αρμούς.



Σχήμα 3: Διάγραμμα τάσης σ – παραμόρφωσης ϵ της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας κάθετα στους οριζόντιους αρμούς.

2.3 Ινόπλεγμα και Μητρικό Κονίαμα Ενίσχυσης

Στη συγκεκριμένη μελέτη, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, ενισχύθηκαν με πλέγμα ινών Maregrid C 170 της εταιρείας MARPEI, το οποίο παράγεται σε ρολά πλάτους 1 m και μήκους 50 m. Το παραπάνω πλέγμα έχει τετραγωνική πλέξη και είναι κατασκευασμένο από υψηλής αντοχής ίνες άνθρακα. Το παρόν πλέγμα ειδικά όταν εφαρμόζεται σε επιφάνειες τοιχοποιίας, βελτιώνει την έλλειψη της εφελκυστικής αντοχής που χαρακτηρίζει την τοιχοποιία και αυξάνει τη συνολική ολκιμότητα, με στόχο οι τάσεις να κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια. Οι πειραματικές μετρήσεις και οι αναλύσεις που έγιναν, έδωσαν τα παρακάτω στοιχεία για τις μηχανικές ιδιότητες του πλέγματος.



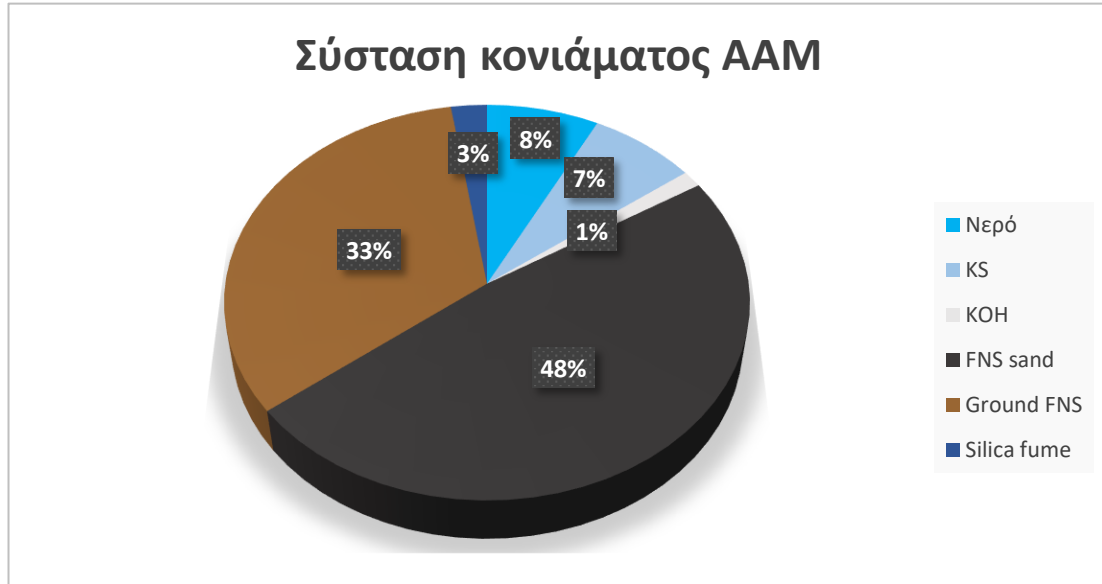
Σχήμα 4: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του πλέγματος Maregrid C 170 της MAPEI (Kapsalis Panagiotis 2021).

Πίνακας 3: Μηχανικά χαρακτηριστικά του πλέγματος Maregrid C 170.

Μέγιστη εφελκυστική τάση (MPa)	2230.9
Μέγιστη παραμόρφωση (%)	1.05
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	212.5

Πίνακας 4: Τελική σύσταση κονιάματος ΑΑΜ που χρησιμοποιήθηκε (ποσότητα νερού στο διάλυμα 450 gr).

Συστατικά	Μάζα (gr)	Σημειώσεις
Νερό	450	
Πυριτικό Κάλιο (KS)	430	Κωδ. δοχείου: 14517 Το KS αποτελείται κατά 45 % από ξηρά συστατικά και κατά 55 % από νερό.
Υδροξείδιο του Καλίου (ή καυστική ποτάσα) KOH	81	
Σύνολο	961	Συνολική ποσότητα νερού: $450 + 0.55 \times 430 = 686.5$ gr
Συστατικά	Μάζα (gr)	
Σκωρία υψικαμίνων (χονδρόκοκκη, κοσκινισμένη σε 0 – 2 mm)	2877	
Σκωρία υψικαμίνων (λεπτόκοκκη)	1967	
Πυριτική παιπάλη	144	
Χημικό διάλυμα	961	
Σύνολο	5949	



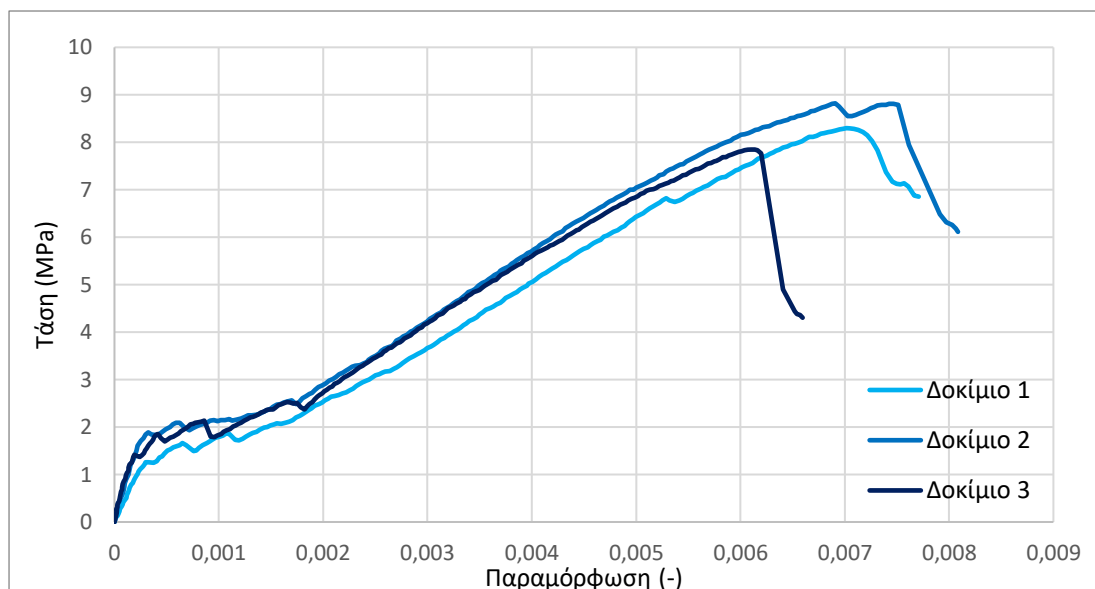
Σχήμα 5: Ποσοστιαία συμμετοχή του κάθε συστατικού στη τελική σύνθεση κονιάματος AAM.

Η μέση τιμή της εφελκυστικής και της θλιπτικής αντοχής του αλκαλοενεργοποιημένου κονιάματος, προσδιορίστηκαν όπως και στην περίπτωση του κονιάματος δόμησης και οι τιμές τους παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 5: Μέσες τιμές αντοχών κονιάματος AAM.

<i>Μέση εφελκυστική αντοχή κονιάματος</i>	<i>Μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος</i>
$f_{mt} = 5.79 \text{ MPa}$	$f_{mc} = 70.61 \text{ MPa}$

Για τον προσδιορισμό του μέτρου Ελαστικότητας E του AAM κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση της μήτρας, ελήφθησαν 3 δοκίμια εφελκυσμού (coupons) πάχους 10 mm και πλάτους 100 mm με 2 στρώσεις πλέγματος (ίδιο πλέγμα με αυτό που χρησιμοποιήθηκε και για τις ενισχύσεις) στους 20°C, τα οποία υπεβλήθησαν σε δοκιμή άμεσου εφελκυσμού στην υδραυλική μηχανή (θλίψης, εφελκυσμού, κόπωσης) της «MTS» του εργαστηρίου με δυναμικότητα 250 kN. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 2.5), από το οποίο λαμβάνεται και το μέτρο ελαστικότητας E ως η κλίση του αρχικού ευθύγραμμου – ελαστικού κλάδου του διαγράμματος.



Σχήμα 6: Διάγραμμα τάσης σ – παραμόρφωσης ϵ , κονιάματος AAM.

Πίνακας 6: Μέτρο Ελαστικότητας E του AAM και οριακή παραμόρφωση του IAM

Μέτρο ελαστικότητας E	6.05 GPa
Οριακή παραμόρφωση του σύνθετου υλικού με AAM.	6.69 ‰

Κατά την εφαρμογή των θερμομονωτικών πλακών εξηλασμένης πολυστερίνης (xps) απευθείας στην τοιχοποιία (περίπτωση τοποθέτησης IAM εξωτερικά της θερμομόνωσης), απαιτήθηκε η εφαρμογή κονιάματος εφαρμογής. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το ινοπλισμένο συγκολλητικό υλικό για τοποθέτηση θερμομονωτικών πλακών KAPA 11 της BAUER. Με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για το κονίαμα δόμησης τοιχοποιίας και για το αλκαλοενεργοποιημένο κονίαμα προσδιορίστηκα τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τσιμεντοειδούς κονιάς.

Πίνακας 7: Μέσες τιμές αντοχών τσιμεντοειδούς κονιάς.

Μέση εφελκυστική αντοχή κονιάματος	Μέση θλιπτική αντοχή κονιάματος
$f_{mt} = 2.55 \text{ MPa}$	$f_{mc} = 7.03 \text{ MPa}$

Πίνακας 8: Μέτρο Ελαστικότητας E του AAM και οριακή παραμόρφωση του IAM με

Μέτρο ελαστικότητας E	6.297 GPa
Οριακή παραμόρφωση του σύνθετου υλικού τσιμεντοειδή κονία (OPC).	7.22 ‰

2.4 Θερμομονωτικές Πλάκες

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά θερμομονωτικές πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) των 2 cm με ανάγλυφη επιφάνεια και υψηλή διάχυση ατμών για μόνωση προσόψεων και θερμομονωτικές πλάκες πετροβάμβακα.

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με την εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS – Extruded polystyrene), είναι της εταιρείας FIBRAN S.A. και η πλήρης εμπορική ονομασία του

προϊόντος σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο της εταιρείας είναι FIBRANxps ETICS GF.

Όσον αφορά τις πλάκες πετροβάμβακα που χρησιμοποιήθηκαν, είναι επίσης της εταιρείας FIBRAN S.A. και η πλήρης εμπορική ονομασία του προϊόντος σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο της εταιρείας είναι FIBRANgeo BP – ETICS.

