

## **Πειραματική Διερεύνηση της Διατμητικής Συμπεριφοράς Άοπλης Φέρουσας Τοιχοποιίας Ενισχυμένης με TRM**

**Αθανασία Θώμογλου\*, Θεόδωρος Ρουσάκης, Αθανάσιος Καραμπίνης**

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης  
Πανεπιστημιούπολη Κιμμερίων, 67100, Ξάνθη  
athomogl@civil.duth.gr, trousak@civil.duth.gr, karabin@civil.duth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι κατασκευές από άοπλη φέρουσα τοιχοποιία (ΑΦΤ) έχουν υψηλή σεισμική τρωτότητα κυρίως εξαιτίας της χαμηλής διατμητικής αντοχής των πεσσών, οι οποίοι εμφανίζουν ψαθυρή αστοχία όταν υποβάλλονται σε φορτία εντός επιπέδου. Οι ενισχύσεις των υφιστάμενων αυτών κατασκευών με νέα σύνθετα υλικά από ινοπλέγματα μέσα σε μανδύα κονιάματος τσιμεντοειδούς βάσης TRM ήρθε ως φυσική εξέλιξη των παραδοσιακών μεθόδων λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Στην παρούσα εργασία διερευνάται πειραματικά η διατμητική αντοχή ΑΦΤ οι οποίες αποτελούνται από τούβλα Orthoblock K300 και από συνδετικό κονίαμα και υποβάλλονται σε δοκιμή διαγώνιας θλίψης. Σημαντική παράμετρος που μελετάται είναι ο αριθμός των στρώσεων της εξωτερικής ενίσχυσης με TRM. Συγκρίνονται μεταξύ τους τα πειραματικά αποτελέσματα των άοπλων και ενισχυμένων τοιχοποιιών των διαφορετικών στρώσεων. Σκοπός είναι η διερεύνηση σε βάθος και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε δράσεις εντός επιπέδου.

### **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Την τελευταία δεκαετία έχει γίνει εκτενής έρευνα σχετική με την ενίσχυση άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας με εξωτερικό οπλισμό TRM. Η εξωτερική ενίσχυση με ινοπλέγματα μέσα σε μανδύα κονιάματος τσιμεντοειδούς βάσης TRM η οποία συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία υπό διαφορετικούς όρους: FRCM, ινοπλέγματα σε οπλισμένο σκυρόδεμα (TRC), ινοπλέγματα μέσα σε μήτρα τσιμέντου (CMG), ή ινοπλέγματα μέσα σε ανόργανη μήτρα IAM (IMG) έχει αναδειχθεί ως μία εναλλακτική τεχνική, η οποία εκτός από τα πλεονεκτήματα της συμβατότητας των υλικών ενίσχυσης και του υποστρώματος των τοιχοποιιών, βελτιώνει τη σεισμική ικανότητα των κατασκευών. Πρώτοι οι Triantafillou et al. (2005), Triantafillou et al. (2006) και Papanicolaou et al. (2007) μελέτησαν το είδος αυτό ενίσχυσης και πρότειναν προσομοιώματα σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής της ενισχυμένης τοιχοποιίας. Επιπλέον, οι Prota et al. (2006), Lignola et al. (2009), Faella et al. (2010), Papanicolaou et al. (2011), Babaeidabarad (2013), Parisi et al. (2013), Tomazevic et al. (2014), Gams et al. (2014), Corradi et al. (2014), Borri et al. (2014), Viscovic et al. (2015), Ferretti et al. (2015), Almeida et al. (2015), αξιολόγησαν την διατμητική ικανότητα των υφιστάμενων τοιχοποιιών και τη βελτίωσή της για εξωτερική ενίσχυση με FRP ή FRCM συγκρίνοντας την αποτελεσματικότητα των δυο αυτών μεθόδων.

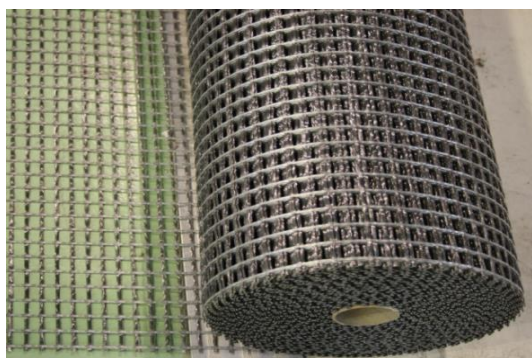
Η εργασία αφορά σε δοκιμές άοπλης τοιχοποιίας από τούβλα ενισχυμένης με TRM η οποία υπόκειται σε δοκιμή διαγώνιας θλίψης. Το σύστημα ενίσχυσης TRM αποτελείται από από μία, δύο ή τρεις στρώσεις από πλέγμα ινών υάλου μέσα σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος και πλεονεκτεί έναντι των άλλων λύσεων ενίσχυσης στην εύκολη εφαρμογή, στη εξαιρετική πρόσφυση του κονιάματος με το υπόστρωμα του τούβλου, στη μεγάλη εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος και στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας αυξάνοντας τη συμβατότητα με την τοιχοποιία. Σκοπός είναι η διερεύνηση σε βάθος και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της εντός επιπέδου τοιχοποιίας σε φυσική κλίμακα από τούβλα με κατακόρυφες οπές, πάχους 300mm οι οποίες ενισχύονται με διαφορετικές στρώσεις υαλοπλέγματος και στις δύο όψεις των τοίχων.

