

Αναλυτική Προσομοίωση με Τρισδιάστατα Πεπερασμένα Στοιχεία της Εντός Επιπέδου Διατμητικής Συμπεριφοράς Άοπλης Φέρουσας Τοιχοποιίας Ενισχυμένης με FRCM

Three-dimensional Finite Element Analysis of In-plane Shear Behavior of Masonry Strengthened with TRM/FRCM

Αθανασία ΘΩΜΟΓΛΟΥ¹, Θεόδωρος ΡΟΥΣΑΚΗΣ², Αθανάσιος ΚΑΡΑΜΠΙΝΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: Εντός Επίπεδου Ενίσχυση, Διαγώνια Θλίψη, Άοπλη φέρουσα Τοιχοποιία, Προσομοίωση, TRM/FRCM, URM, In Plane Strengthening, Diagonal Compression, 3d finite element analysis

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 μανδύα κονιάματος τσιμεντοειδούς βάσης TRM/FRCM ήρθε ως φυσική εξέλιξη των παραδοσιακών μεθόδων λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται με λογισμικό τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων ΑΦΤ ενισχυμένες με εξωτερικό σύνθετο οπλισμό που υποβάλλονται σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης. Η προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών διατμητικής καταπόνησης ΑΦΤ πραγματοποιείται με το λογισμικό ANSYS. Συγκρίνεται η διατμητική τάση και παραμόρφωση αστοχίας των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις της ανάλυσης καθώς και με την πρόβλεψη διατμητικών τάσεων των σχέσεων των υφιστάμενων κανονισμών.

¹ Υποψήφια Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: athanasia.thomoglou@yahoo.gr

² Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: trousak@civil.duth.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: karabin@civil.duth.gr

ABSTRACT: Unreinforced masonry (URM) structures have high seismic vulnerability mainly due to the low shear strength of walls, which are prone to brittle failure when subjected to in-plane loads. The strengthening of these existing structures with fabric reinforced cementitious mortar (FRCM or TRM) jacket came as a natural development of traditional methods due to their advantages. This paper presents the analyses of unreinforced masonry strengthened with external composite reinforcement subjected to diagonal compression tests, using 3dimensional finite elements. The analysis of the experimental shear tests of URM is carried out with the ANSYS software. The paper compares the experimental results of the shear stress and strain at ultimate with the analytical ones as well as the predictions of shear stress of existing design equations.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξωτερική ενίσχυση με (TRM ή FRCM) 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. Η εξωτερική ενίσχυση με ινοπλέγματα μέσα σε μανδύα κονιάματος τσιμεντοειδούς βάσης TRM 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 (IMG). Οι Triantafillou et al. (2005), Triantafillou et al. (2006), Papanicolaou et al. (2007), μελέτησαν το είδος αυτό ενίσχυσης και πρότειναν προσομοιώματα σχεδιασμού για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής της ενισχυμένης τοιχοποιίας. Επιπλέον, οι Prota et al. (2006), Lignola et al. (2009), Faella et al. (2010), Papanicolaou et al. (2011), Babaeidarabad (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.

Στη παρούσα εργασία προσομοιώνονται με 3διάστατα πεπερασμένα στοιχεία ΑΦΤ ενισχυμένες με εξωτερικό σύνθετο οπλισμό που υποβάλλονται σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης ή θλίψης-διάτμησης. Η δοκιμή διαγώνιας θλίψης χρησιμοποιείται ευρέως για τη διεύρυνση της γνώσης σχετικά με τη συμπεριφορά της εντός επιπέδου φόρτισης της τοιχοποιίας. Στην παρούσα εργασία αξιοποιούνται τα πειραματικά αποτελέσματα συμπεριφοράς άοπλης τοιχοποιίας ενισχυμένης με FRCM από τη μελέτη των Babaeidarabad, et al. (2013) για την τεκμηρίωση του αναλυτικού προσομοιώματος 3 διάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΤΩΝ BABAEIDARABAD, ET AL. (2013)

Αξιοποιούνται τα πειραματικά αποτελέσματα από εννιά δοκίμια οπτοπλινθοδομής με διαστάσεις 1140 x 1220 x 92mm. Τα ενισχυμένα δοκίμια περιελάμβαναν εφαρμογή 1 ή 4 στρώσεων FRCM: οι οποίες κάλυψαν πλήρως και τις δυο όψεις του τοίχου.

