

## Ενίσχυση κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία με χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερ-υψηλής επιτελεστικότητας (UHPFRC)

**Ανδρέας Λαμπρόπουλος**

Senior Lecturer, University of Brighton, [A.Lampropoulos@brighton.ac.uk](mailto:A.Lampropoulos@brighton.ac.uk)

**Ουρανία Τσιούλου**

Lecturer, University of Brighton, [O.Tsioulou@brighton.ac.uk](mailto:O.Tsioulou@brighton.ac.uk)

**Στέφανος Δρίτσος**

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, [dritsos@upatras.gr](mailto:dritsos@upatras.gr)

### Εισαγωγή

Η πλειονότητα των υφισταμένων κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία είναι τρωτές σε σεισμικές δράσεις και ανεπαρκείς καθώς δεν είναι σχεδιασμένες κατάλληλα, με αποτέλεσμα η κατάρρευσή τους να είναι μία από τις βασικές αιτίες σοβαρών τραυματισμών και απωλειών ανθρωπίνων ζώων έπειτα από ισχυρούς σεισμούς. Επιτακτική ανάγκη είναι η επισκευή και η ενίσχυση μεγάλου μέρους των υφιστάμενων κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία.

Προηγούμενες διερευνήσεις έχουν εστιάσει σε καινοτόμες τεχνικές ενίσχυσης κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία με χρήση Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΟΠ) ωστόσο το σημαντικότερο μειονέκτημα που έχει επισημανθεί είναι η αποκόλληση μεταξύ ΙΟΠ και τοιχοποιίας [Abrams *et al.* 2007, Roca and Araiza 2010, Mosallam 2007, Galati *et al.* 2006].

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερ-υψηλής επιτελεστικότητας (UHPFRC) ως αντικατάσταση του συμβατικού κονιάματος σε άοπλες τοιχοποιίες ενώ εξετάζεται και η ενίσχυση με πρόσθετη μονόπλευρη στρώση από το ίδιο υλικό (UHPFRC). UHPFRC είναι ένα υλικό με πολύ υψηλή εφελκυστική και θλιπτική αντοχή και σημαντικά αυξημένη απορρόφηση ενέργειας. Το υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία έχει θλιπτική αντοχή 164 MPa και εφελκυστική αντοχή 11.5 MPa (Lampropoulos *et al.* 2016a). Η χρήση του υλικού αυτού για την ενίσχυση στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ.) έχει εξεταστεί σε προηγούμενες εργασίες (Lampropoulos *et al.* 2005a, Lampropoulos *et al.* 2005b, Lampropoulos *et al.* 2016a) και έχει βρεθεί ότι η εφαρμογή του είναι πολύ αποτελεσματική για την ενίσχυση των υφισταμένων κατασκευών. Επιπλέον έχει βρεθεί ότι η εφαρμογή UHPFRC μπορεί να βελτιώσει σημαντικά και την συμπεριφορά στοιχείων από άοπλη τοιχοποιία (Lampropoulos *et al.* 2016b). Στην παρούσα εργασία εξετάζεται αντικατάσταση του συμβατικού κονιάματος με UHPFRC καθώς και η εφαρμογή συνδυασμού UHPFRC στους αρμούς μαζί με επέκταση του ίδιου υλικού (UHPFRC) και δημιουργία πρόσθετης στρώσης (Lampropoulos *et al.* 2016b). Συμβατικές τεχνικές ενίσχυσης με προσθήκη πρόσθετης στρώσης σκυροδέματος έχουν επιπλέον εξεταστεί με σκοπό την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης τεχνικής. Αριθμητική διερεύνηση έχει πραγματοποιηθεί με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ATENA. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού, δεδομένα από πειραματικές δοκιμές έχουν χρησιμοποιηθεί και η αξιοπιστία των προσομοιωμάτων έχει ελεγχθεί σε προηγούμενη διερεύνηση. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι η αντικατάσταση του κονιάματος με UHPFRC μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την συμπεριφορά κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία ενώ η τεχνική ενίσχυσης με επιπλέον στρώση από το

ίδιο υλικό (UHPFRC) φαίνεται ότι είναι πιο αποτελεσματική από την συμβατική τεχνική ενίσχυσης με στρώση από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ.).