## 2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

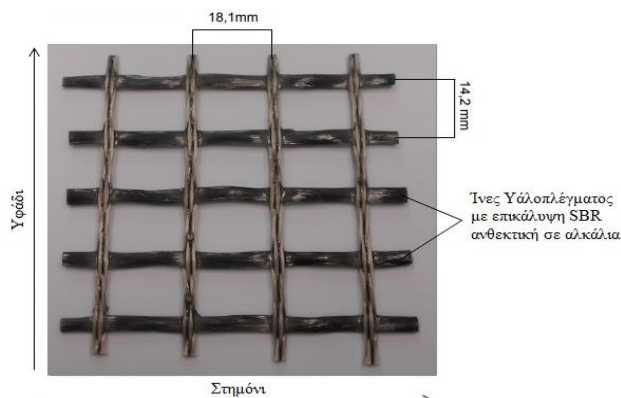
Για τη μελέτη αυτή κατασκευάστηκαν 5 τοιχοποιίες από τούβλα με διάσταση  $1200 \times 1220 \times 300$  mm, 2 δοκίμια ελέγχου και 3 ενισχυμένα. Τα δοκίμια ΑΦΤ κατασκευάστηκαν από εξειδικευμένο προσωπικό για να εξασφαλιστεί η ποιότητα και η συνέπεια της κατασκευής. Στα ενισχυμένα τοιχώματα ΑΦΤ εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι συστήματος δομητικής ενίσχυσης με TRM: 1-στρώσης, 2- στρώσεων και 3-στρώσεων με πλήρη κάλυψη και των δύο όψεων του τοίχου. Η ονοματολογία των διαφορετικών δοκιμών έχει ως εξής: UM για άοπλη τοιχοποιία, το “S” υποδηλώνει τη δοκιμή διαγώνιας θλίψης (Shear-diagonal compression test), ο δείκτης “O” υποδηλώνει το είδος του τούβλου (Orthoblock K300), G1 για εξωτερική ενίσχυση με 1 στρώση υαλοπλέγματος με κονίαμα (διπλής όψης, δηλαδή δύο στρώσεις συνολικά), -1 ο αριθμός πανομοιότυπων δοκιμών (βλέπε και Πίνακα 2)

## 3 ΧΑΡΑΚΤΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ

Οι ονομαστικές διαστάσεις των τούβλων ήταν  $250 \times 300 \times 240$  mm, ενώ οι ακριβείς διαστάσεις ήταν  $249 \times 301 \times 242$  mm. Η θλιπτική αντοχή των τούβλων Orthoblock K300 είναι 10MPa σύμφωνα με το πρότυπο EN 772-1 (2000). Ένα συνδετικό κονίαμα λεπτής στρώσης κατηγορίας 10M χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή όλων των τοίχων, με ονομαστικό πάχος κονιάματος μεταξύ τούβλα 3 mm. Η θλιπτική αντοχή 28 ημερών του συνδετικού κονιάματος που λαμβάνεται με δοκιμή πρισμάτων κονιάματος  $40 \times 40 \times 160$  mm σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-11(1993) είχε μέσο όρο 5.33 MPa. Το υαλόπλεγμα της εξωτερικής ενίσχυσης των τοιχοποιιών αποτελούνταν από μια, δύο ή τρεις στρώσεις πλέγματος σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος. Οι ίνες υάλου ήταν τοποθετημένες κατά μήκος δύο ορθογώνιων διευθύνσεων με αξονική απόσταση κλώνων 18.1mm στη κύρια και 14.2mm στη δευτερεύουσα κατεύθυνση, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 ενώ, η μάζα του ανά μονάδα επιφάνειας ήταν  $360 \text{ g/m}^2$ . Το μέτρο ελαστικότητας στην κύρια διεύθυνση ήταν 77 GPa (Πίνακας 1). Το ινοπλισμένο τσιμεντοειδές κονίαμα με ποζολανικά πρόσμικτα είχε θλιπτική και καμπτική αντοχή 28 ημερών 22.1 MPa (βάσει EN 1015-11) και 6.78MPa, αντίστοιχα, ενώ το μέτρο ελαστικότητάς του ισούνταν με 8.03 GPa (σύμφωνα με τον παραγωγό).