Οι ακριβείς διαστάσεις των πλινθοσωμάτων ήταν 197 x 57 x 92 mm. Το συνδετικό κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε στη τοιχοποιία ανάμεσα στα τούβλα είχε πάχος 10 mm. Η θλιπτική αντοχή κονιάματος 28 ημερών που προέκυψε από δοκιμή κύβων κονιάματος 50 mm σύμφωνα με το ASTM C109 (ASTM 2012a) είχε μέσο όρο 22 MPa.

Το FRCM αποτελούνταν από μια στρώση ή τέσσερις στρώσεις μήτρας με βάση το τσιμέντο, ενισχυμένες με πλέγματα ινοπλισμένων πολυμερών από ίνες άνθρακα τοποθετημένες κατά μήκος δύο ορθογώνιων διευθύνσεων σε ονομαστική απόσταση 10 mm. Το ισοδύναμο ονομαστικό πάχος ινών ήταν 0,048 mm τόσο στην κύρια όσο και στην δευτερεύουσα κατεύθυνση (Babaeidarabad, et al. 2013). Το μέτρο ελαστικότητας στην ήταν 69 GPa.

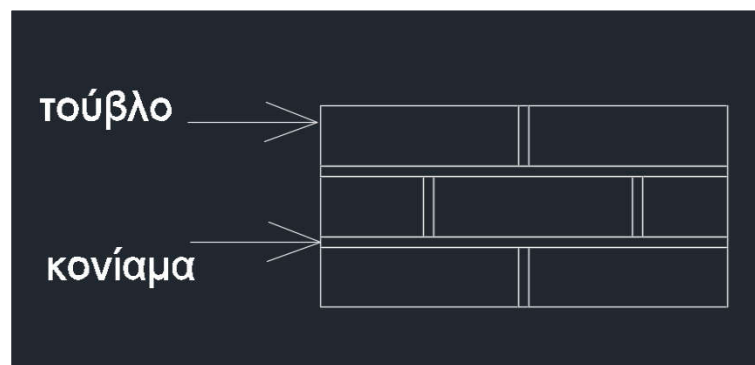
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τεχνική μικρο-προσομοίωσης

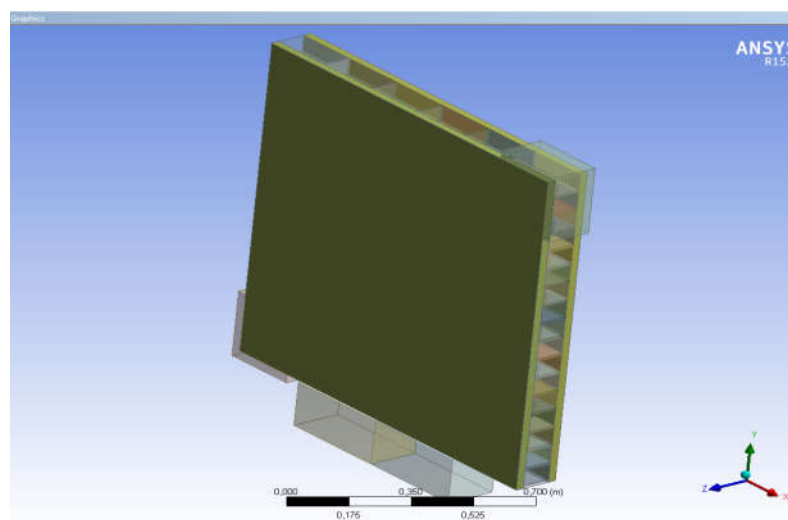
Για την προσομοίωση των πλινθοσωμάτων της τοιχοποιίας υπάρχουν δυο βασικές προσεγγίσεις: η μακρο-προσομοίωση και η μικρο-προσομοίωση, Lourenco, (1996). Η πρώτη προσέγγιση θεωρεί μονάδες πλινθοσώματος και κονιάματος ως ένα ενιαίο στοιχείο και δε λαμβάνει υπόψη τη διεπαφή μεταξύ μονάδων τούβλων και κονιάματος. Η δεύτερη προσέγγιση θεωρεί χωριστά μονάδες πλινθοσώματος και κονιάματος και ο δεσμός μεταξύ αυτών των μονάδων διαμορφώνεται με το στοιχείο διεπαφής (Σχήμα 1). Οι Sirajuddin et al. (2012), Haach et al. (2011) έχουν διερευνήσει εκτενώς την μικρο-προσομοίωση τοιχοποιιών. Μέσω απλοποιημένης προσέγγισης μικρο-προσομοίωσης, υιοθετήθηκε ένα στοιχείο διεπαφής μηδενικού πάχους για την προσομοίωση αρμών κονιάματος (Mohyeddin et al. 2013, Senthivel et al. 2009, Chaimoon et al. 2007, Lourenco and Rots 1997, Lourenco 1996). Οι προσεγγίσεις μικρο-προσομοίωσης χρειάζονται μεγαλύτερη υπολογιστική προσπάθεια, αλλά λαμβάνουν υπόψη με μεγαλύτερη ακρίβεια την τοπική συμπεριφορά της φέρουσας τοιχοποιίας και είναι σε θέση να εξετάσουν όλους τους μηχανισμούς αστοχίας της.