2.5 Τύποι Δοκιμίων - Ονοματολογία

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, είναι συμβατά με το ένα εκ των τριών βασικών στοιχείων ενός φέροντος τοίχου, και αυτό είναι το ανώφλι ή αλλιώς υπέρθυρο. Όλα τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα σε μεσαία κλίμακα με διαστάσεις 1.30 m στο μήκος και 0.40 m στο ύψος, όπως φαίνονται και στις παρακάτω προσομοιώσεις.

Στόχος είναι να εξεταστούν διάφορες διατάξεις τοποθέτησης του υλικού ενίσχυσης και του υλικού θερμομόνωσης, ώστε να κριθεί ποια διάταξη αποτελεί την πλέον καταλληλότερη όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient conditions), αλλά και ύστερα από έκθεση σε φωτιά, την επιρροή της στρώσης πετροβάμβακα ως θερμομονωτική προστασία. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν δοκίμια με αποκλειστικά μονόπλευρη ενίσχυση (υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση) και οι περιπτώσεις ήταν: 1) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient conditions) να είναι το υλικό ενίσχυσης σε επαφή με τον τοίχο και η θερμομόνωση - εξηλασμένη πολυστερίνη (xps) εξωτερικά, 2) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient conditions) να είναι η θερμομόνωση - εξηλασμένη πολυστερίνη (xps) εσωτερικά σε επαφή με τον τοίχο και το υλικό ενίσχυσης εξωτερικά, 3) σε υψηλές θερμοκρασίες το υλικό ενίσχυσης σε επαφή με τον τοίχο με εξωτερική στρώση θερμομονωτικού υλικού πετροβάμβακα (rockwool) και 4) σε υψηλές θερμοκρασίες το υλικό ενίσχυσης σε επαφή με τον τοίχο χωρίς εξωτερική στρώση θερμομονωτικού υλικού πετροβάμβακα (rockwool).

Βασική προϋπόθεση που τηρήθηκε κατά την κατασκευή όλων των δοκιμίων, είναι ότι διατηρείται σταθερή η συνολική ποσότητα υλικού ενίσχυσης και θερμομόνωσης που εφαρμόζεται σε κάθε δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε δοκίμιο τοποθετούνται 2 στρώσεις IAM και 1 θερμομονωτική πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης (xps) πάχους 2 cm είτε 1 θερμομονωτική πλάκα πετροβάμβακα (rockwool) πάχους 3 cm.

Επομένως, αναλυτικά προκύπτουν τα παρακάτω δοκίμια που υποβλήθηκαν σε φόρτιση εκτός επιπέδου:

1. Δοκίμιο ελέγχου (Control): Δοκίμιο τοιχοποιίας χωρίς καμία επέμβαση (άοπλη τοιχοποιία (θερμοκρασία περιβάλλοντος - ambient conditions)
2. Δοκίμιο τοιχοποιίας με μονόπλευρη επέμβαση, όπου τοποθετήθηκε το IAM σε επαφή με τον τοίχο και η θερμομονωτική πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης εξωτερικά (xps) (θερμοκρασία περιβάλλοντος - ambient conditions)
3. Δοκίμιο τοιχοποιίας με μονόπλευρη επέμβαση, όπου τοποθετήθηκε η θερμομονωτική πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης (xps) σε επαφή με τον τοίχο και το IAM εξωτερικά (θερμοκρασία περιβάλλοντος - ambient conditions)
4. Δοκίμιο τοιχοποιίας με μονόπλευρη επέμβαση, όπου τοποθετήθηκε μόνο το IAM σε επαφή με την τοιχοποιία (έκθεση σε φωτιά)
5. Δοκίμιο τοιχοποιίας με μονόπλευρη επέμβαση, όπου τοποθετήθηκε το IAM σε επαφή με τον τοίχο και η θερμομονωτική πλάκα πετροβάμβακα (rockwool) εξωτερικά (έκθεση σε φωτιά)
6. Δοκίμιο ελέγχου (Control): Δοκίμιο τοιχοποιίας χωρίς καμία επέμβαση (άοπλη τοιχοποιία) (έκθεση σε φωτιά).

Για τη συντομότερη αναφορά σε κάθε δοκίμιο, χρησιμοποιείται συγκεκριμένος τρόπος ονοματολογίας που εξηγείται παρακάτω:

- Χρήση του γράμματος “M” (Masonry) για αναφορά στο δοκίμιο τοιχοποιίας
- Χρήση του γράμματος “i” (layer of insulation) για αναφορά στην πλάκα θερμομονωτικού υλικού
- Χρήση του γράμματος “L” (layer of IAM) και του αριθμού 2, για αναφορά στις 2 στρώσεις IAM που εφαρμόστηκαν
- Χρήση του γράμματος “C” (Control) για αναφορά στο δοκίμιο ελέγχου

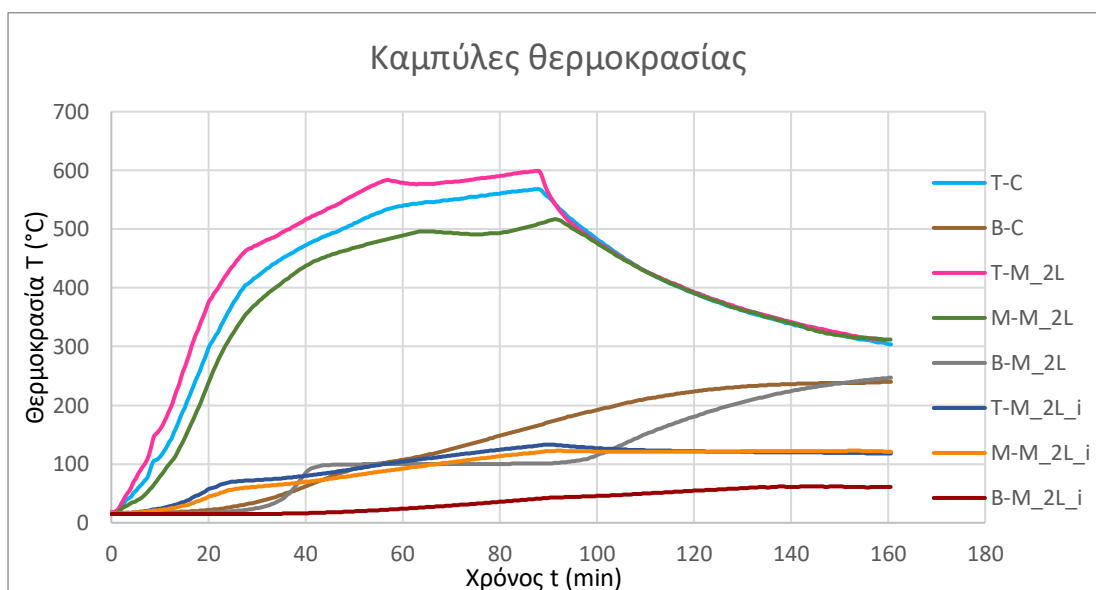
Να σημειωθεί ότι, η σειρά με την οποία αναγράφεται το κάθε γράμμα από αριστερά προς τα δεξιά, μετά το γράμμα M, είναι και η σειρά με την οποία τοποθετούνται οι στρώσεις του εκάστοτε υλικού.

3. ΕΚΘΕΣΗ ΣΕ ΦΩΤΙΑ

Οι δοκιμές πυρός, πραγματοποιήθηκαν στη Μονάδα Δοκιμών Πυρός του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και συγκεκριμένα του Εργαστηρίου Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Οι παραπάνω δοκιμές έγιναν στον κατακόρυφο κλίβανο που εδράζεται στη Μονάδα.

Τα δοκίμια, ήταν μονόπλευρα εκτεθειμένα στη φωτιά και συγκεκριμένα από την επιφάνεια που βρισκόταν η ενίσχυση ή η θερμοπρόσοψη. Να σημειωθεί, πως περιμετρικά των δοκιμίων καθώς και στην κατώτερη πλευρά, είχε τοποθετηθεί παχύ στρώμα πετροβάμβακα, με σκοπό η υψηλή θερμοκρασία να επηρεάζει το δοκίμιο αποκλειστικά από την επάνω ελεύθερη πλευρά και να εισέρχεται προς το εσωτερικό του δοκιμίου.

Σκοπός ήταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια των δοκιμίων να έχει τιμή ίση με 600°C, σύμφωνα με τον οποίο ορίστηκε και η καμπύλη κατά την εκκίνηση της δοκιμής. Η πρότυπη καμπύλη που ορίστηκε στο πρόγραμμα χειρισμού του κλιβάνου, ξεκινούσε σε χρόνο 0 να αυξάνει τη θερμοκρασία μέχρι τους 600°C με γρήγορο ρυθμό θέρμανσης, τόσο ώστε να είναι κοντά στον αρχικό ρυθμό θέρμανσης που ορίζει η καμπύλη ISO 834 – 1. Τελικώς, περίπου στα 20 min έφθασε σε ένα πλατό με θερμοκρασία ίση με 600 °C, η οποία παρέμεινε σταθερή για περίπου 70 min και εν συνεχεία έσβησαν οι καυστήρες και συνέχισε η παρατήρηση και οι μετρήσεις για περίπου άλλα 60 min.



Σχήμα 7: Διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου των τριών δοκιμίων.