### Παραδοχές για την αριθμητική διερεύνηση των δοκιμών

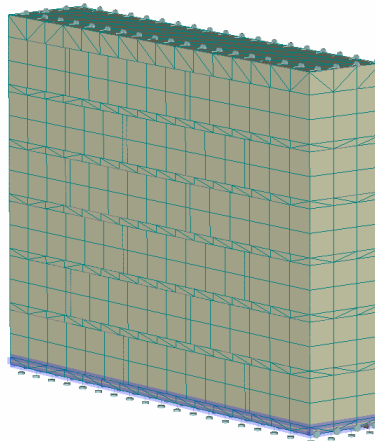
Αναλύσεις έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ATENA (Cervenka *et al.* 2003). Η αξιοπιστία των προσομοιωμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία για το UHPFRC έχει ελεγχθεί σε προηγούμενη διερεύνηση (Lampropoulos *et al.* 2016a).

Στην παρούσα διερεύνηση έχουν αρχικά εξεταστεί δοκίμια άοπλης τοιχοποιίας με συμβατικό κονίαμα και αντίστοιχα δοκίμια όπου το συμβατικό κονίαμα έχει αντικατασταθεί από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερ-υψηλής επιτελεστικότητας (UHPFRC) (Σχ. 1α).

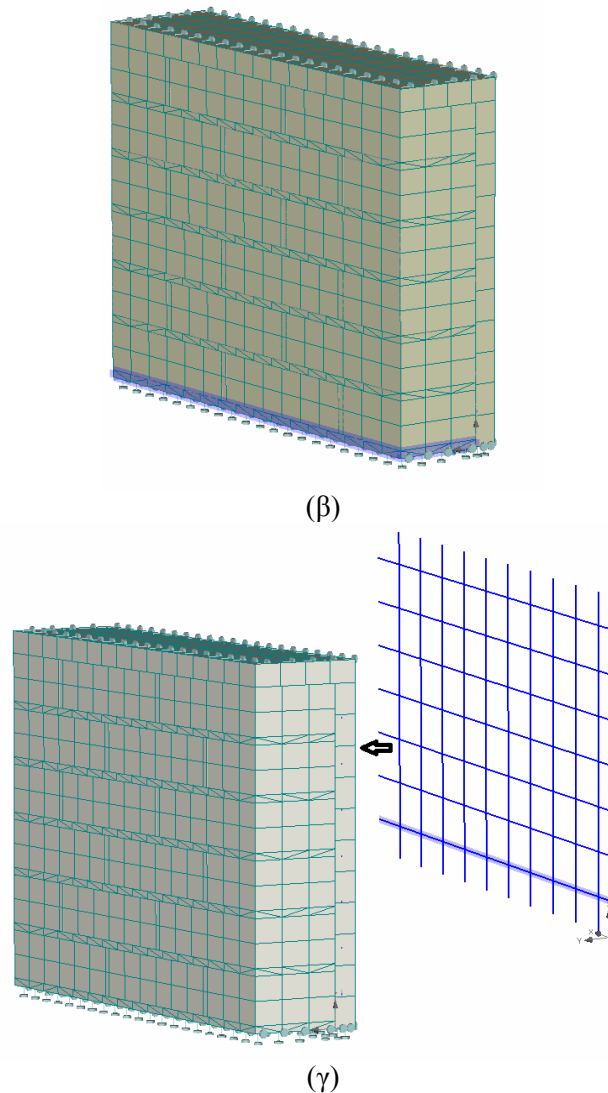
Στην συνέχεια εξετάστηκαν δοκίμια όπου εκτός από τους αρμούς, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερ-υψηλής επιτελεστικότητας (UHPFRC) επεκτείνεται και κατασκευάζεται μια μονόπλευρη πρόσθετη στρώση από το ίδιο υλικό (Σχ. 1β).