Σχήμα 1α: Ρολό υαλοπλέγματος  
SikaWrap® -350G Grid



Σχήμα 1β: Διαστάσεις υαλοπλέγματος  
SikaWrap®-350GGrid



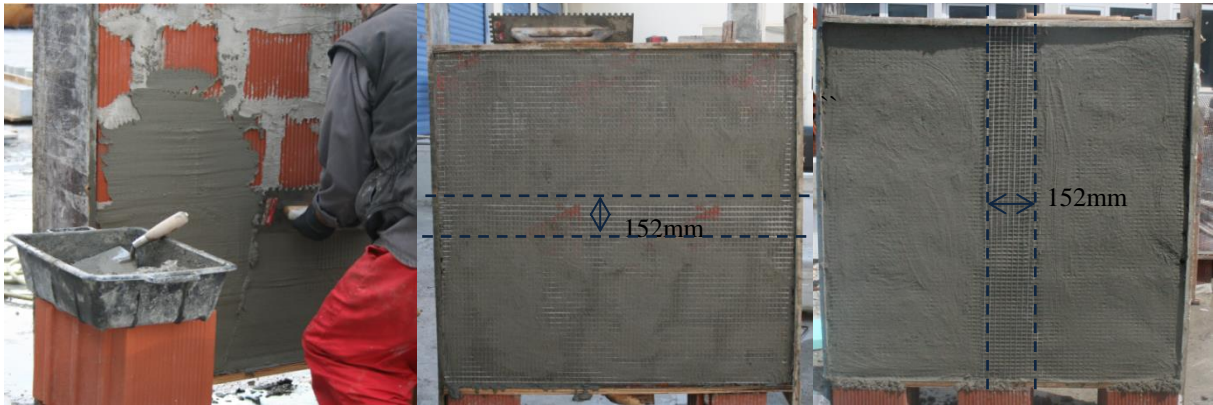
Σχήμα 2: α) Φάση κατασκευής ΑΦΤ, β) συντήρηση 28 ημερών, γ) προετοιμασία καλουπιού και εξωτερικής επιφάνειας για την εφαρμογή της ενίσχυσης TRM

Πίνακας 1: Τεχνικές προδιαγραφές του τούβλου, του συνδετικού κονιάματος τοιχοποιίας και του υαλοπλέγματος (SikaWrap® -350G Grid)

Θλιπτική αντοχή τούβλων Ορθοblock K300 (EN 772-1 (2000))	10,01 N/mm <sup>2</sup>
Θλιπτική αντοχή συνδετικού κονιάματος ΚΕ.Β.Ε. (EN 1015-11)	5.33 N/mm <sup>2</sup>
Κατασκευή πλέγματος <b>SikaWrap®-350G Grid</b>	Διαξονικό πλέγμα με διεύθυνση ινών 0°/90°
<b>Τεχνικά Χαρακτηριστικά πλέγματος</b>	
Ακατέργαστο βάρος	280 g/m <sup>2</sup> ± 5% Στημόνι (οριζόντια): 145 g/m <sup>2</sup> ± 5% Υφάδι (κατακόρυφα): 135 g/m <sup>2</sup> ± 5%
Βάρος μετά την επιφανειακή επεξεργασία	Συνολικά: 360 g/m <sup>2</sup> ± 5%
Πυκνότητα ινών	2,6 gr/cm <sup>3</sup>
Διαστάσεις πλέγματος	18,1mm x 14,2 mm (κέντρο σε κέντρο)
<b>Μηχανικές / Φυσικές Ιδιότητες Ξηρών Ινών Πλέγματος</b>	
Εφελκυστική Αντοχή:	2'600 N/mm <sup>2</sup> (μέτρηση κατά την ύφανση)
Μέτρο Ελαστικότητας	> 80'000 N/mm <sup>2</sup>

Μέγιστη αντοχή: Στημόνι (οριζόντια)	~77 kN/m
Παραμόρφωση θραύσης:	Στημόνι: ~ 4,10 %
	Υφάδι: ~ 3,45 %

Η εξωτερική ενίσχυση κατασκευάστηκε σε ένα επίπεδο καλούπι με εφαρμογή του πρώτου στρώματος του κονιάμα σε ονομαστικό πάχος 5 mm. Μία πρώτη στρώση κονιάματος Sika® MonoTop®-722 Mur εφαρμόζεται στο προετοιμασμένο υπόστρωμα. Το ελάχιστο πάχος στρώσης είναι 5mm. Μια στρώση πλέγματος SikaWrap®-350G Grid εγκιβωτίζεται στο υπάρχον νωπό υπόστρωμα με αλληλεπικάλυψη στο κέντρο 152mm και έπειτα εφαρμόζεται μία δεύτερη στρώση Sika® MonoTop® -722 Mur πάχους 5mm για να καλύψει τελείως το πλέγμα, όπου ολοκληρώνεται η ενίσχυση TRM 1-στρώσης. Με την ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και η ενίσχυση με 2 και 3 στρώσεις όπου υπάρχει τοποθέτηση πλέγματος και κονιάματος εναλλάξ ενώ η αλληλεπικάλυψη του πλέγματος στο κέντρο της τοιχοποιίας εφαρμόζεται εναλλάξ στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση (Σχήμα 3). Η ενισχυμένη τοιχοποιία ωριμάζει για 28 ημέρες.