Φαίνεται ξεκάθαρα, σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, ότι η συνεισφορά του πετροβάμβακα στο δοκίμιο ήταν ουσιαστική, αφού αντί για θερμοκρασία ίση με 600°C που είχε η επιφάνεια του AAM στο δοκίμιο χωρίς τη θερμομόνωση, στην περίπτωση με το εξωτερικό στρώμα πετροβάμβακα η μέγιστη θερμοκρασία ήταν μόλις 132°C

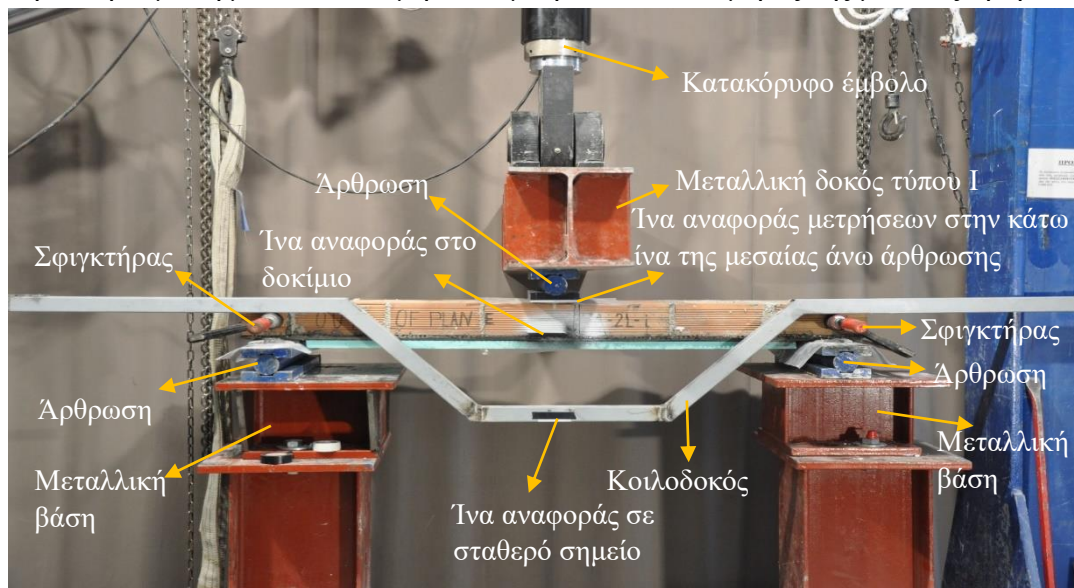
στην επάνω θέση του IAM. Επιπλέον, φαίνεται από τις θερμοκρασίες ειδικά στο δοκίμιο ελέγχου, ότι το σώμα της τοιχοποιίας προσφέρει μια ελάχιστη θερμική μόνωση (δεν σημειώθηκε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας ειδικά στους αρχικούς χρόνους), όμως αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία στο κατώτερο στρώμα αρχίζει να αυξάνεται ειδικά μετά το κλείσιμο των καυστήρων (μετά το πέρας της δοκιμής) γεγονός που φανερώνει τη μικρή θερμική αγωγιμότητα που τη χαρακτηρίζει.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας και συγκεκριμένα αναφορικά με το κομμάτι των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε το πλαίσιο φόρτισης του Εργαστηρίου Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, της εταιρείας «MTS». Η εμβέλεια φορτίσεων του πλαισίου φόρτισης είναι, 500 kN το κατακόρυφο υδραυλικό έμβολο και 250 kN το οριζόντιο.

Τα δοκίμια φορτίστηκαν με επιβολή ομοιόμορφου γραμμικού φορτίου στο μέσον του δοκιμίου, σε εκτός επιπέδου φόρτιση. Για την επιβολή του φορτίου, ουσιαστικά ασκήθηκε κατακόρυφη δύναμη, μέσω του κατακόρυφου εμβόλου του μεταλλικού πλαισίου, που με προσθήκη μεταλλικής δοκού τύπου I, προσομοιώθηκε ως ομοιόμορφη κατανομή στο μέσον. Ουσιαστικά, η μέθοδος φόρτισης για κάθε δοκίμιο τοίχου, ήταν κάμψη 3 σημείων.

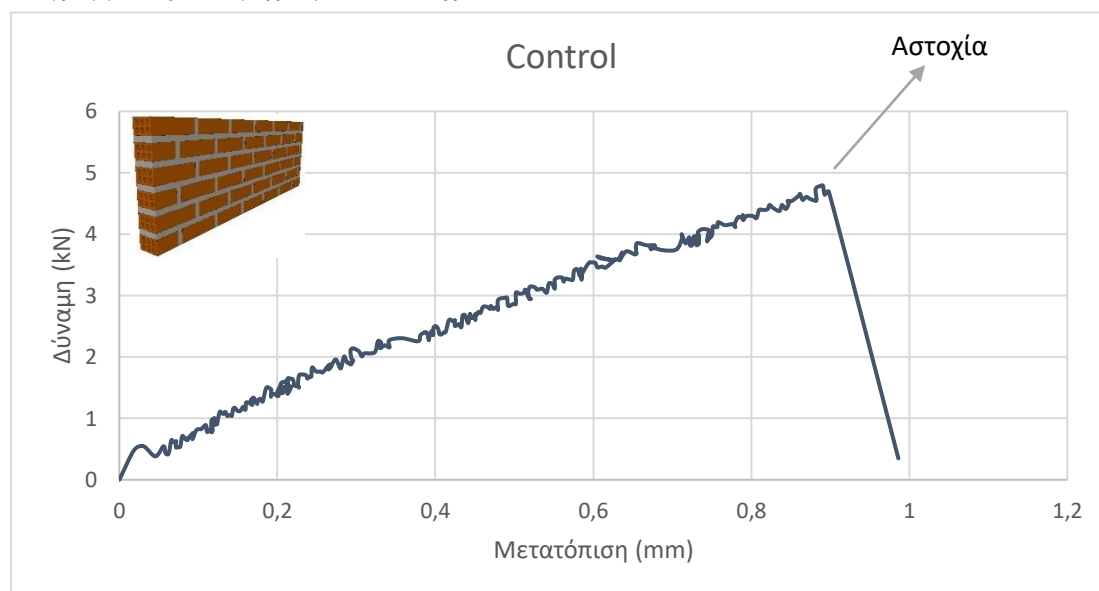
Ο κάθε τοίχος, τοποθετήθηκε σε οριζόντια διάταξη, έτσι ώστε το ύψος του εκάστοτε δοκιμίου, κατά την φόρτιση, να ανταποκρίνεται στο πλάτος του. Εν συνεχεία, κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε επάνω σε δύο μεταλλικές αρθρώσεις στα δύο άκρα (εβρισκόμενες επάνω σε μεταλλικές βάσεις), οι οποίες είχαν μεταξύ τους απόσταση (από μέσον άρθρωσης σε μέσον άρθρωσης) 1160 mm, το οποίο αντιπροσωπεύει και το καθαρό άνοιγμα του δοκιμίου. Για την τοποθέτηση του τοίχου επάνω στις αρθρώσεις, εφαρμόστηκε προτίτερα, ένα στρώμα γύψου ώστε να είναι οριζοντιοποιημένη και ομαλή η επιφάνεια για να μην υπάρχουν σφάλματα στις μετρήσεις και να είναι πλήρης η επαφή στις διεπιφάνειες. Έπειτα, αφού οριοθετήθηκε η μεσαία διατομή, μπήκε άλλη μια στρώση γύψου στο επάνω μέρος, όπου και ακούμπησε η τρίτη μεταλλική άρθρωση. Στο κάτω μέρος του κατακόρυφου υδραυλικού εμβόλου, είχε προσαρτηθεί η μεταλλική δοκός τύπου I, για τον σκοπό που αναφέρθηκε παραπάνω, η οποία αφού τοποθετήθηκε παράλληλα με τη μεσαία διατομή, ακούμπησε στο πάνω μέρος της μεσαίας άρθρωσης.



Σχήμα 8: Πειραματική διάταξη των δοκιμών για εκτός επιπέδου φόρτιση.

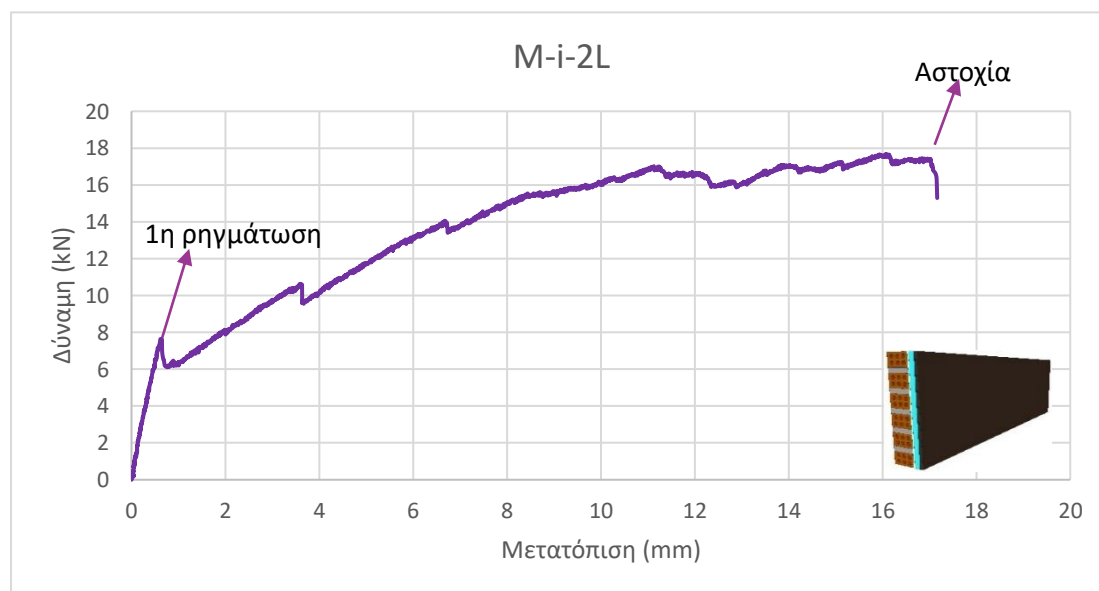
4.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Σημείων της 1^{ης} Ρηγμάτωσης, της Αστοχίας και των Δυσκαμψιών όλων των Δοκιμίων

Η δυσκαμψία της κατασκευής δηλώνει το μέγεθος της αντίστασης που παρουσιάζει στην παραμόρφωση της. Δηλαδή, το πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί η κατασκευή να παραμορφώνεται υπό την άσκηση μιας δράσης (Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου 2015, “Μηχανική των Υλικών”). Παρακάτω, δίνονται οι τιμές για τη δυσκαμψία κάθε δοκιμίου. Αυτή η δυσκαμψία ορίζεται μέχρι τη 1^η ρηγμάτωση του εκάστοτε δοκιμίου και προκύπτει από την κλίση του αρχικού ευθύγραμμου – ελαστικού κλάδου του διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης.