Προσομοίωση σε Λογισμικό Περασμένων Στοιχείων

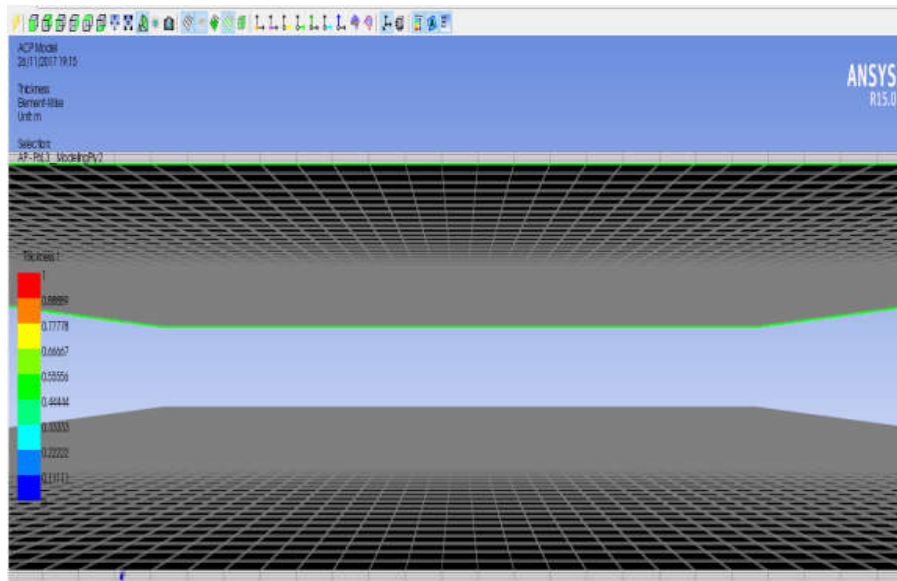
Η προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών διατμητικής καταπόνησης άοπλης τοιχοποιίας πραγματοποιείται με το λογισμικό ANSYS Workbench R15. Χρησιμοποιείται τρισδιάστατο ισότροπο στοιχείο, το εικοσακομβικό τριδιάστατο δομικό στοιχείο Solid186, με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο για να προσομοιωθεί η μη γραμμική συμπεριφορά των ψαθυρών υλικών όπως τα πλινθосώματα και το κονίαμα. Στο Σχήμα 2 προσομοιώνεται η γεωμετρία του δοκιμίου με την εξωτερική ενίσχυση η οποία δηλώνεται στη συνέχεια ως στοιχείο κελύφους.



Σχήμα 1. Λεπτομέρεια μικρο-προσομοίωσης των στοιχείων της τοιχοποιίας.