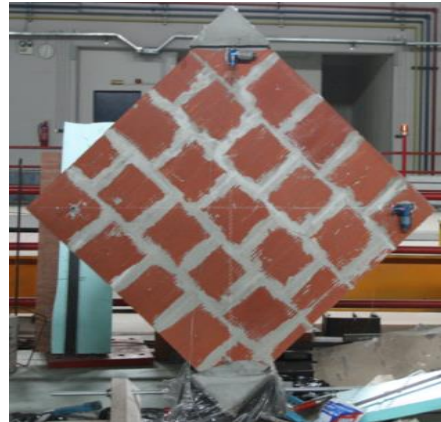
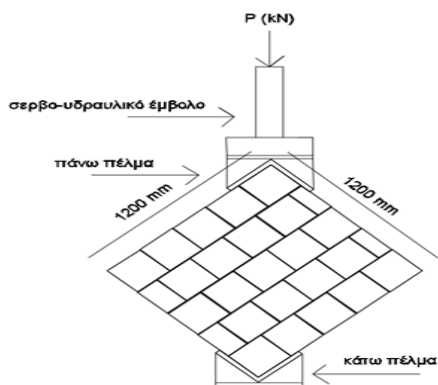


Σχήμα 3: α) Εφαρμογή πρώτης στρώσης κονιάματος ενίσχυσης με Sika® MonoTop® -722, β) εγκιβωτισμός μιας στρώσης υαλοπλέγματος SikaWrap® -350G Grid με αλληλεπικάλυψη στο κέντρο 152mm κατακόρυφα και β) οριζόντια εναλλάξ για περισσότερες από μία στρώσεις υαλοπλέγματος

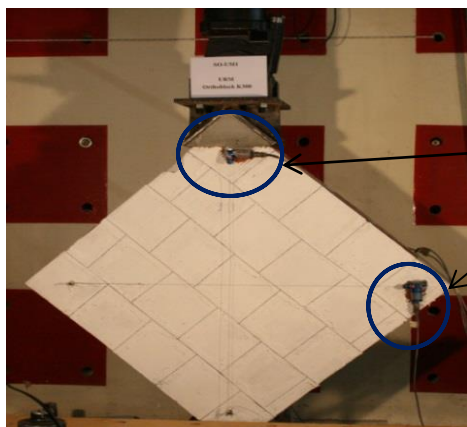
### 3.1 Πειραματική διάταξη - Δοκίμια

Το Σχήμα 4α απεικονίζει τη διάταξη της δοκιμής φόρτισης των τοιχοποιιών εντός επιπέδου. Εφαρμόστηκε διαγώνια θλίψη μέσω ενός σερβο-υδραυλικού εμβόλου μηχανής MTS ικανότητας 450kN. Μεταλλικά πέλματα τοποθετήθηκαν διαγώνια απέναντι από τις γωνίες του δοκιμίου, ενώ το άνω πέλμα συνδέθηκε με το σερβο-υδραυλικό έμβολο μηχανής MTS. Οι διαστάσεις των πελμάτων κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις διαστάσεις που παρέχονται στο πρότυπο ASTM E519. Για την πλήρωση των δυο πελμάτων χρησιμοποιήθηκε υψηλής επιτελεστικότητας έγχυτο ινοπλισμένο τσιμεντοειδές κονιάμα SikaGrout-312 HP το οποίο μετά την τοποθέτησή του σε κάθε πέλμα ωριμάζε κατ'ελάχιστο 24 ώρες (Σχήμα 4β).

Το θλιπτικό φορτίο εφαρμόστηκε μονοαξονικά και μονοτονικά. Η διατμητική παραμόρφωση στους άξονες των δυο διαγωνίων μετρήθηκε με τη χρήση μετρητών διατμητικής παραμόρφωσης (strain gauges) με μήκος 10 mm με επέκταση μήκους προσαρτημένους στο μέσον του ενισχυμένου δοκιμίου (Σχήμα 5). Τέσσερις αισθητήρες παραμόρφωσης εκτυλισσόμενου σύρματος (SpaceAge string position transducers) χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της βράχυνσης και επιμήκυνσης των διαγωνίων της τοιχοποιίας σε κάθε πλευρά. Ένα LVDT τοποθετήθηκε στο κέντρο του τοίχου για τη μέτρηση της εκτός επιπέδου παραμόρφωσης.

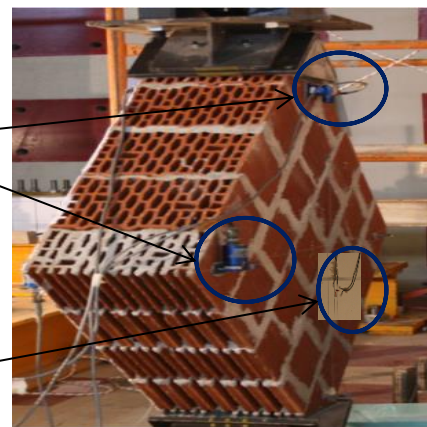


Σχήμα 4: α) Πειραματική διάταξη δοκιμίου τοιχοποιίας με τούβλα Orthoblock K300, β) απόλυτη προσαρμογή της γωνίας με τις πλευρές του πέλματος (κέντρο) και τοποθέτηση καπέλου από υψηλής επιτελεστικότητας έγχυτο ινοπλισμένο τσιμεντοειδές κονίαμα (SikaGrout-312 HP)



Αισθητήρες μετατόπισης σύρματος (SpaceAges)

Μετρητές διατμητικής παραμόρφωσης (strain gauges)