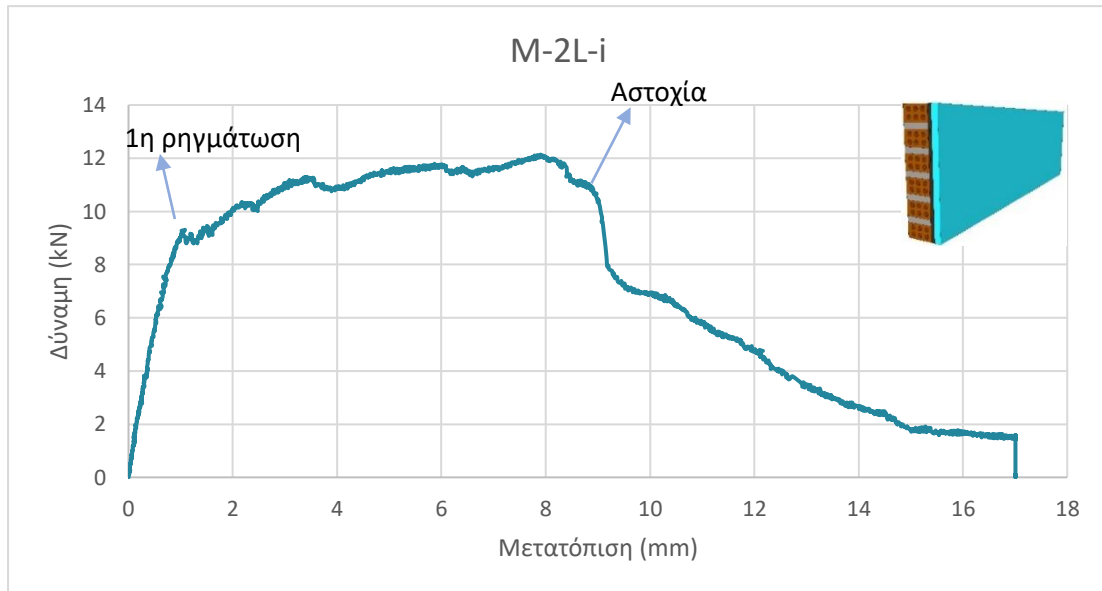
Σχήμα 9: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου ελέγχου σε φόρτιση εκτός επιπέδου.

Στο δοκίμιο αναφοράς, δεν προκύπτει σημείο πρώτης ρηγμάτωσης, καθώς εμφανίζεται απότομη αστοχία. Η αστοχία επήλθε στη μέγιστη τιμή φορτίου, δηλαδή στα 4.79 kN και σε τιμή βύθισης ίση με 0.89 mm. Η δυσκαμψία του, η οποία υπολογίζεται βάσει του πρώτου ευθύγραμμου κλάδου του διαγράμματος, όπου το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά, είναι ίση με 4.9237 kN/mm. Η ροπή αντοχής υπολογίστηκε ίση με 1.39 kNm.



Σχήμα 10: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου M-i-2L σε φόρτιση εκτός επιπέδου.

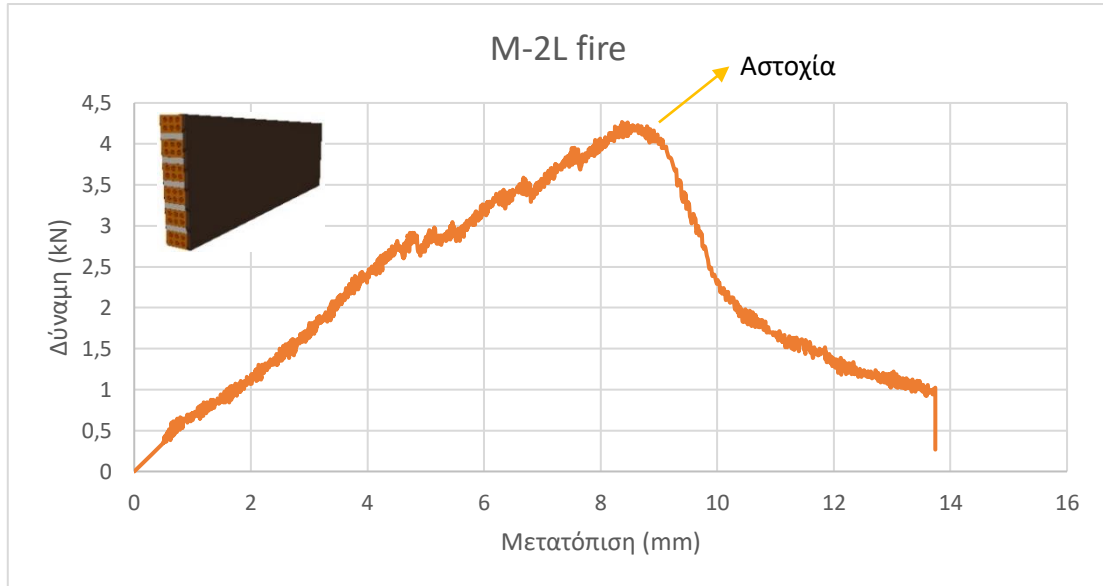
Στο δοκίμιο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient conditions) με εσωτερική θερμομόνωση και εξωτερικά το IAM, η πρώτη ρηγμάτωση επήλθε στα 7.48 kN και με βύθιση ίση με 0.65 mm. Όσον αφορά την αστοχία επήλθε με απότομη πτώση του φορτίου και συγκεκριμένα τη χρονική στιγμή που το φορτίο είχε την τιμή 17.06 kN και βύθιση ίση με την τιμή 17.12 mm. Η δυσκαμψία αυτού του δοκιμίου, η οποία προέρχεται επίσης από τον πρώτο ευθύγραμμο κλάδο, δηλαδή μέχρι την πρώτη ρηγμάτωση, είναι ίση με 12.339 kN/mm. Η ροπή αντοχής υπολογίστηκε ίση με 5.126 kNm.



Σχήμα 11: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου M-2L-i σε φόρτιση εκτός επιπέδου.

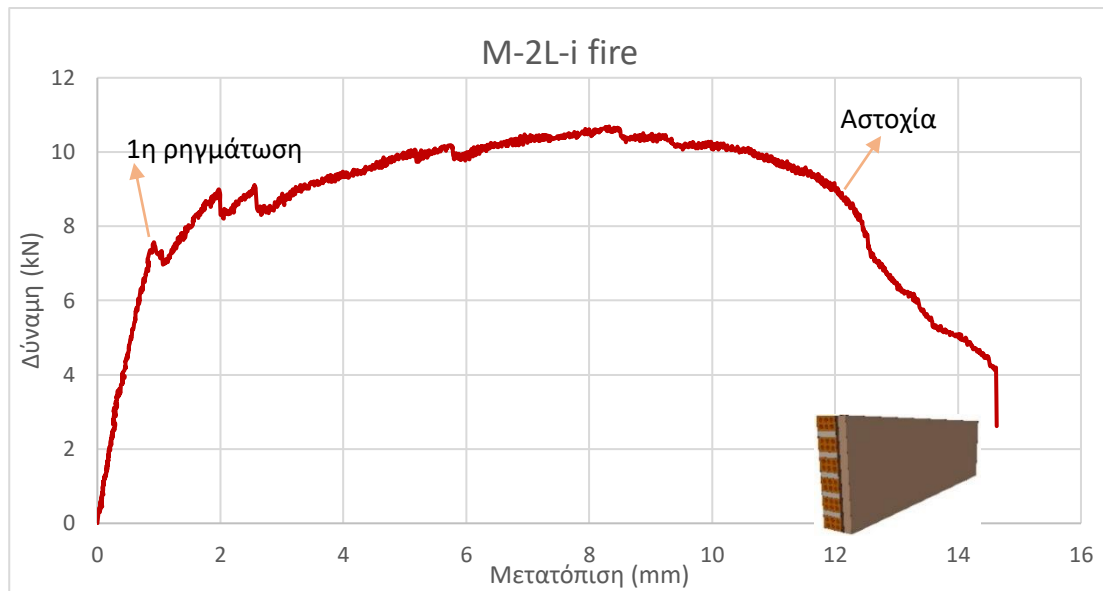
Στο δοκίμιο σε θερμοκρασία δωματίου (ambient conditions) με τη θερμομόνωση εξωτερικά και εσωτερικά το IAM, η πρώτη ρηγμάτωση επήλθε στα 9.24 kN με βύθιση ίση με 1.06 mm. Όσον αφορά την αστοχία επήλθε με την πρώτη εκ των απότομων πτώσεων του φορτίου και συγκεκριμένα τη χρονική στιγμή που το φορτίο είχε την τιμή 10.42 kN και βύθιση ίση με την τιμή 9.06 mm. Η δυσκαμψία του δοκιμίου μέχρι την πρώτη ρηγμάτωση είναι ίση με 10.425 kN/mm. Η ροπή αντοχής υπολογίστηκε ίση με 3.52 kNm.

Μαργέτη Ολυμπία



Σχήμα 12: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου M-2L μετά από έκθεση σε φωτιά σε φόρτιση εκτός επιπέδου.

Στο παρόν δοκίμιο το οποίο μετά την έκθεση σε φωτιά είχε ήδη αρκετές ρηγματώσεις, δεν ορίζεται σημείο και φορτίο πρώτης ρηγμάτωσης (δεν έχει ουσία). Αναφορικά όμως με το σημείο της αστοχίας, αυτό προκύπτει σε τιμή φορτίου ίση με 4.26 kN και βύθιση 3.75 mm (από την οριζόντια θέση). Η συνολική βύθιση είναι 8.4 mm, όπου 4.65 mm είναι η βύθιση λόγω του θερμικού φορτίου (αρνητικό βέλος κάμψης) και 3.75 mm η βύθιση από την οριζόντια θέση (θετικό βέλος κάμψης). Η δυσκαμψία στο παρόν δοκίμιο, που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν μπορεί να οριστεί σημείο πρώτης ρηγμάτωσης, ορίζεται από το ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος και είναι ίση με 0.5776 kN/mm. Η ροπή αντοχής υπολογίστηκε ίση με 1.236 kNm.

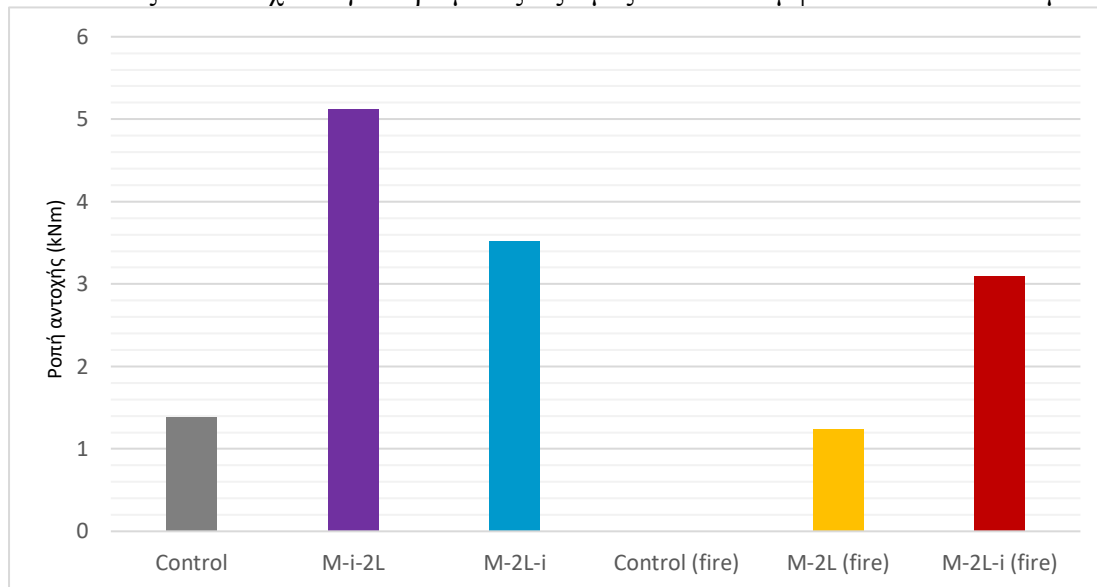


Σχήμα 13: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης δοκιμίου M-2L-i μετά από έκθεση σε φωτιά σε φόρτιση εκτός επιπέδου.