Τρεις διαφορετικές τιμές έχουν εξεταστεί για το πάχος της στρώσης, 10, 20 και 30 χιλιοστά.

Για λόγους σύγκρισης, επιπλέον εξετάστηκαν και αντίστοιχα δοκίμια με συμβατικό κονίαμα στους αρμούς και πρόσθετη στρώση από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ.) πάχους 30 χιλιοστών, τεχνική η οποία είναι μια από τις πιο διαδεδομένες για την ενίσχυση κτηρίων από άοπλη τοιχοποιία (Σχ. 1γ). Ο οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε αποτελείτο από πλέγμα ράβδων 6 χιλιοστών ανά 60 χιλιοστά απόσταση. Ο οπλισμός αυτός επιλέχθηκε έτσι ώστε ο συνολικός όγκος του να είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους με τη συνολική ποσότητα ιών χάλυβα που έχει χρησιμοποιηθεί στο δοκίμιο με πρόσθετη στρώση από UHPFRC πάχους 30 χιλιοστών.



(α)



Σχ. 1 Δοκίμια που εξετάστηκαν για την προσομοίωση α) δοκιμίων με συμβατικό κονίαμα και με αντικατάσταση του με UHPFRC, β) δοκιμίων με UHPFRC στους αρμούς και πρόσθετη UHPFRC στρώση, και γ) δοκιμίων με συμβατικό κονίαμα και πρόσθετη στρώση Ο.Σ.

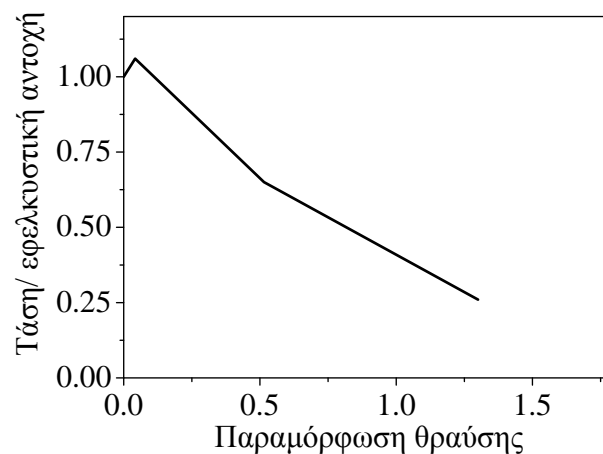
Για την προσομοίωση του σκυροδέματος, του κονιάματος, του UHPFRC και των οπτόπλινθων, ειδικά τρισδιάστατα στοιχεία CC3D NonLinCementitious2 (Cervenka *et al.* 2003) έχουν χρησιμοποιηθεί ενώ γραμμικά στοιχεία έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του οπλισμού (Σχ. 1γ).

Οι ιδιότητες του συμβατικού δοκιμίου και των οπτόπλινθων παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες οπτόπλινθων και κονιάματος [Somr 2011]

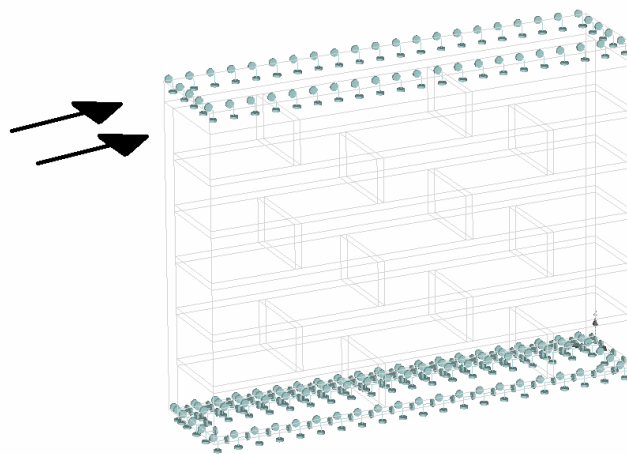
	Μηχανικές ιδιότητες οπτόπλινθων	Μηχανικές ιδιότητες κονιάματος
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	2400	2200
Λόγος Poisson	0.2	0.2
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	3.4	0.7
Θλιπτική αντοχή (MPa)	18.7	5