Σχήμα 5: Διάταξη οργάνων μέτρησης στην άοπλη τοιχοποιία στις δυο πλευρές

Το φορτίο εφαρμόστηκε μονοτονικά μέχρι το σημείο αστοχίας με ρυθμό 0.01 mm/sec. Όλα τα δεδομένα συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό σύστημα απόληξης δεδομένων που με καταγραφή 50 χρονομετρημένων θέσεων μετατόπισης και φορτίου σε κάθε δευτερόλεπτο. Η δοκιμή διαγώνιας θλίψης χρησιμοποιείται ευρέως για τη διεύρυνση της γνώσης σχετικά με τη συμπεριφορά της εντός επιπέδου φόρτισης της τοιχοποιίας. Αναγνωρίζεται ότι η διαγώνια θλίψη δεν αναπαράγει απαραίτητα μια πραγματική συνθήκη συμπεριφοράς πεδίου των τοιχοποιιών. Ωστόσο, είναι περισσότερο συντηρητική λόγω της περιορισμένης τιμής του κατακόρυφου φορτίου και είναι τυποποιημένη σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E519 / E519M (ASTM 2010).

#### 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών όσον αφορά τη διατμητική τάση αστοχίας, τη διατμητική παραμόρφωση αστοχίας, το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο, το επιβαλλόμενο φορτίο αστοχίας, καθώς και τη μορφή αστοχίας για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στις στήλες 1, 2, 3, 4 και 5 του Πίνακα 2, αντίστοιχα. Η στήλη 4 δείχνει ότι για τα δυο δοκίμια ελέγχου (SO-UM1, SO-UM2), το μέσο φορτίο αστοχίας ήταν 237.08 kN, ενώ το

επιβαλλόμενο φορτίο αστοχίας που καταγράφηκε για τη 1-στρώση (SO-UMG1) ήταν 329.10 kN το οποίο ήταν περίπου 1.39 φορές υψηλότερο. Το δοκίμιο με ενίσχυση 3 στρώσεων ενίσχυσης παρουσίασε το υψηλότερο φορτίο αστοχίας 375.07 kN που είναι περίπου 1.58 φορές υψηλότερο από το δοκίμιο χωρίς ενίσχυση και 1.14 φορές αυτού της 1-στρώσης ενίσχυσης με TRM.

Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα

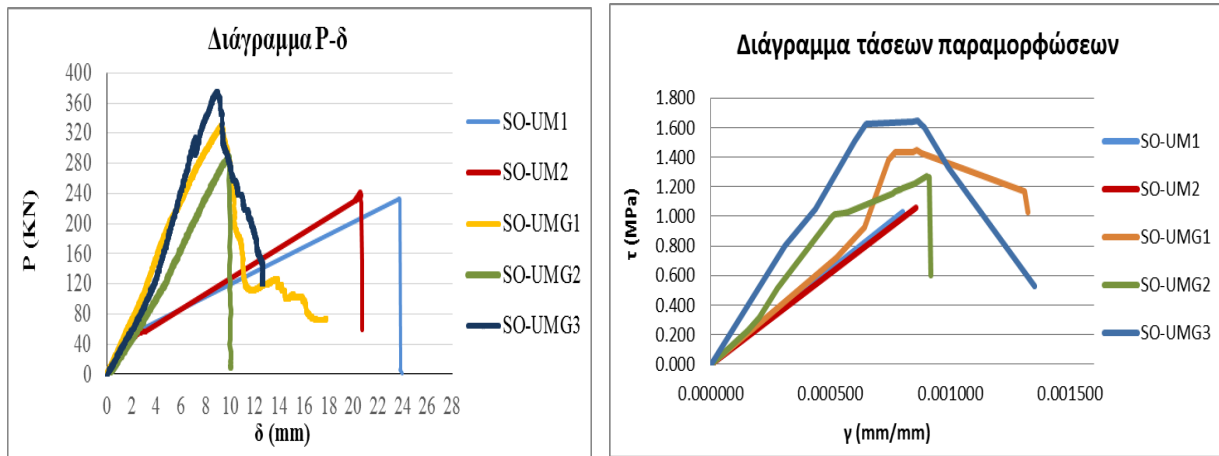
Κωδικός Δοκιμίου	Διατμητική τάση	Διατμητική παραμόρφωση	Επιβαλλόμενο φορτίο αστοχίας	Μέσο επιβαλλόμενο φορτίο αστοχίας	Μορφή Αστοχίας
	$\tau_u$ (MPa) (1)	$\gamma_u$ (mm/mm) (2)	$P_u$ (kN) (3)	$P_{u,avg}$ (kN) (4)	(5)
SO-UM1	1.02659	0.000800	233.27	237.08	Διατμητική τριβή
SO-UM2	1.05869	0.000857	240.88		Διαγώνιος εφελκυσμός
SO-UMG1	1.44835	0.000865	329.10		Αστοχία TRM
SO-UMG2	1.26899	0.000928	288.35	330.84	Σύνθλιψη πέλματος
SO-UMG3	1.65064	0.000837	375.07		Σύνθλιψη πέλματος