Στο δοκίμιο, με την εξωτερική στρώση πετροβάμβακα, που εκτέθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες, η πρώτη ρηγμάτωση εμφανίσθηκε στα 7.25 kN με βύθιση ίση με 1.02 mm. Η αστοχία, επήλθε προσεγγιστικά στο σημείο εκείνο που παρατηρήθηκε μείωση του μέγιστου φορτίου στο 80 %, δηλαδή σε φορτίο ίσο με 8.55 kN και τιμή βύθισης εκείνη τη στιγμή ίση με 12.3 mm. Η δυσκαμψία σε αυτό το δοκίμιο, επίσης προσδιορίστηκε μέσω του αρχικού ευθύγραμμου ελαστικού κλάδου του διαγράμματος και υπολογίστηκε ίση με 8.6674 kN/mm. Η ροπή αντοχής υπολογίστηκε ίση με 3.1 kNm.

Να σημειωθεί ότι, αναφορικά με το δοκίμιο ελέγχου μετά την έκθεση σε φωτιά, αν και έχει γίνει η αντίστοιχη αναφορά, καθώς δεν υπεβλήθη το δοκίμιο σε κάποια δοκιμή λόγω του ότι αστόχησε υπό το ίδιο βάρος του, γίνεται η θεώρηση σχεδόν μηδενικής αντοχής και μηδενικής δυσκαμψίας (πολύ μικρές τιμές που προσεγγίζουν το μηδέν).

Σε αυτό το σημείο, για να γίνει πιο εποπτική η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, θα χρησιμοποιηθούν ραβδόγραμμα που θα παρουσιάζει τις ροπές αντοχής κάθε δοκιμίου και πίνακας που θα έχει συγκεντρωμένες τις τιμές των δυσκαμψιών όλων των δοκιμίων.

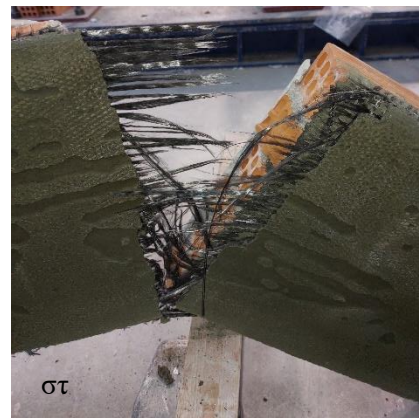


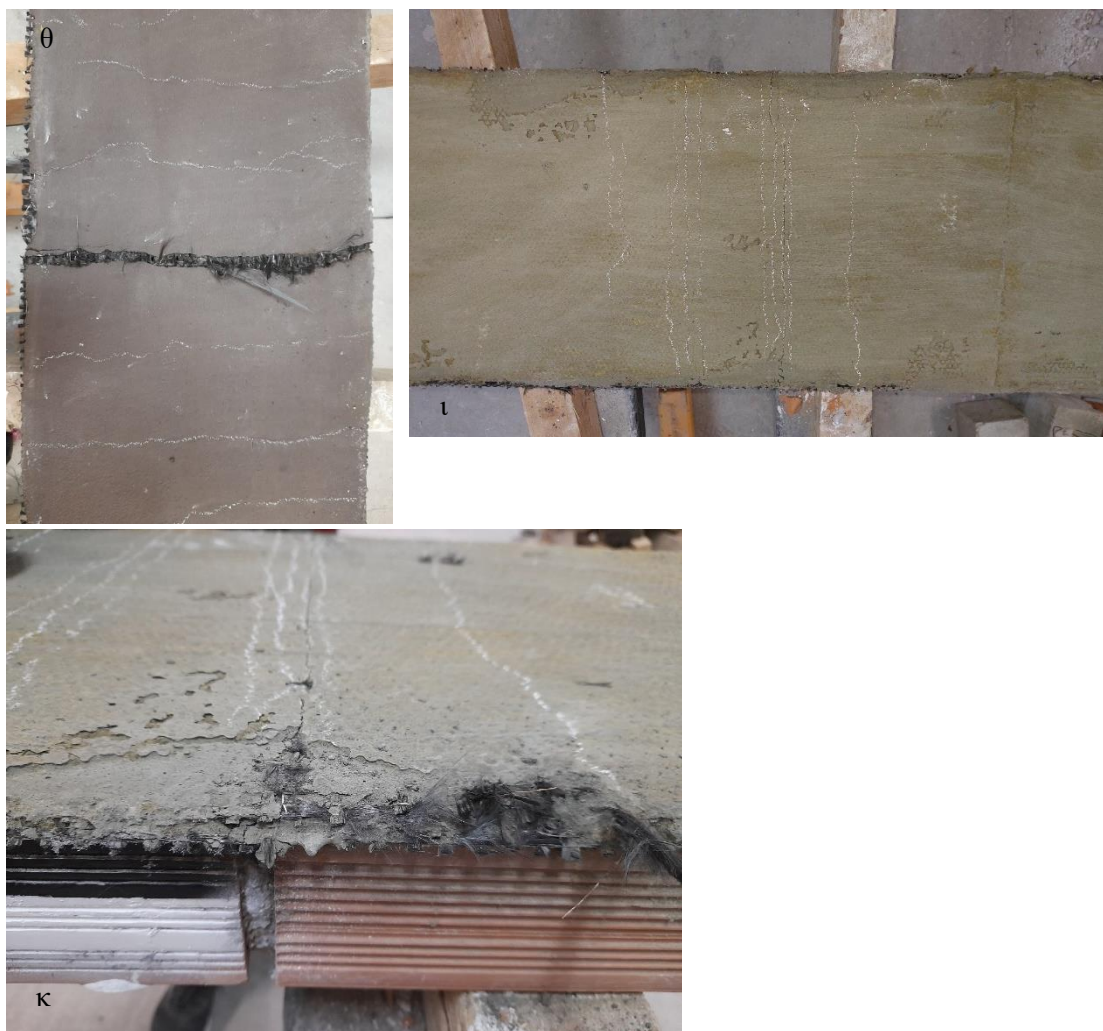
Σχήμα 14: Ραβδόγραμμα με τις τιμές της ροπής αντοχής κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 9: Δυσκαμψίες K (kN/mm) των δοκιμίων.

Δοκίμιο	Δυσκαμψία K (kN/mm)
Ελέγχου – Control	4.9237
M-i-2L	12.339
M-2L-i	10.425
Ελέγχου (μετά την έκθεση σε φωτιά) – Control (fire)	≈ 0
M-2L (μετά την έκθεση σε φωτιά - fire)	0.5776
M-2L-i (μετά την έκθεση σε φωτιά - fire)	8.6674

Σεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Φέρουσας Τοιχοποιίας με Μανδύες από Αλκαλοενεργοποιημένα
Σύνθετα Υλικά Τύπου Ινοπλέγματος – Εκτός Επιπέδου Φόρτιση