Για την προσομοίωση του συμβατικού σκυροδέματος, θεωρήθηκε 40 MPa θλιπτική αντοχή ενώ για τις ράβδους οπλισμού χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με όριο διαρροής 500 MPa. Η προσομοίωση του UHPFRC πραγματοποιήθηκε με χρήση προσμοιώματος που έχει βασιστεί σε πειραματικές δοκιμές [Lampropoulos *et al.* 2016a]. Η θλιπτική αντοχή που έχει προκύψει από δοκιμές κύβων είναι 164 MPa ενώ η εφελκυστική αντοχή είναι ίση με 11.5 MPa. Η συμπεριφορά σε εφελκυσμό προσομοιώθηκε βάσει του νόμου που παρουσιάζεται στο Σχ. 2, η αξιοπιστία του οποίου έχει ελεγχθεί σε προηγούμενη εργασία [Lampropoulos *et al.* 2016a].



Σχ. 2 Προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την συμπεριφορά του UHPFRC σε εφελκυσμό [Lampropoulos *et al.* 2015a, Lampropoulos *et al.* 2015b, Lampropoulos *et al.* 2016a, Lampropoulos *et al.* 2016b]

Αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δοκίμια επιβάλλοντας αυξανόμενη μετακίνηση στην κορυφή των δοκιμίων θεωρώντας πάκτωση στην βάση των δοκιμίων ενώ στους κόμβους της κορυφής επιβλήθηκε δέσμευση των κατακόρυφων μετατοπίσεων (Σχ. 3).

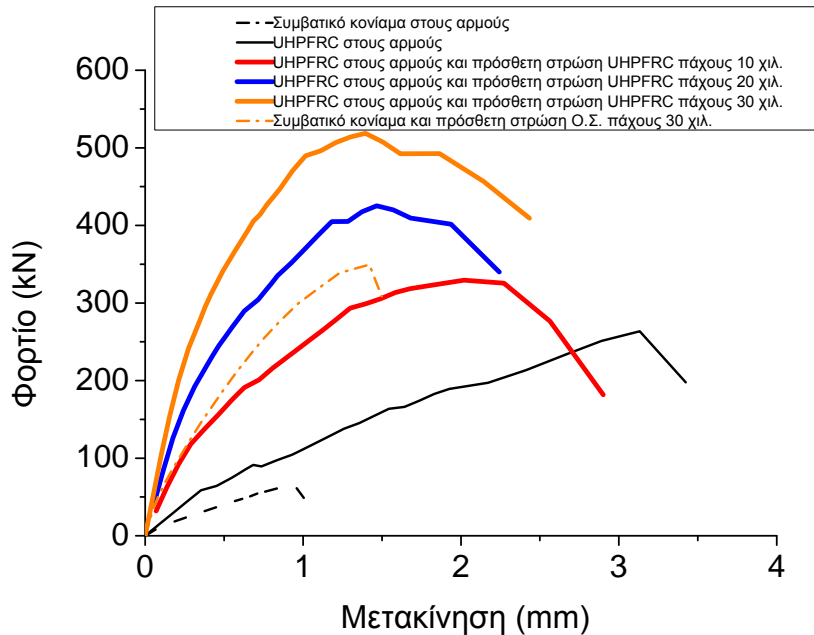


Σχ. 3 Συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των προσομοιωμάτων

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων μαζί με συγκρίσεις και αποτίμηση των εξεταζόμενων τεχνικών.