Σχήμα 2. Προσομοίωση γεωμετρίας ενισχυμένης φέρουσας τοιχοποιίας



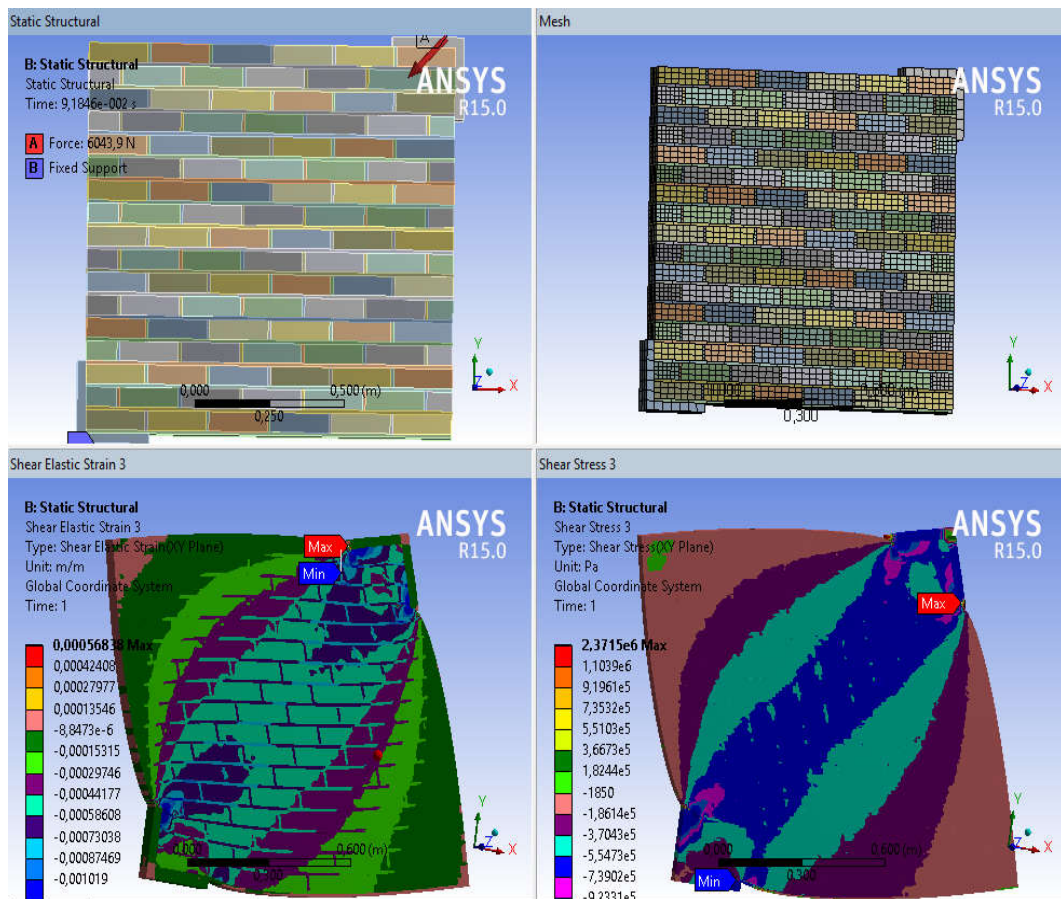
Σχήμα 3. Επεξεργασία του οπλισμού ενίσχυσης CFRCM με το πρόγραμμα Ansys ACP-pre .

Χρησιμοποιείται ανάλυση τύπου Static Structural και δηλώνονται οι ιδιότητες των υλικών την τοιχοποιίας, η διεπαφή των υλικών μεταξύ τους, η διακριτοποίηση, τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες.

Προκειμένου να προσομοιωθεί το σύνθετο υλικό, χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα τα ANSYS Composite ACP pre και ACP post (Σχήμα 3), τα οποία διαθέτουν το στοιχείο κελύφους Shell181, κατάλληλο για ανάλυση δομών κελύφους λεπτού έως μέτριου πάχους. Το SHELL181 είναι ένα στοιχείο τεσσάρων κόμβων με έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο το οποίο είναι ικανό να μεταφέρει τις δυνάμεις στη διεπαφή μεταξύ του υλικού ενίσχυσης και του υποστρώματος της τοιχοποιίας εφόσον προσδιορισθεί η γεωμετρία κελύφους, η εφαρμογή φορτίων και ο καθορισμός του σύνθετου υλικού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται πλέγμα CFRP σε μήτρα τσιμεντοειδούς κονιάματος σε μια ακολουθία προσανατολισμένων στρώσεων. Μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται με το ACP post όπου επεξεργάζονται τα αποτελέσματα των διατμητικών τάσεων του σύνθετου υλικού.

Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Πεπερασμένα Στοιχεία

Αρχικά προσομοιώθηκε η τοιχοποιία χωρίς ενίσχυση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία του δοκιμίου εξάγονται από το πρόγραμμα ANSYS Workbench υπό στατική φόρτιση των 65804 N. Το σχήμα 4 παρουσιάζει τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος, τη διατμητική παραμόρφωση και τη διατμητική τάση αντίστοιχα, σε κάθε σημείο της τοιχοποιίας χωρίς ενίσχυση.

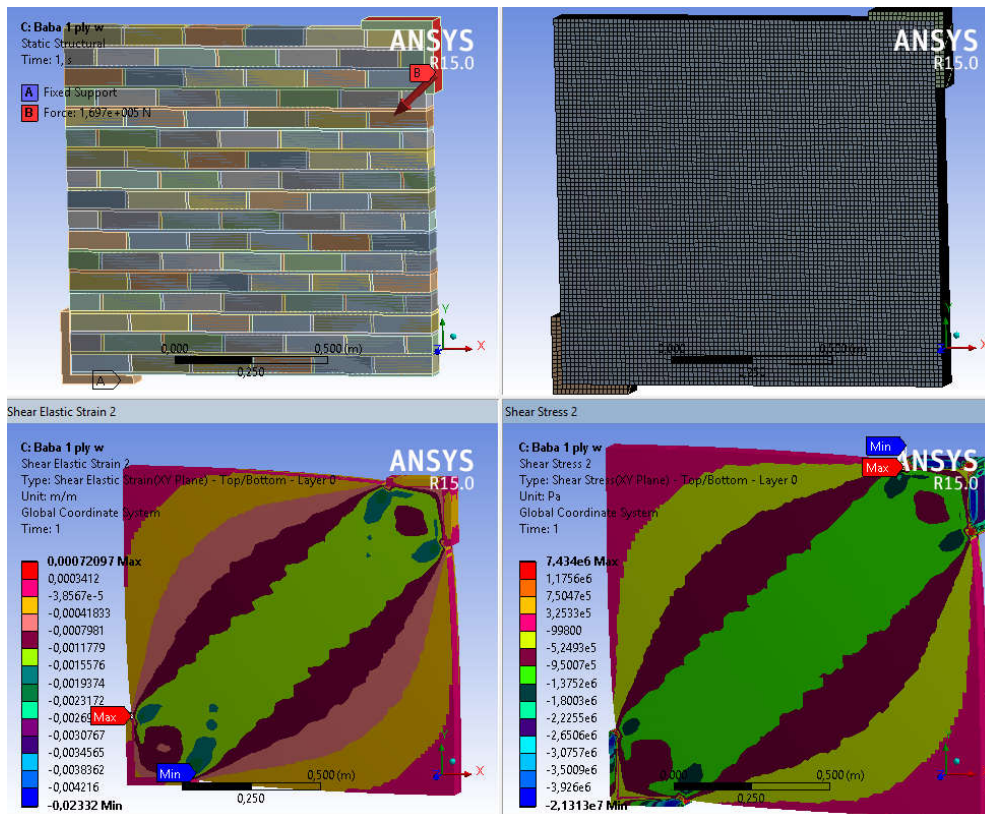


Σχήμα 4. Στατική ανάλυση (πάνω αριστερά), διακριτοποίηση (πάνω δεξιά), διατμητική παραμόρφωση (κάτω αριστερά) και διατμητική τάση (κάτω δεξιά) της τοιχοποιίας ελέγχου.

Στα σχήματα 5 και 6 παρουσιάζεται η ενισχυμένη τοιχοποιία. Σε αυτό το προσομοίωμα χρησιμοποιείται η τεχνική ενίσχυσης με σύνθετα υλικά από μανδύα κονιάματος τσιμεντοειδούς βάσης FRCM 1 και 4 στρώσεων και από τις 2 πλευρές της τοιχοποιίας. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης, της διατμητικής παραμόρφωσης και της διατμητικής τάσης για τις δυο ομάδες δοκιμών με 1 και 4 στρώσεις υπό στατικό φορτίο 169570 N και 329700 N αντίστοιχα.

Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης με Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών και συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1. Η ανάλυση σταμάτησε στο φορτίο αστοχίας.

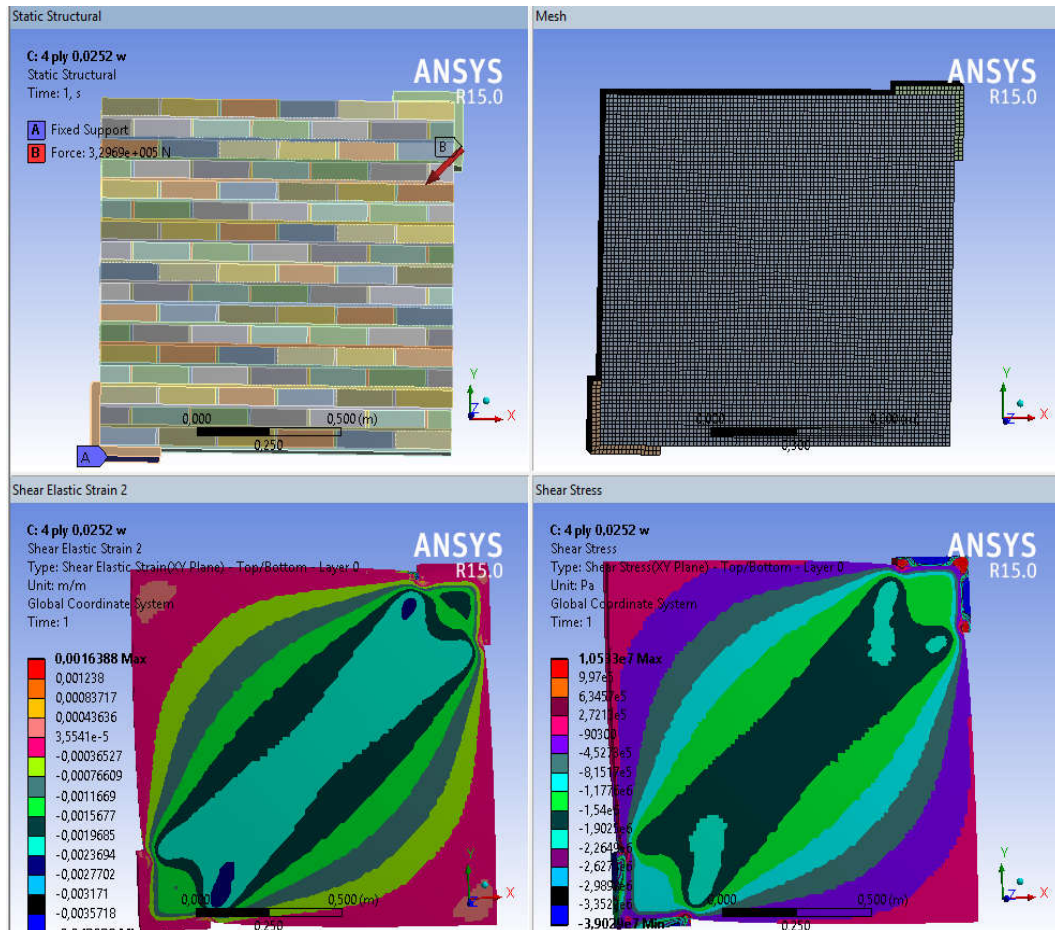


Σχήμα 5. Στατική ανάλυση (πάνω αριστερά), διακριτοποίηση, (πάνω δεξιά), διατμητική παραμόρφωση (κάτω αριστερά) και διατμητική τάση (κάτω δεξιά) της ενισχυμένης τοιχοποιίας με εξωτερικό οπλισμό CFRCCM 1 στρώσης.