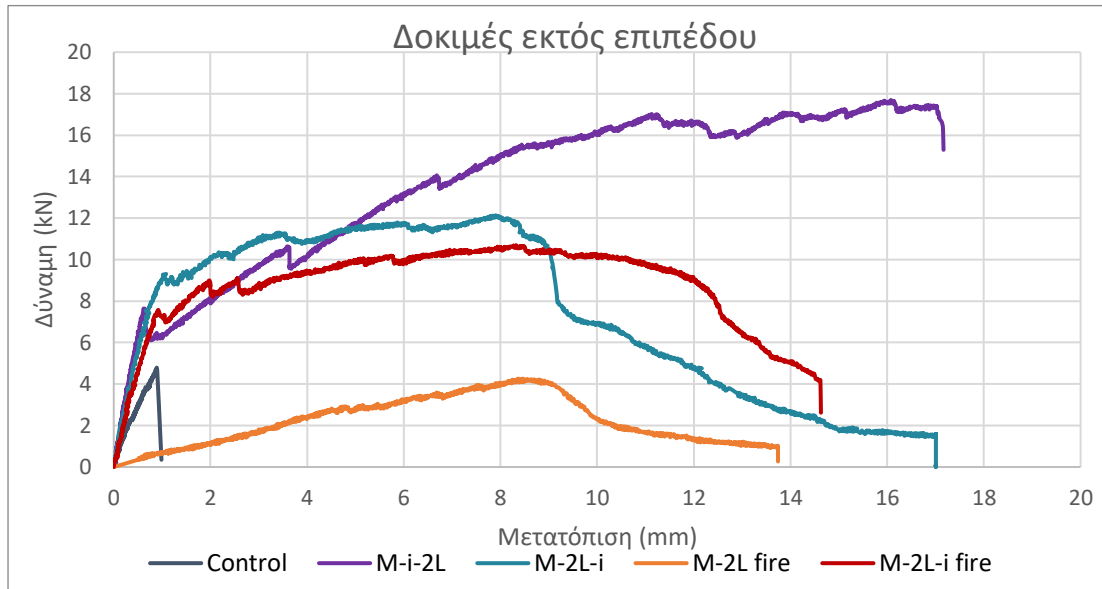




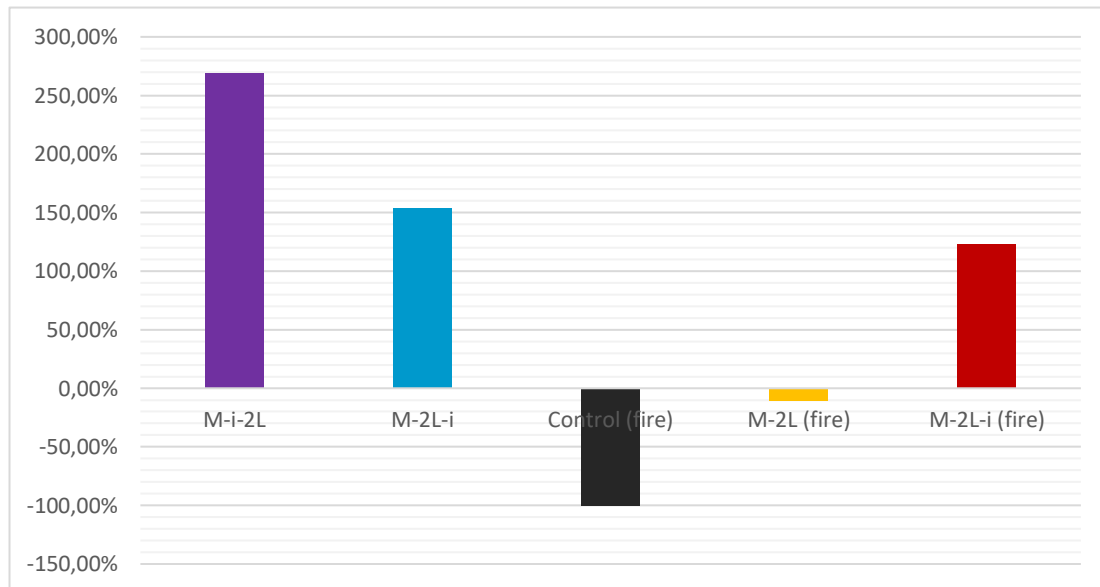
Σχήμα 15: (α) Δοκίμιο ελέγχου μετά την αστοχία. Παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας. (β) Ρωγμή κατά πλάτος του IAM του M-i-2L (στην εφελκόμενη διατομή του δοκιμίου). (γ) Αστοχία στη διεπιφάνεια των 2 στρώσεων του IAM του M-i-2L (εμφάνιση του εσωτερικού). (δ) Συνδυασμένη αστοχία στη διεπιφάνεια των δύο στρώσεων του IAM και θραύση ινών στο δοκίμιο M-i-2L. (ε) Μέγιστο βέλος κάμψης του δοκιμίου M-2L-i κατά την αστοχία. (στ) Θραύση ινών στη διατομή της αστοχίας (διατομή με μέγιστο βέλος κάμψης) στο δοκίμιο M-2L-i. (ζ) Πλήρης αστοχία κατά πλάτος των οπτόπλινθων και των αρμών της τοιχοποιίας στο δοκίμιο ελέγχου μετά την έκθεση σε φωτιά. (η) Κύρια ρωγμή και άλλες ρωγμές κατά το πλάτος του IAM στο δοκίμιο M-2L μετά την έκθεση σε φωτιά. (θ) Θραύση των ινών στις διατομές των ρωγμών στο δοκίμιο M-2L μετά την έκθεση σε φωτιά. (ι) Ρωγμές κατά πλάτος του IAM στο δοκίμιο M-2L-i μετά την έκθεση σε φωτιά. (κ) Αστοχία στη διεπιφάνεια των δύο στρώσεων του IAM στο δοκίμιο M-2L-i μετά την έκθεση σε φωτιά.

Ονομαστικά, οι τρόποι αστοχίας για κάθε δοκίμιο χωριστά είναι: για το δοκίμιο ελέγχου επέρχεται ακαριαία αστοχία, για το δοκίμιο M-i-2L εκδηλώνεται αστοχία στη διεπιφάνεια των 2 στρώσεων του IAM και θραύση των ινών, για το δοκίμιο M-2L-i προκύπτει ίδιος τρόπος αστοχίας με στοχία στη διεπιφάνεια των 2 στρώσεων του IAM και θραύση των ινών, για το δοκίμιο ελέγχου μετά την έκθεση σε φωτιά υπήρξε αστοχία και μόνο υπό την επίδραση του ίδιου βάρους, για το δοκίμιο M-2L μετά την έκθεση σε

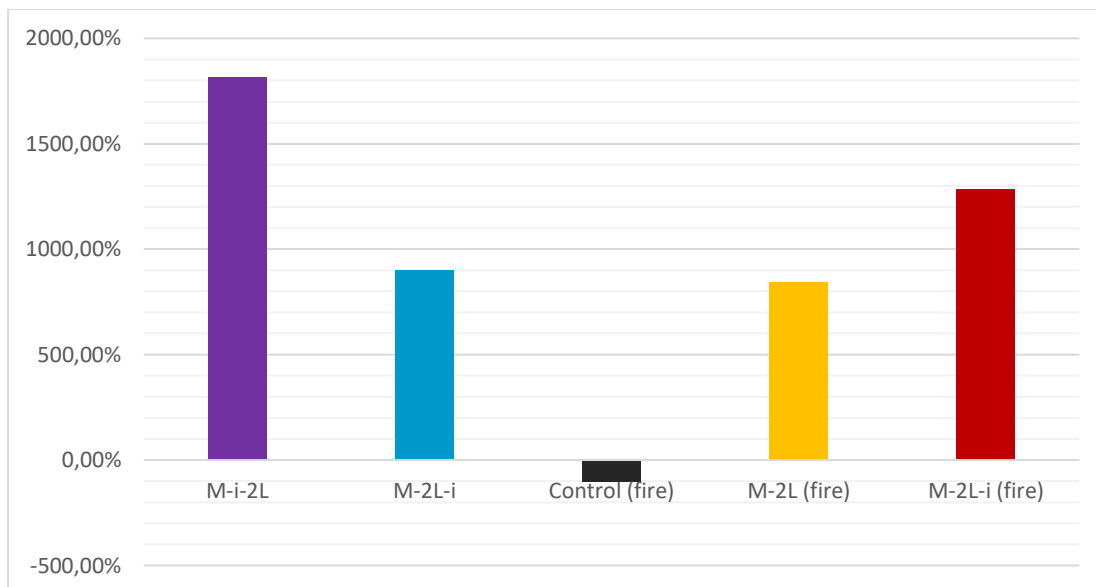
φωτιά ήταν η θραύση ινών του και τέλος για το δοκίμιο M-2L-i ο τρόπος αστοχίας ήταν αστοχία στη διεπιφάνεια των 2 στρώσεων του IAM.



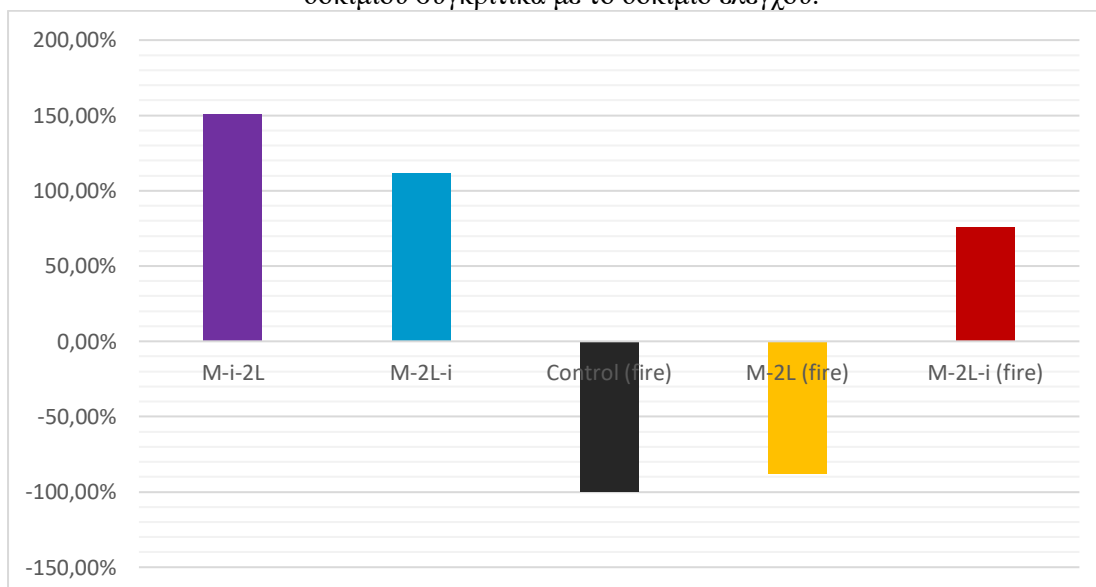
Σχήμα 16: Διάγραμμα με όλες τις καμπύλες των δοκιμών που προέκυψαν από τις δοκιμές κάμψης εκτός επιπέδου.



Σχήμα 17: Ραβδόγραμμα με την ποσοστιαία αύξηση της ροπής αντοχής συγκριτικά με το δοκίμιο ελέγχου.



Σχήμα 18: Ραβδόγραμμα με την ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης βύθισης στο μέσον του δοκιμίου συγκριτικά με το δοκίμιο ελέγχου.



Σχήμα 19: Ραβδόγραμμα με την ποσοστιαία αύξηση της δυσκαμψίας συγκριτικά με το δοκίμιο ελέγχου.

Γενικώς, ευκόλως προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενίσχυση (καμπτική) είναι επαρκείς για το δοκίμιο άοπλης τοιχοποιίας όσον αφορά την συμπεριφορά του σε εκτός επιπέδου φόρτιση και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς το δοκίμιο αναπτύσσει πάνω από την διπλάσια αρχική αντοχή του. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι μετά την έκθεση σε φωτιά, η ανταπόκριση της ενισχυμένης τοιχοποιίας με IAM με αλκαλοενεργοποιημένο κονίαμα, χωρίς την παρουσία κάποιας θερμομονωτικής προστασίας, δεν ήταν η πλέον επιθυμητή, καθώς η αντοχή μειώθηκε αν και υπήρξε η δυνατότητα για ανάπτυξη μεγαλύτερων βυθίσεων, ωστόσο ανέπτυξε αρχική παραμόρφωση το δοκίμιο και εμφάνισε ρηγματώσεις λόγω της παραμόρφωσης του υλικού AAM.

Τέλος, να σημειωθεί πως όλα τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσιάζουν καμπτική συμπεριφορά διότι η αστοχία των δοκιμίων οφείλεται στην εφελκυστική αστοχία των ινών (θραύση ινών ή αστοχία στη διεπιφάνεια των δύο στρώσεων του IAM) και δεν

ακολουθείται από ψαθυρή – απότομη κατάρρευση του φορτίου μετά την πρώτη (1η) ρηγματώση.