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα του μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου που αναγράφονται στη στήλη 3 του Πίνακα 2 αναφέρονται στις τιμές που μετρούνται κατά μήκος της διαγωνίου και τα οποία αντιστοιχούν σε  $0.707(\cos 45^\circ)$  φορές την ικανότητα διάτμησης των τοίχων κατά την οριζόντια διεύθυνση. Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του μέγιστου φορτίου που εφαρμόζεται για κάθε ενισχυμένο δοκίμιο προς αυτήν του άοπλου δοκιμίου ελέγχου. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει αύξηση της διατμητικής αντοχής και κατ'επέκταση της βελτίωσης της απόδοσης της ενίσχυσης ανέρχεται σε ποσοστό 139%, 122% και 158% για την ενίσχυση 1, 2 και 3-στρώσεων με TRM αντίστοιχα.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ενίσχυση με 2 και 3 στρώσεις απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση αναλυτική και πειραματική καθώς η αστοχία σύνθλιψης πέλματος περιορίζει την διατμητική ικανότητα της τοιχοποιίας.

#### 4.1 Διαγράμματα Δύναμης μετατόπισης – Τάσεων παραμορφώσεων

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E519 / E519M (ASTM 2010) η διατμητική τάση στο κέντρο του δοκιμίου μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίση τόσο με εφελκυστικές όσο και με θλιπτικές τάσεις.



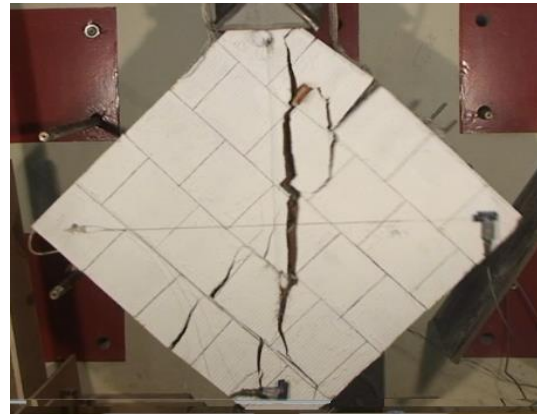
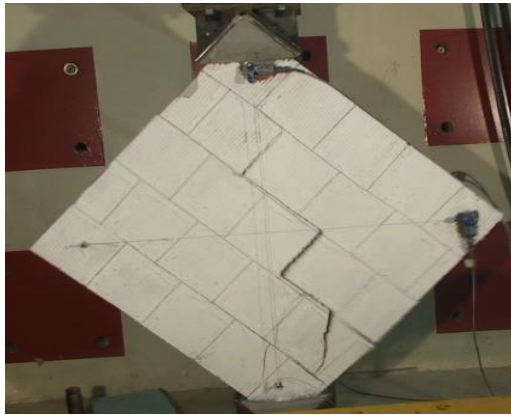
Σχήμα 6: α) Διάγραμμα Φορτίου-μετατόπισης και β) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για τις άοπλες τοιχοποιίες (SO-UM1, SO-UM2) και τις ενισχυμένες με TRM (SO-UMG1, SO-UMG2, SO-UMG3)

Η διατμητική τάση υπολογίζεται ως  $\tau = 0,707 P/A_n$ , όπου  $P$  και  $A$  είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο και η ενεργή επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του τοίχου, αντίστοιχα. Η διατμητική παραμόρφωση ορίζεται ως  $\gamma = \epsilon_n + \epsilon_h$ , όπου  $\epsilon_n$  και  $\epsilon_h$  είναι οι ανηγμένες παραμορφώσεις κατά μήκος της διαγωνίου θλίψεως και του εφελκυσμού της τοιχοποιίας που μετρήθηκαν με δύο μετρητές διατμητικής παραμόρφωσης αλλά και από τους μετρητές τύπου SpaceAge (S.A.) με τους οποίους υπολογίζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις με διαίρεση της μετατόπισης μετρούμενης από τα δύο S.A. κατά μήκος των δυο διαγωνίων με το αρχικό μήκος των διαγωνίων. Το διάγραμμα στο Σχήμα 6 δείχνει την επιβαλλόμενη δύναμη έναντι μετατόπισης καθώς και το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε δοκίμιο.