Πίνακας 1. Σύγκριση διατμητικής παραμόρφωσης πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Κωδικός Δοκιμίων	Πειραματικά Αποτελέσματα Babaeidarabad (2013)			Αποτελέσματα Προσομοίωσης		Αναλυτικά/ Πειραματικά	Absolute Error %
	τ _υ (Mpa)	γ _υ (Mpa)	τ _υ ** (Mpa)	τ _υ (Mpa)	γ _υ (Mpa)	γ _υ / τ _υ	
Control 3	0,57	0,0007	0,58	0,57	0,0007	1,00	0,00
1ply (3)	1,32	0,012*	1,52	1,32	0,002	0,17	83,33*
4ply (3)	2,86	0,0035	2,94	2,47	0,003	0,86	14,29

* Η τιμή αυτή της διατμητικής παραμόρφωσης αστοχίας για την κατηγορία τοιχοποιιών με ενίσχυση μιας στρώσης 1ply (3), είναι πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα πειραματικά αποτελέσματα για τις δυο άλλες κατηγορίες (control 3 και 4ply (3)).



Σχήμα 6. Στατική ανάλυση (πάνω αριστερά), Διακριτοποίηση, (πάνω δεξιά), Διατμητική παραμόρφωση (κάτω αριστερά) και διατμητική τάση (κάτω δεξιά) της ενισχυμένης τοιχοποιίας με εξωτερικό οπλισμό CFRCM 4 στρώσεων.

Η διατμητική τάση υπολογίζεται από την Εξίσωση (1):

$$\tau = 0,707P/An \quad (1)$$

όπου P και A_n είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο και η καθαρή διατομή του τοίχου αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 1 καταγράφονται οι τιμές των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων, όπου οι τιμές τ^{**} είναι υπολογισμένες σύμφωνα με την Εξίσωση (1), όπου P το φορτίο που εφαρμόστηκε στο κάθε προσομοίωμα και A_n η καθαρή διατομή υπολογισμένη από την Εξίσωση (2) για κάθε ομάδα τοιχωμάτων.

$$A_n = (H+L)t_m/2 \quad (2)$$

Όπου H: το ύψος της τοιχοποιίας, L: το μήκος της τοιχοποιίας και t_m : το πάχος της τοιχοποιίας.

Σύμφωνα με το ASTM E519 / E519M (ASTM 2010), μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει καθαρή τάση διάτμησης στο κέντρο του δοκιμίου έτσι ώστε η διατμητική τάση να είναι ίση τόσο με εφελκυστικές τάσεις όσο και με θλιπτικές. Οι τιμές από τον Πίνακα 1, τ probe, έχουν εξαχθεί από τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων στα συγκεκριμένα σημεία στο κέντρο των τοιχοποιιών για το προσομοίωμα της άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας Control 3 και στο κέντρο της ενίσχυσης FRCM στη εξωτερική πλευρά του τσιμεντοειδούς κονιάματος όπως και στο πείραμα.

Παρατηρείται ότι οι τοπικές διατμητικές τάσεις στο κέντρο της τοιχοποιίας είναι παραπλήσιες της μέσης διατμητικής τάσης όπως υπολογίζεται από τη σχέση (1).

Προβλέψεις Κανονισμών

Υφιστάμενοι Κανονισμοί

Στην παρούσα εργασία συγκρίνονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση των Α.Φ.Τ. που υπόκεινται σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης με τις προβλέψεις των υφιστάμενων κανονισμών (Πίνακας 2). Συγκεκριμένα, συγκρίνεται η διατμητική ικανότητα της ενισχυμένης τοιχοποιίας σύμφωνα με τους παρακάτω κανονισμούς και τα προσομοιώματα σχεδιασμού: ACI (2013), Triantafillou and Antonopoulos (2000), Triantafillou (1998), CNR-DT 200 R1/2013, Eurocode 6 και επεργάζονται στατιστικά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 2. Σύγκριση διατμητικής τάσης των πειραματικών αποτελεσμάτων και της πρόβλεψης διατμητικής τάσης με τους υφιστάμενους κανονισμούς.