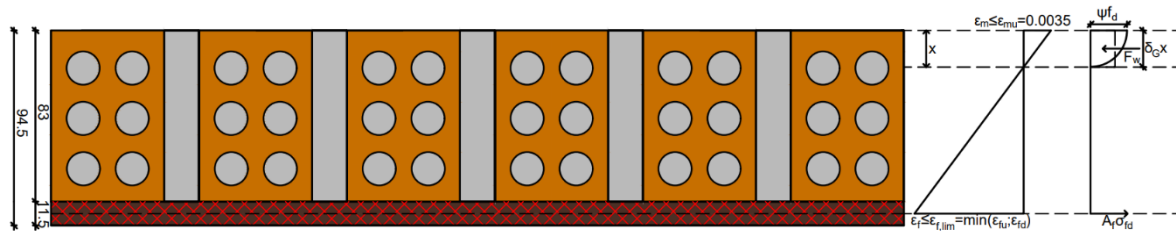
5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Γενικώς, στην αναλυτική επίλυση έχει γίνει χρήση του προσομοιώματος που έχει προταθεί από τον Αθανάσιο Χ. Τριανταφύλλου στις αντίστοιχες πανεπιστημιακές σημειώσεις για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών. Αρχικά, σύμφωνα με το παραπάνω, γίνονται οι εξής θεωρήσεις:

- Θεωρείται ότι στο επίπεδο στοιχείο της τοιχοποιίας, μήκους l και πάχους t , κατά την οριακή κατάσταση αντοχής αναπτύσσεται εκτός επιπέδου ροπή κάμψης $M_{Rd,o}$.
- Ο σπλισμός συνθέτων υλικών θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένος στην εφελκυστική περιοχή, με εμβαδόν A_f σε μήκος τοίχου l .
- Πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας θεωρούνται είτε η θραύση της τοιχοποιίας (στη θλιβόμενη ζώνη) είτε η αστοχία των συνθέτων υλικών (συνήθως λόγω αποκόλλησης και σπανιότατα λόγω εφελκυστικής θραύσης).

5.1 Περίπτωση τοιχοποιίας με τη στρώση IAM εσωτερικά

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις και εξισώσεις, που δίνουν τη θέση του ουδέτερου άξονα και τη ροπή αντοχής στην περίπτωση που το IAM βρίσκεται εσωτερικά, δηλαδή σε επαφή με την τοιχοποιία. Να σημειωθεί ότι μελετάται η περίπτωση που υπάρχει και εξωτερική στρώση θερμομόνωσης εξηλασμένης πολυστερίνης (xps) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient conditions), δεδομένου όμως του γεγονότος ότι δε συμβάλει στην ανάπτυξη αντοχής, δεν προσομοιάζεται στο σκαρίφημα.



Σχήμα 20: Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σχηματικά στο δοκίμιο M-2L.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης για το δοκίμιο M-2L.

1^η περίπτωση αστοχίας: αστοχία της τοιχοποιίας στη θλιβόμενη ζώνη πριν από την αστοχία των συνθέτων υλικών

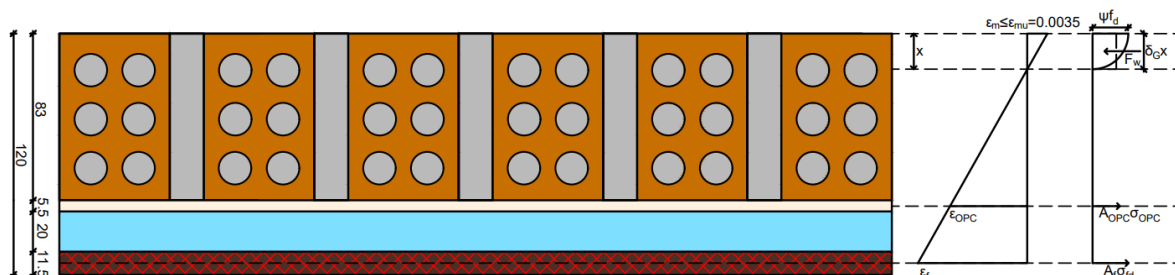
ω_f	0.0266
x	14.775 mm
$M_{Rd,o}$	11.824 kNm
F_{max}	40.77 kN
2 ^η περίπτωση αστοχίας: αστοχία (αποκόλληση ή εφελκυστική θραύση) των συνθέτων υλικών πριν από τη θλιπτική αστοχία της τοιχοποιίας	
1 ^{ος} κλάδος ($\varepsilon_m \leq 0.002$)	
ψ	-0.431 $\rightarrow \varepsilon_m < 0$ (απορρίπτεται)
	0.405 $\rightarrow \varepsilon_m = 0.00096 < 0.002$ (ok!)
	0.11 $\rightarrow \varepsilon_m = 0.00577 > 0.0035$ (απορρίπτεται)
2 ^{ος} κλάδος ($0.002 \leq \varepsilon_m \leq 0.0035$)	
ψ	0.372 $\rightarrow \varepsilon_m = 0.000106 < 0.002$ (απορρίπτεται)
$\frac{x}{t}$	0.1257

x	11.16 mm
δ_G	0.349
M_{Rd}	4.45 kNm
F_{max}	15.34 kN

Επομένως, από την αναλυτική λύση προκύπτει ότι ο τρόπος αστοχίας για το δοκίμιο είναι ο δεύτερος, δηλαδή η αστοχία (αποκόλληση ή εφελκυστική θραύση) των συνθέτων υλικών επήλθε πριν από τη θλιπτική αστοχία της τοιχοποιίας, δεδομένου ότι προέκυψε μικρότερη τιμή της ροπής αντοχής και συνεπώς και της μέγιστης δύναμης.

5.1 Περίπτωση με την στρώση IAM εξωτερικά (εσωτερική στρώση θερμομόνωσης)

Στην περίπτωση όμως όπου το στρώμα της θερμομόνωσης βρίσκεται εσωτερικά, οι παραπάνω εξισώσεις διαφοροποιούνται καθώς αυξάνεται ο μοχλοβραχίονας λόγω του πάχους της θερμομονωτικής πλάκας ενώ παρεμβάλλεται και μια στρώση (αν και αρκετά μικρή σε πάχος, έχει ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς) κονιάς (κόλλας) που συμβάλλει στην παραλαβή φορτίου. Επομένως, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, η πορεία επίλυσης που ακολουθήθηκε για την περίπτωση της εσωτερικής θερμομόνωσης σε επαφή με την τοιχοποιία, είναι η παρακάτω.



Σχήμα 21: Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σχηματικά στο δοκίμιο M-i-2L.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης για το δοκίμιο M-i-2L.

1^η περίπτωση αστοχίας: αστοχία της τοιχοποιίας στη θλιβόμενη ζώνη πριν από την αστοχία των συνθέτων υλικών

x	21.4 mm
$M_{Rd,o}$	20.73 kNm
F_{max}	71.48 kN

2^η περίπτωση αστοχίας: αστοχία (αποκόλληση ή εφελκυστική θραύση) των συνθέτων υλικών πριν από τη θλιπτική αστοχία της τοιχοποιίας

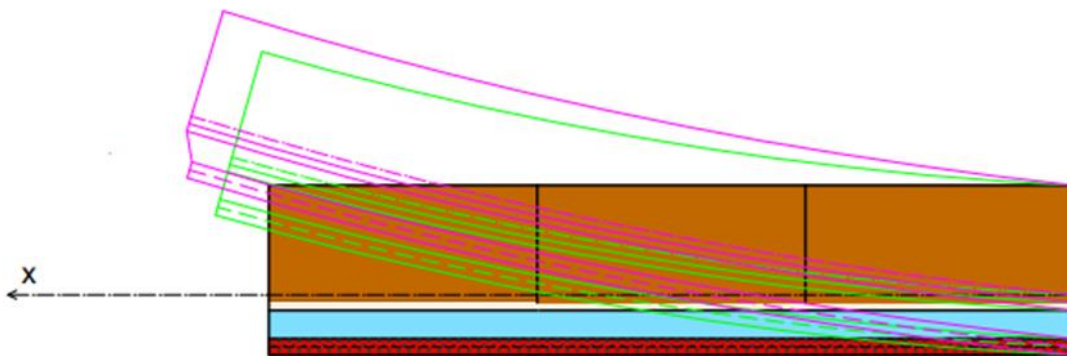
1 ^{ος} κλάδος ($\epsilon_m \leq 0.002$)	
ψ	$\ll 0 \rightarrow \epsilon_m = 0.683 > 0.002$ (απορρίπτεται)
	$0.509 \rightarrow \epsilon_m = 0.0013 < 0.002$ (ok!)
	$< 0 \rightarrow \epsilon_m < 0$ (απορρίπτεται)
2 ^{ος} κλάδος ($0.002 \leq \epsilon_m \leq 0.0035$)	
ψ	$0.0326 \rightarrow \epsilon_m = 0.000689 < 0.002$ (απορρίπτεται)
$\frac{x}{t}$	0.1257
x	18.9655 mm
δ_G	0.356

M_{Rd}	13.93 kNm
F_{max}	48.03 kN

Επομένως, από την αναλυτική λύση προκύπτει ότι ο τρόπος αστοχίας και για το δοκίμιο με την εσωτερική στρώση θερμομόνωσης είναι ο δεύτερος, δηλαδή η αστοχία επήλθε από αστοχία (αποκόλληση ή εφελκυστική θραύση) των συνθέτων υλικών, δεδομένου ότι προέκυψε μικρότερη τιμή της ροπής αντοχής και συνεπώς και της μέγιστης δύναμης.

5.3 Σχολιασμός και Σύγκριση Τιμών Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Αναλυτικής Λύσης

Παραπάνω παρατηρείται πως οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω αναλυτικών σχέσεων είναι πολύ κοντά και προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στην περίπτωση που δεν υπάρχει το στρώμα της θερμομόνωσης εσωτερικά. Ωστόσο, η διαφορά αυτή που προκύπτει ακόμα και στην παραπάνω περίπτωση, έγκειται στο γεγονός ότι η ανάλυση βασίζεται στο θεώρημα Euler - Bernoulli καθώς γίνεται η θεώρηση επίπεδων διατομών. Όμως, η επιπεδότητα της στρώσης IAM δεν υπάρχει, καθώς λαμβάνει χώρα εξόλκευση των ινών και ειδικότερα στην περίπτωση όπου παρεμβάλλεται το θερμομονωτικό υλικό το οποίο παραμορφώνεται. Για ακριβέστερα αποτελέσματα και καλύτερη προσέγγιση θα έπρεπε να θεωρηθούν πολύστρωτες διατομές και να γίνει χρήση της θεωρίας Timoshenko, η οποία λαμβάνει υπόψη τις διατμητικές παραμορφώσεις. Στην περίπτωση που παρεμβάλλεται εσωτερικά το στρώμα της θερμομόνωσης, προκύπτει μεγάλη διαφορά στο αποτέλεσμα καθώς η θερμομονωτική στρώση παραλαμβάνει μεγάλες παραμορφώσεις και άρα και διατμητικές τάσεις, γεγονότα τα οποία δε λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις της ανάλυσης. Στην Εικ. 5.3, προσομοιάζεται η κάμψη ενός δοκιμίου τοιχοποιίας με εσωτερική στρώση θερμομόνωσης, σύμφωνα με τις δύο διαφορετικές θεωρίες Euler – Bernoulli και Timoshenko.



Σχήμα 22: Προσομοίωση κάμψης δοκιμίου τοιχοποιίας με την εσωτερική στρώση θερμομόνωσης, σύμφωνα με τη θεώρηση Euler – Bernoulli (πράσινο χρώμα) και την θεώρηση Timoshenko (ροζ χρώμα).