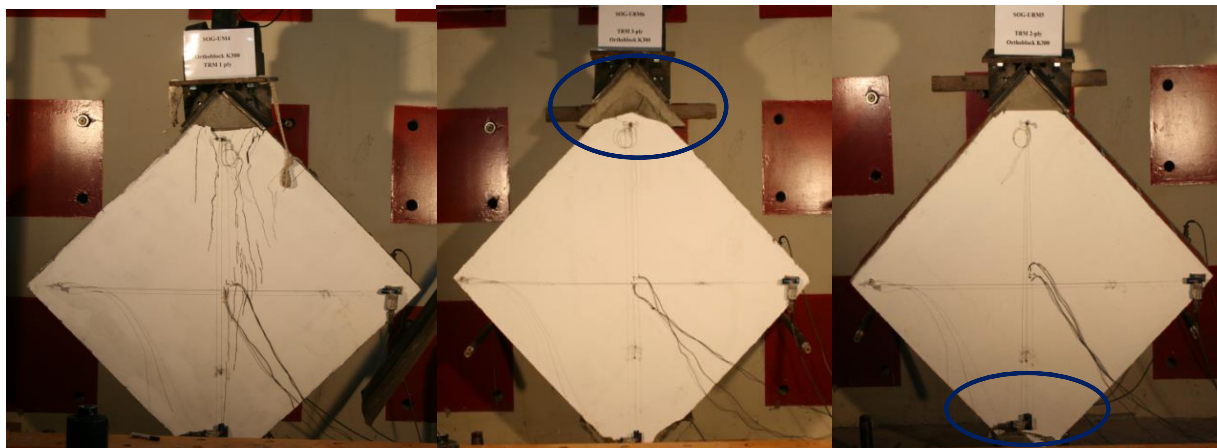
Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζουν μια σαφή εικόνα για τις άοπλες τοιχοποιίες ελέγχου, καθώς συμπεριφέρονται σχεδόν με γραμμικό ελαστικό τρόπο μέχρι το σημείο αστοχίας. Στις ενισχυμένες τοιχοποιίες, η διατμητική αντοχή αυξάνεται και παράλληλα η αρχική αστοχία καθυστερεί λόγω της παρουσίας της ενίσχυσης TRM. Τα γραφήματα απεικονίζουν την ικανότητα διάτμησης η οποία αυξάνεται αναλογικά με την ποσότητα TRM για 1 και 3 στρώσεις ενίσχυσης.

## 4.2 Μορφές αστοχίας

Τα Σχήματα 7,8 απεικονίζουν τις τυπικές μορφές ρωγμών των πέντε δοκιμών μετά τη διατμητική αστοχία. Οι άοπλες τοιχοποιίες ελέγχου έδειξαν ψαθυρή αστοχία που προκλήθηκε από την απώλεια συνάφειας μεταξύ του κονιάματος και των τούβλων (Σχήμα 7α), καθώς και διαγώνιο εφελκυσμό με ταυτόχρονη θραύση κονιάματος και τούβλων (Σχήμα 7β). Με τη σταδιακή αύξηση του φορτίου στην περίπτωση της διατμητικής τριβής, η ρωγμή αναπτύχθηκε σε σχήμα σκαλοπατιού στον κατακόρυφο και οριζόντιο αρμό όταν οι κύριες τάσεις εφελκυσμού υπερέβησαν την εφελκυστική αντοχή στην διεπιφάνεια κονιάματος-τούβλου. Τελικά, το φορτίο που εφαρμόστηκε προκάλεσε ανάπτυξη ρωγμών και διατμητική τριβή. Στην περίπτωση του διαγωνίου εφελκυσμού, η σταδιακή ρωγμή αναπτύχθηκε παράλληλα με την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου.



Σχήμα 7: α) Μορφή αστοχίας διαμητικής τριβής της άοπλης τοιχοποιίας (SO-UM1) β) Μορφή αστοχίας διαγώνιου εφελκυσμού της άοπλης τοιχοποιίας (SO-UM2)



Σχήμα 8: α) Μορφή αστοχίας ενίσχυσης TRM της ενισχυμένης τοιχοποιίας (SO-UM G1) β),γ) Μορφή αστοχίας σύνθλιψης πέλματος των ενισχυμένων τοιχοποιιών (SO-UMG2), (SO-UMG3)

Το δοκίμιο που ενισχύθηκε με 1-στρώση TRM αστόχησε με τη μορφή διαγώνιου εφελκυσμού με εμφάνιση διαγώνιων ρωγμών στην επιφάνεια της μήτρας τσιμεντοειδούς κονιάματος αυξάνοντας τη διαμητική αντοχή στον ενισχυμένο τοίχο (Σχήμα 8α).

Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με 2-στρώσεις και 3-στρώσεις TRM, αντίστοιχα αστόχησαν με τη μορφή σύνθλιψης πέλματος (Σχήμα 8β,γ). Αυτή η αστοχία που προκλήθηκε από την τοπική σύνθλιψη των τούβλων προηγήθηκε της διαμητικής αστοχίας υποδεικνύοντας ότι το επίπεδο ενίσχυσης ήταν μεγαλύτερο από την τοπική αντοχή των τούβλων. Σε όλες τις ενισχυμένες τοιχοποιίες η αστοχία δεν οδήγησε σε άμεση πλήρη αποδιοργάνωση του τοίχου και τα δοκίμια παρέμειναν στη θέση τους σε αντίθεση με τα δοκίμια ελέγχου όπου υπήρξε πλήρης κατάρρευση μετά από αστοχία εκρηκτικού τύπου.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το σύστημα ενίσχυσης με υαλόπλεγμα TRM διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διατητική ενίσχυση άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας από τούβλα Orthoblock K300.