	Babaeidara bad (2013)	ACI 2013	CNR 2013	Triantafillo u& Antonopou los 2000	Triantafillou	EC6
Κωδικός Δοκιμίου ν	τυ (Mpa)	τυ (Mpa)	τυ (Mpa)	τυ (Mpa)	τυ (Mpa)	τυ (Mpa)
Control 3	0,57	0,77	0,34	0,34	0,34	0,34
1ply (3)	1,32	1,65*	0,57	0,60	0,60	0,52
4ply (3)	2,86	1,65	1,25	1,36	1,36	1,05
Average absolute error %	0,00	34,13	51,15	49,08	49,08	54,75

*Προβλέπεται σύνθλιψη διαγώνιου πέλματος και στις δυο ενισχύσεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Προκύπτουν οι παρακάτω συμπερασματικές παρατηρήσεις:

- Η ενίσχυση με FRCM μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη διατμητική ικανότητα της φέρουσας τοιχοποιίας.
- Από τη σύγκριση της διατμητικής τάσης πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία προκύπτει ικανοποιητική πρόβλεψη και τιμές τοπικών διατμητικών τάσεων στο κέντρο της τοιχοποιίας που είναι παραπλήσιες αυτών των μέσων διατμητικών τάσεων
- Από τη σύγκριση διατμητικής τάσης των πειραματικών αποτελεσμάτων και πρόβλεψης διατμητικής τάσης με τους υφιστάμενους κανονισμούς προκύπτει ότι για την άοπλη φέρουσα τοιχοποιία οι προβλέψεις όλων των κανονισμών είναι ικανοποιητικές ενώ για την ενίσχυση με 1 και 4 στρώσεις, είναι συντηρητικές. Ο κανονισμός ACI 549 (ACI 2013) προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη διατμητική τάση αστοχίας για την ενίσχυση με 1 στρώση.
- Σύμφωνα με τη στατιστική επεξεργασία προκύπτει εξαιρετικά χαμηλό απόλυτο σφάλμα προβλέψεων διατμητικών παραμορφώσεων του προσομοιώματος με 3διάστατα πεπερασμένα στοιχεία σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα για τα περισσότερα δοκίμια. Η ακρίβεια

πρόβλεψης είναι ικανοποιητική και ευνοεί την περαιτέρω διερεύνηση σημαντικών παραμέτρων σχεδιασμού με παραμετρικές αναλύσεις.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

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)

Ansys Workbench Release 15.0

ASTM. "Standard test methods for diagonal tension (shear) in masonry assemblages." ASTM E519 / E519M, West Conshohocken, PA. (2010)

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)

Borri A., Corradi M., Castori G and Sisti R., Reinforcement of masonry panels with GFRP grids, SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico, 2014

Chaimoon, K., and Attard, M. M., "Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression." *Engineering Structures*, 29(9), 2056-2068, (2007)

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.

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.

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

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.

Haach, V. G., Vasconcelos, G., and Lourenço, P. B., "Parametrical study of masonry walls subjected to in-plane loading through numerical modeling." *Engineering Structures*, 33(4), 1377-1389. (2011)

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)

Lourenço, P. B., and Rots, J. G., (1997). "Multisurface interface model for analysis of masonry structures." *Journal of Engineering Mechanics*, 123(7), 660-668.

Mohyeddin, A., Goldsworthy, H. M., and Gad, E. F., "FE modeling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading." *Engineering Structures*, 51, 73-87., (2013)

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)

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

Senthivel, R., and Lourenço, P. B., “Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls.” *Engineering Structures*, 31(9), 1930-1943. (2009)

Shrestha U. “Modified Composite Application to Improve Strength and Ductility of Structural Components.”, Thesis, Master of Science Degree in Civil Engineering, University of Toledo (2014)

Sirajuddin, M., and Narayanan Sambu Potty, S. J.,. “Non Linear seismic analysis of masonry structures.” *Journal of Design and Built Environment*, 9(1). (2012)

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)

Triantafyllou TC. Strengthening of masonry structures using epoxy - bonded FRP laminates. *J Compos Constr ASCE*;2(2):96 –104., (1998)

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)

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)

Θώμογλου Α.Κ., Ρουσάκης Θ.Χ., Καραμπίνης Α.Ι., «Ενίσχυση Άοπλης Φέρουσας τοιχοποιίας με Εξωτερικό οπλισμό FRP ή TRM», Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος «Κατασκευές από Σκυρόδεμα», Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου (2016)