Ως δεύτερη και τελευταία αιτία αυτής της διαφοράς που παρατηρείται στο αποτέλεσμα, ειδικότερα στην περίπτωση του δοκιμίου M-i-2L, είναι η θεώρηση που γίνεται στην αναλυτική λύση πλήρους και επαρκούς αγκύρωσης. Αυτό δεν πραγματοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία με αποτέλεσμα η ανάλυση να δίνει μεγαλύτερες τιμές για τη ροπή αντοχής σε σχέση με τις πραγματικές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την ανεπαρκή αγκύρωση κατά την πειραματική διαδικασία, παρατηρείται ολίσθηση της στρώσης του IAM σε σχέση με το δοκίμιο, οπότε δεν παραλαμβάνει τις παραμορφώσεις που έχει τη δυνατότητα να παραλάβει.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικώς, στην περίπτωση της έκθεσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όλα τα ενισχυμένα δοκίμια είχαν καλή συμπεριφορά. Αυτό αυτομάτως σημαίνει, ότι η

εφαρμογή αυτού του καινοτόμου κονιάματος σε IAM είναι αποτελεσματική, αφού οδήγησε σε ικανοποιητικές αυξήσεις τόσο στις δυσκαμψίες των ενισχυμένων δοκιμών όσο και στις τιμές της καμπτικής αντοχής. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως και στην περίπτωση που το IAM εφαρμόστηκε στην επιφάνεια της τοιχοποιίας αλλά και στην περίπτωση όπου παρεμβαλλόταν η πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης, η ενίσχυση με IAM είχε καλή απόδοση. Αυτή η κατάσταση, υποδηλώνει καλή συνάφεια επομένως και καλή συνεργασία του μανδύα ενίσχυσης και του υποστρώματος.

Παρ' όλα αυτά, δύο μειονεκτήματα που θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε περίπτωση εφαρμογής αυτής της μεθόδου ενίσχυσης και ενεργειακής αναβάθμισης, είναι η σύσταση του AAM κονιάματος, καθώς δεν έχει την πλέον επιθυμητή εργασιμότητα ούτε ρεολογία, και με μικρές διαφοροποιήσεις στη σύσταση επηρεάζονται και τα μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά και οι συνθήκες εργασιμότητας, καθώς επίσης και η μέθοδος εφαρμογής της θερμομονωτικής πλάκας. Η εφαρμογή των θερμοπροσόψεων, ειδικά στην περίπτωση της εξηλασμένης πολυστερίνης (άκαμπτη πλάκα), χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, ώστε να υπάρχει καθολική εφαρμογή και να μην εγκλωβιστούν φυσαλίδες αέρα στη διεπιφάνεια. Οι οδοντώσεις, εσφαλμένα στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγιναν κατά μήκος των δοκιμών. Ο ορθότερος τρόπος είναι κατά το πλάτος, ώστε να είναι μικρότερη η απόσταση για τον απεγκλωβισμό του αέρα.

Εν συνεχεία, όσον αφορά τα δοκίμια που εκτέθηκαν σε φωτιά, αποδοτική ήταν μόνο η ενίσχυση με IAM με την ύπαρξη θερμομονωτικής προστασίας. Συγκεκριμένα το δοκίμιο που είχε αποκλειστικά και μόνο τις 2 στρώσεις IAM απουσία πλάκας πετροβάμβακα, όχι μόνο δεν αύξησε τη δυσκαμψία και τη ροπή αντοχής σε σχέση με το δοκίμιο της άοπλης τοιχοποιίας (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) αλλά τις απομείωσε και σε σημαντικά ποσοστά. Βέβαια, συγκριτικά με το δοκίμιο της άοπλης τοιχοποιίας μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, ακόμη και αυτή η μέθοδος ενίσχυσης ήταν αποτελεσματική.

Τέλος, αναφορικά με την αναλυτική επίλυση και τα αποτελέσματα, είναι ικανοποιητικά και με πολύ καλή προσέγγιση στις περιπτώσεις που μελετώνται δοκίμια σε εκτός επιπέδου φόρτιση με την παρουσία ενίσχυσης με IAM και πιθανόν εξωτερική στρώση θερμομόνωσης. Δε δίνουν όμως καλή προσέγγιση, στην περίπτωση της εσωτερικής θερμομόνωσης, λόγω μη συνυπολογισμού των διατμητικών παραμορφώσεων του στρώματος της θερμομόνωσης και της μη επιπεδότητας της στρώσης IAM μετά την εξόλκευση ινών (θεωρία Timoshenko), καθώς γίνεται χρήση της παραδοχής Euler – Bernoulli.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γκουρνέλος Π. (2022), “Experimental and Analytical study on the in – and out-of-plane Interaction of infill walls subject to combined Seismic and Energy Retrofitting using Textile Reinforced Mortar and Thermal insulation”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [2] Καψάλης Π. (2017), “Συνδυασμένη Αντισεισμική Ενίσχυση και Ενεργειακή Αναβάθμιση Τοιχοποιίας σε εντός επιπέδου καταπόνηση: Πειραματική και Αναλυτική Μελέτη”, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- [3] Καψάλης Π. (2021), “Residual performance of fire-exposed textile reinforced concrete: experimental investigations and modeling techniques”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Vrije Universiteit Brussel, Πάτρα.
- [4] Τριανταφύλλου Α. (2017), “Δομικά Υλικά”, Εκδόσεις Gotsis, Πάτρα 2017.

- [5] Τριανταφύλλου Α. (2006), “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πάτρα 2006.
- [6] Τριανταφύλλου Α. (2015), “Μηχανική των Υλικών (2^η έκδοση)”, Πάτρα 2015.
- [7] Τριανταφύλλου Α. (2006), “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά”, Πάτρα 2006.
- [8] Arce A., Komkova A., Van De Sande J., Papanicolaou C.G. and Triantafyllou T.C. (2022), “Optimal Design of Ferronickel Slag Alkali-Activated Material for High Thermal Load Applications Developed by Design of Experiment”, Materials 2022.
- [9] Arce A., Le Galliard C., Komkova A., Papanicolaou C.G., Triantafyllou T.C. (2023), “Optimal design of ferronickel slag alkali-activated mortar for repair exposed to high thermal load”, Materials and Structures 2023.
- [10] Colombo I., Colombo M., Magri A., Zani G. and Di Prisco M. (2011), “Textile Reinforced Mortar at High Temperatures”, Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
- [11] Estevan L., Varona F.B., Baeza F.J., Torres B., Bru D. (2022), “Textile Reinforced Mortars (TRM) tensile behavior after high temperature exposure”, Elsevier Ltd. 2022.
- [12] Fang G., Kei Ho W., Tu W., Zhang M. (2018), “Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature”, Elsevier Ltd. 2018.
- [13] Gkournelos P.D., Azdejkovic L.D. and Triantafyllou T.C., M. ASCE (2022), “Innovative and Eco-friendly Solutions for the Seismic Retrofitting of Natural Stone Masonry Walls with Textile Reinforced Mortar: In- and Out-of-Plane Behavior”, American Society of Civil Engineers (ASCE) 2021.
- [14] Gkournelos P.D., Triantafyllou T.C., Bournas D.A. (2022), “Seismic upgrading of existing masonry structures: A state-of-the-art review”, Elsevier Ltd. 2022.
- [15] Gkournelos P.D., Triantafyllou T.C., M. ASCE and Bournas D.A. (2020), “Integrated Structural and Energy Retrofitting of Masonry Walls: Effect of In-Plane Damage on the Out-of-Plane Response”, American Society of Civil Engineers (ASCE) 2020.
- [16] Kapsalis P., Tysmans T., D. Van Hemelrijck and Triantafyllou T. (2021), “State-of-the-Art Review on Experimental Investigations of Textile-Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures”, Journal of Composites Science 2021.
- [17] Karlos K., Tsantilis A. and Triantafyllou T. (2020), “Integrated Seismic and Energy Retrofitting System for Masonry Walls Using Textile-Reinforced Mortars Combined with Thermal Insulation: Experimental, Analytical, and Numerical Study”, Journal of Composites Science 2020.

8. ΕΠΙΒΛΕΨΗ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας κατά το τελευταίο ακαδημαϊκό έτος των προπτυχιακών σπουδών μου. Τόσο η κατασκευή των δοκιμών της τοιχοποιίας, όσο και η εφαρμογή της ενίσχυσης με IAM και των υλικών της θερμομόνωσης (εξηλασμένη πολυστερίνη και πετροβάμβακας) έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών καθώς και στη Μονάδα Δοκιμών Πυρός του ίδιου Τμήματος. Η πειραματική διάταξη για τη φόρτιση των δοκιμών υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, ενώ η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες πραγματοποιήθηκε στη Μονάδα Δοκιμών Πυρός του ίδιου Τμήματος όπου διατίθεται ο κατάλληλος εξοπλισμός.

Η πραγματοποίηση όλων των παραπάνω διεργασιών θα ήταν αδύνατη χωρίς τη σημαντική καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή κ. Αθανάσιου Τριανταφύλλου, που με τις γνώσεις του και την πολυετή εμπειρία του πάνω σε αυτό το αντικείμενο, οδήγησε αυτή την πειραματική εργασία στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Επιπλέον, ιδιαιτέρως σημαντική ήταν και η συμβολή του μεταδιδακτορικού ερευνητή κ. Καψάλη Παναγιώτη, ο οποίος με τις θεωρητικές του γνώσεις σε σχέση με την παρούσα ερευνητική εργασία τόσο σε επίπεδο θεωρίας όσο και σε επίπεδο εφαρμογής, σε συνδυασμό με την άψογη συνεργασία μας, βοήθησε στην αποτελεσματική περάτωση ολόκληρης της διαδικασίας, όντας παρών στην πειραματική εργασία από την πρώτη στιγμή. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί και η βοήθεια που δόθηκε από τον τεχνικό του Εργαστηρίου κ. Κυριάκο Κάρλο, ο οποίος γνωρίζοντας την ορθή και ασφαλή λειτουργία του εξοπλισμού του Εργαστηρίου, σε συνδυασμό με το θεωρητικό του υπόβαθρο, συνέβαλε ώστε να τελεσφορήσει όλη αυτή η προσπάθεια. Θέλω λοιπόν, σε αυτό το σημείο, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς όλους τους προαναφερθέντες, χάρη στους οποίους καταλήξαμε σε αυτό το σημαντικό και άρτιο αποτέλεσμα.

Τέλος, ευχαριστώ με όλη μου την καρδιά την οικογένειά μου, για την αγάπη, τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους καθ' όλη αυτή τη διάρκεια της προσωπικής μου εργασίας.