- Η ενίσχυση βελτιώνει την διατμητική αντοχή σε ποσοστό 139%, 122% και 158% για την ενίσχυση μιας, δυο και τριών στρώσεων με TRM αντίστοιχα.
- Το δοκίμιο που ενισχύθηκε με 1-στρώση TRM αστόχησε με τη μορφή διαγώνιου εφελκυσμού με εμφάνιση διαγώνιων ρωγμών στην επιφάνεια της μήτρας τσιμεντοειδούς κονιάματος αυξάνοντας τη διατμητική αντοχή στον ενισχυμένο τοίχο.
- Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με 2-στρώσεις και 3-στρώσεις TRM, αντίστοιχα αστόχησαν με τη μορφή σύνθλιψης πέλματος. Αυτή η αστοχία που προκλήθηκε από την τοπική σύνθλιψη των τούβλων προηγήθηκε της διατμητικής αστοχίας υποδεικνύοντας ότι το επίπεδο ενίσχυσης ήταν μεγαλύτερο από την αντοχή των τούβλων.
- Οι 3 στρώσεις ενίσχυσης παρουσίασαν το υψηλότερο φορτίο αστοχίας 372.66 kN που είναι περίπου 1.58 φορές υψηλότερο από την αντοχή της άοπλης τοιχοποιίας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά την εταιρεία ΚΕ.Β.Ε. Α.Ε. για την παροχή των τούβλων Orthoblock K300 και την κατασκευή των τοιχοποιιών, καθώς και την εταιρεία Sika Hellas ABEE για την παροχή όλων των υλικών ενίσχυσης των τοιχοποιιών και την άμογη συνεργασία μας.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ACI 549.4R-13 Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (TRM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures, 2013
2. Almeida J.A.P.P., Pereira E. B., Barros J. A. O, Assessment of overlay masonry strengthening system under in-plane 1 monotonic and cyclic loading using the diagonal tensile test 2, ISISE, University of Minho, Department of Civil Engineering, School of Engineering, 4 Azurém, 4810-058 Guimarães, Portugal, 2015
3. ASTM. "Standard test methods for diagonal tension (shear) in masonry assemblages." ASTM E519 / E519M, West Conshohocken, PA., 2010
4. Babaeidarabad, S., De Caso, F., and Nanni, A.. "URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to Diagonal Compression." J. Compos. Constr., 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000441, 04013045, 2013
5. CNR-DT 200 R1/2013, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National Research Council, Rome, 2013.
6. Corradi M., Borri A., Castori G., and Sisti R., "Shear strengthening of wall panels 17 through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids," Compos. Part B 18 Eng., vol. 64, pp. 33–42, 2014.
7. EN 772-1. Methods of test for masonry units. Part 1: determination of compressive strength. CEN, Brussels, Belgium, 2000.
8. Eurocode 6. Design of masonry structures, Part 1-1: General rules for Building-Rules for reinforced and unreinforced masonry. European Committee for Standardization, CEN, Brussels, Belgium, 2005
9. European Committee for Standardization (2019b) Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance—part 3: assessment and retrofitting of buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium European Committee, 2019
10. Faella C., Martinelli E., Nigro E., Paciello S., Shear capacity of masonry walls externally strengthened by a cement-based composite material: an experimental campaign, Construction and Building Materials (Elsevier), 2010, 24:84-93.
11. Ferretti F. et al. "IN SITU DIAGONAL COMPRESSION TESTS ON MASONRY PANELS STRENGTHENED BY FRP AND FRCM" 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for 275 Reinforced Concrete Structures & The 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures Joint Conference, China, 2015
12. Lignola, G., Prota, A., and Manfredi, G., "Nonlinear analyses of tuff masonry walls strengthened with cementitious matrix-grid composites." J. Compos. Constr., 13(4), 243–251, 2009

13. Parisi F., Iovinella I., Balsamo A., Augenti N., Prota A., In-plane behaviour of tuff masonry strengthened with inorganic matrix-grid composites, *Composites: Part B*, 45:1657-1666, 2013
14. Prota A., Marcari G., Fabbrocino G., Manfredi G., Aldea C., Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix-Grid Composites. *J. of Comp. for Constr. ASCE*, 10, 3, 223-233, 2006
15. Thomoglou A., Rousakis T. and Karabinis A., “Experimental Investigation and 3d Finite Element Analysis of solid and hollow clay bricks”, ICCE-26th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering, Paris, France, 2018
16. Tomaževič M., Gams M., Berset T. “Seismic strengthening of brick masonry walls with composites: an experimental study”, 2014
17. Triantafyllou T.C., Papanicolaou C.G., Zissimopoulos P., Laourdekis T., Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets, *ACI Struct J*, 103 (1), pp. 28–37, 2006
18. Triantafyllou TC. Strengthening of masonry structures using epoxy - bonded FRP laminates. *J Compos Constr ASCE*;2(2):96 –104., 1998
19. Triantafyllou, T. C. and Antonopoulos, C. P., “Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP”, *J. of Comp. for Constr., ASCE*, 4(4), pp. 198-204., 2000
20. Viskovic A., Zuccarino L., Kwiecień A. and Zajac B. “Masonry Panels Composite Reinforcements with Epoxy Matrix, Inorganic Mortar Matrix and PS Polymer Matrix”, *Key Engineering Materials Vol. 624*, pp 214-221, Trans Tech Publications, Institute of Structural Mechanics, 2015
21. Θώμογλου Α.Κ., Ρουσάκης Θ.Χ., Καραμπίνης Α.Ι., «Ενίσχυση Άοπλης Φέρουσας τοιχοποιίας με Εξωτερικό σπλισμό FRP ή TRM», Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος «Κατασκευές από Σκυρόδεμα», Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου, 2016