### Αποτελέσματα

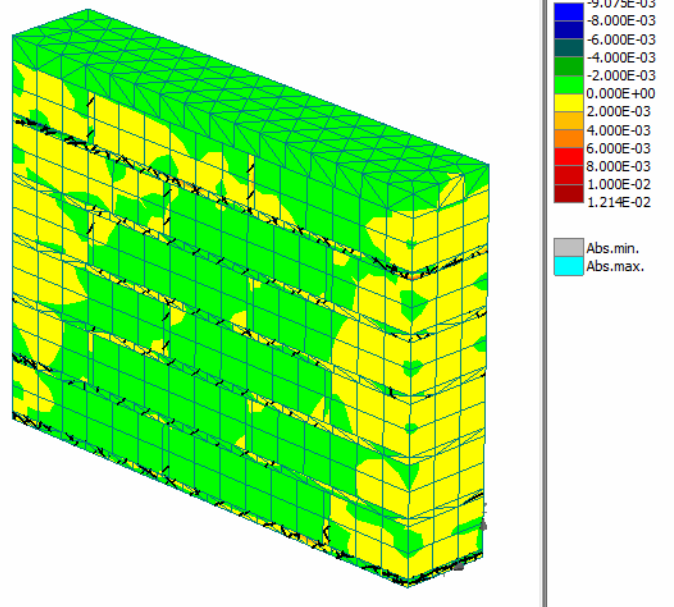
Τα αποτελέσματα της μεταβολής της δύναμης με την μετατόπιση για όλες τις εξεταζόμενες τεχνικές παρουσιάζονται στο Σχ. 4.



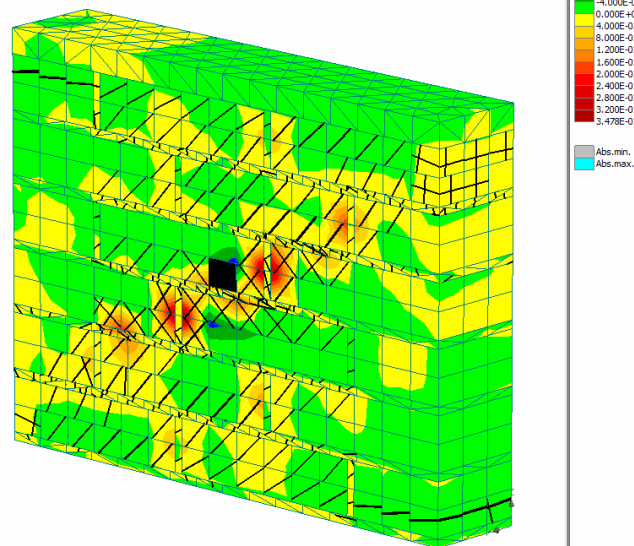
Σχ. 4 Κατανομή δύναμης με αντίστοιχη μετακίνηση στην κορυφή των δοκιμών

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων (Σχ. 4) δείχνουν ότι η δυσκαμψία των δοκιμών που εξετάστηκαν αυξάνεται σημαντικά με αντικατάσταση του συμβατικού κονιάματος στους αρμούς με UHPFRC. Προσθήκη στρώσης από UHPFRC σε συνδυασμό με UHPFRC στους αρμούς έχει ως αποτέλεσμα σημαντική βελτίωση του μέγιστου φορτίου και της δυσκαμψίας των στοιχείων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του δοκιμίου με UHPFRC στους αρμούς και στρώση από UHPFRC πάχους 30 χιλιοστών με τα αντίστοιχα του δοκιμίου με συμβατικό κονίαμα και πρόσθετη στρώση από Ο.Σ., φαίνεται ότι η προσθήκη UHPFRC είναι σημαντικά πιο αποτελεσματική για την αύξηση της δυσκαμψίας και του μέγιστου φορτίου.

Τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων και οι αντίστοιχες ρωγμές για το μέγιστο φορτίο παρουσιάζονται στο Σχ. 5α για το δοκίμιο με συμβατικό κονίαμα, και στο Σχ. 5β για το δοκίμιο με UHPFRC στους αρμούς.



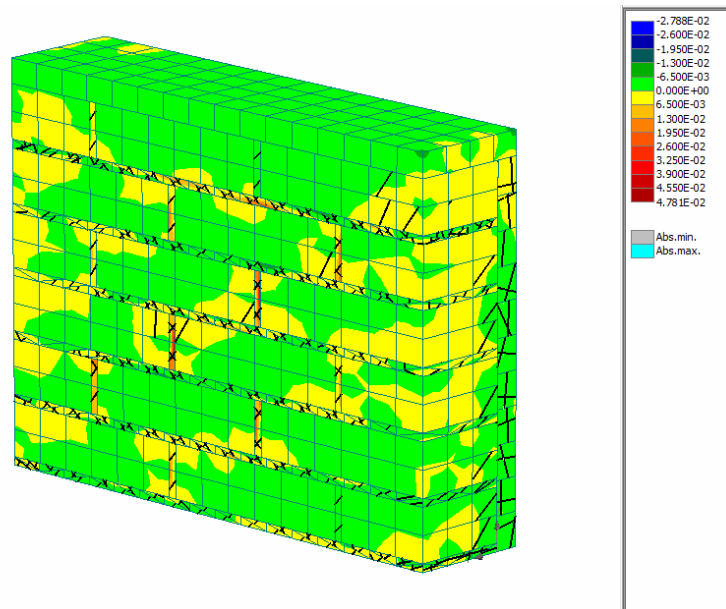
(α)



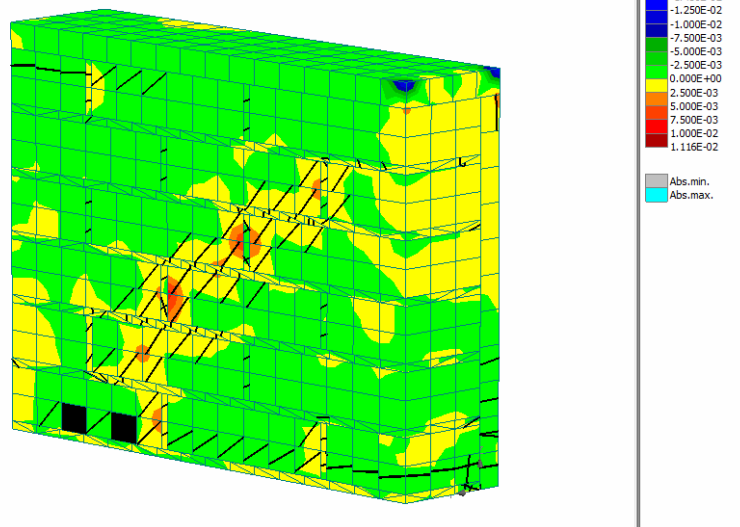
(β)

Σχ. 5 Κατανομή παραμορφώσεων και ρωγμών στο μέγιστο φορτίο για δοκίμια α) με συμβατικό κονίαμα και β) με αντικατάσταση του συμβατικού κονιάματος με UHPFRC

Αντίστοιχα αποτελέσματα κατανομών παραμορφώσεων και ρωγμών παρουσιάζονται στο Σχ. 6α για δοκίμιο με συμβατικό κονίαμα και πρόσθετη στρώση πάχους 30 χιλιοστών από Ο.Σ., και στο Σχ. 6β για δοκίμιο με αντικατάσταση του συμβατικού κονιάματος με UHPFRC και πρόσθετη στρώση UHPFRC πάχους 30 χιλιοστών.



(α)



(β)

Σχ. 6 Κατανομή παραμορφώσεων και ρωγμών στο μέγιστο φορτίο για δοκίμια α) με συμβατικό κονίαμα και πρόσθετη στρώση από Ο.Σ. και β) με UHPFRC στους αρμούς και πρόσθετη στρώση από UHPFRC

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 5 και στο Σχ. 6 δείχνουν ότι και στις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς πρόσθετη στρώση) η χρήση UHPFRC οδηγεί σε αλλαγή της μορφής αστοχίας από αστοχία στους αρμούς σε αστοχία στους οπτόπλινθους η οποία συμβαίνει σε σημαντικά υψηλότερες τιμές φορτίων.

### Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκε μια νέα τεχνική ενίσχυσης με χρήση UHPFRC στους αρμούς καθώς και συνδυασμός χρήσης UHPFRC στους αρμούς και πρόσθετη στρώση από το ίδιο υλικό (UHPFRC). Αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και η αποδοτικότητα της συγκεκριμένης τεχνικής αποτιμήθηκε μέσω συγκρίσεων με αντίστοιχα



αποτελέσματα ενισχυμένων στοιχείων με συμβατική μέθοδο ενίσχυσης με χρήση πρόσθετης στρώσης από Οπλισμένο Σκυρόδεμα.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα βρέθηκαν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων:

- Σημαντική βελτίωση της μέγιστης αντοχής επιτυγχάνεται με αντικατάσταση του συμβατικού κονιάματος με UHPFRC ενώ φαίνεται ότι στην περίπτωση αυτή η αστοχία εμφανίζεται με αστοχία των οπτόπλινθων σε αντίθεση με τα στοιχεία με συμβατικό κονίαμα όπου η αστοχία συμβαίνει στους αρμούς.
- Ακόμα σημαντικότερη βελτίωση του μέγιστου φορτίου αλλά και της δυσκαμψίας στοιχείων από άοπλη τοιχοποιία επιτυγχάνεται με προσθήκη στρώσης από UHPFRC σε συνδυασμό με UHPFRC στους αρμούς.
- Συγκριτικά αποτελέσματα του δοκιμίου με αρμούς και στρώση από UHPFRC πάχους 30 χιλιοστών και του αντίστοιχου δοκιμίου από συμβατικό κονίαμα και πρόσθετη στρώση από Ο.Σ. δείχνουν ότι η χρήση UHPFRC είναι πιο αποτελεσματική για την αύξηση της δυσκαμψίας αλλά και του μέγιστου φορτίου σε σχέση με την συμβατική μέθοδο.

Η παρούσα διερεύνηση δείχνει ότι η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερ-υψηλής επιτελεστικότητας μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην βελτίωση της αντοχής και δυσκαμψίας στοιχείων από άοπλη τοιχοποιία ειδικά όταν εφαρμόζεται στους αρμούς σε συνδυασμό με πρόσθετη στρώση.

## Βιβλιογραφία

- Abrams D., Smith T., Lynch J., and Franklin S. (2007), “Effectiveness of Rehabilitation on. Seismic Behaviour of Masonry Piers”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 133(1). pp. 32-44.
- Cervenka V, Jendele L, and Cervenka J. ATENA Program Documentation: Part 1 Theory. Czech Republic, Prague; 2013.
- Galati, N., Tumialan, G. and Nanni, A. (2006), “ Strengthening with FRP bars of URM walls subject to out-of-plane loads”, *Construction and Building Materials*, Vol. 20(1-2), pp. 101-110.
- Lampropoulos, A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., and Dritsos S.E (2015a) , “Strengthening of reinforced concrete beams using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete”, *4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2015)*. Leipzig, Germany.
- Lampropoulos, Andreas, Paschalis, Spyridon A. and Dritsos, Stephanos E. (2015b), “UHPFRC versus RC jackets for the seismic upgrade of columns In: Structural Engineering”, Providing Solutions to Global Challenges, IABSE Conference, Geneva, Switzerland.
- Lampropoulos A., Paschalis S., Tsioulou O., and Dritsos S. (2016a), “Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)”, *Engineering Structures*, Vol. 106, pp. 370-384.
- Lampropoulos A., Tsioulou O., Paschalis S. and Dritsos S. (2016b), “Strengthening of unreinforced masonry structures using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)”, *19<sup>th</sup> IABSE Congress*, Stockholm, Sweden.
- Mosallam, A.S. (2007), “Out-of-plane flexural behavior of unreinforced red brick walls strengthened with FRP composites”, *Composites: Part B*, Vol. 38, pp. 559–574.
- Roca P., Araiza G. (2010), “Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded FRP laminates for in-plane reinforcement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1372–1384.
- Somr M. (2011), “Numerical simulation of cocciopesto-based masonry structures”, Diploma Thesis. Czech Technical University, Prague.