

Ενίσχυση Άοπλης Φέρουσας Τοιχοποιίας με Εξωτερικό Οπλισμό FRP ή TRM

Αθανασία Κ. Θώμογλου

Υποψήφια Διδάκτωρ Δ.Π.Θ., email: athanasia_thomoglou@yahoo.gr

Θεόδωρος Χ. Ρουσάκης

Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ., email: trousak@civil.duth.gr

Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης

Καθηγητής Δ.Π.Θ., email: karabin@civil.duth.gr

Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία έχει γίνει εκτενής έρευνα σχετική με την ενίσχυση άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας με εξωτερικό οπλισμό FRP ή TRM. 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). Πρώτοι οι Triantafillou et al. (2005), Triantafillou et al. (2006), Papanicolaou et al. (2007), μελέτησαν το είδος αυτό ενίσχυσης και πρότειναν προσομοιώματα σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής της ενισχυμένης τοιχοποιίας.

Έπειτα από ένα ολοκληρωμένο πειραματικό πρόγραμμα οι Prota et al. (2006) και Lignola et al. (2009), χρησιμοποίησαν ινοπλέγμα μέσα σε μήτρα τσιμέντου CMG για ενίσχυση της τοιχοποιίας από ηφαιστειακή τέφρα η οποία υποβλήθηκε σε διαγώνια θλίψη για να μελετήσουν την εντός επιπέδου διατμητική συμπεριφορά της. Επιπλέον, μελέτες ασχολήθηκαν με την εξωτερική ενίσχυση με ινοπλέγματα από άνθρακα σε οπλισμένο σκυρόδεμα CFRCM (Prota et al. 2006, Santa-Maria 2006, Faella et al. 2010), η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη φυσική συνάφεια με το υπόβαθρο της τοιχοποιίας. Οι Papanicolaou et al. (2011), Babadeidabarad (2013), Almeida et al. (2015) μελετούν τοιχοποιίες από τούβλα ή τσιμέντο ενισχυμένες με FRCM που υπόκεινται σε διαγώνια θλίψη. Οι Tomazevic et al. (2014), έχουν διερευνήσει την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης της τοιχοποιίας από τούβλα για σεισμικά φορτία με την εφαρμογή των διαφορετικών τύπων σύνθετων ενισχυμένων κονιαμάτων, όπως GFRP πλέγμα / ύφασμα, CFRP ύφασμα σε τσιμεντοειδές κονίαμα ή σε μήτρα από εποξειδική ρητίνη, και λωρίδες CFRP. Οι Gams et al. (2014), Viscovic et al. (2015) διεξήγαγαν δοκιμές σεισμικής ενίσχυσης τοιχοποιίας από τούβλα με μια καινοτόμο μέθοδο ενίσχυσης με σύνθετα υλικά εμποτισμένα σε μήτρα εύκαμπτου πολυμερούς (πολυουρεθάνη). Οι Ferretti et al. (2015), αξιολόγησαν την διατμητική ικανότητα των υφιστάμενων τοιχοποιιών και τη βελτίωσή της με FRP ή FRCM συγκρίνοντας την αποτελεσματικότητα των δυο αυτών μεθόδων. Την εντός επιπέδου συμπεριφορά της εξωτερικής ενίσχυσης διερεύνησαν και οι Parisi et al. (2013), Corradi et al. (2014), οι οποίοι παρατήρησαν ότι οι τιμές αντοχής που λαμβάνονται από διαγώνια θλίψη είναι γενικά πιο συντηρητικές από εκείνες που προκύπτουν από δοκιμές διάτμησης σε τοιχοποιία από ηφαιστειακό πέτρωμα πριν και μετά την εφαρμογή σύνθετου πλέγματος σε ανόργανη μήτρα (IMG). Οι Borri et al. (2014) αναφέρουν και αναλύουν τα αποτελέσματα μιας σειράς μηχανικών δοκιμών σε άοπλη ιστορική τοιχοποιία ενισχυμένη με μια καινοτόμο τεχνική μέσω μανδύα πλέγματος που εισάγεται σε ανόργανη μήτρα από τσιμεντοειδές κονίαμα GFRP, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα παραμόρφωσής της.

Οι πειραματικές μελέτες ενίσχυσης κυρίως με ινοπλισμένα πολυμερή FRP περιλαμβάνουν ανθρακονήματα (Santa-Maria et al. 2006, Prota et al. 2008, Petersen et al. 2010, Dizhur A. et al. 2013, Gattulli et al. 2014, Martinelli et al. 2016) ή υαλονήματα (Valluzzi et al. 2002, Stratford 2004, Corradi et al. 2003, Marcari et al. 2007).

Πειραματικές μελέτες

Έπειτα από μια ευρεία βιβλιογραφική ανασκόπηση 21 μελετών δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων από πειραματικά αποτελέσματα. Συλλέγονται στοιχεία σχετικά με τη διατμητική αντοχή και τον τρόπο διατμητικής αστοχίας της ενισχυμένης τοιχοποιίας λαμβάνοντας υπόψη τους κύριους παράγοντες επιρροής. Περιλαμβάνονται διαφορετικά σύνθετα υλικά ενίσχυσης, το είδος της άοπλης τοιχοποιίας ή των διαφορετικών τύπων τοιχοσωμάτων, η γεωμετρία των υλικών με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας και της ενίσχυσης (Πίνακες 1 και 2). Στον Πίνακα 1 συγκαταλέγονται 36 δοκίμια από 13 μελέτες με ενίσχυση με FRCM και στον Πίνακα 2, 51 δοκίμια από 13 μελέτες ενισχυμένα με FRP αντίστοιχα. Περιλαμβάνονται ενισχύσεις FRP από γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP), πολυβινυλαλκοόλη (PVAFRP) ή βασάλτη (BFRP), σε μήτρα από τσιμέντο, πολυουρεθάνη ή εποξειδική ρητίνη, πάνω σε οπτοπλινθοδομή, τσιμεντοπλινθοδομή, ή λιθοδομή. Οι ενισχύσεις FRP διαμορφώνονται οριζόντια, κατακόρυφα, διαγώνια ή σε πλέγμα οριζόντιων και κατακόρυφων λωρίδων.

Πίνακας 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενισχυμένης άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας με FRCM

Συγγραφείς	Τύπος τοιχοποιίας	Τύπος ενίσχυσης	Τύπος FRP	H (mm)	t _m (mm)	L (mm)
Viscovic et al 2015	clay brick	FRCM	BFRP	710	120	430
	clay brick	MP-FRP	BFRP	710	120	430
Almeida et al 2015	brick	CFM	PFRM	990	140	1400
Ferretti et al 2015	brick	FRCM	CFRP	1200	300	1200
Gams et al 2014	brick	FRCM	GFRP	1500	250	1000
Borri et al 2014	stone	FRCM	GFRP	1200	560	1200
*Tomazevic et al 2014	brick	FRCM	GFRP	1575	250	1030
	stone	FRCM	GFRP	1500	500	1000
*Corradi M. et al 2014	brick	IMG	GFRP	1200	300	1200
	stone	IMG	GFRP	1200	300	1200
	stone	IMG	GFRP	1200	300	1200
Babadeidabarad 2013	concrete	FRCM	CFRP	1220	92	1220
	clay brick	FRCM	CFRP	1422	92	1220
Parisi F. et al 2013	tuff	IMG	GFRP	1230	310	1230
	tuff	IMG	GFRP	1230	310	1230
*Papanicolaou et al 2011	clay brick	TRM	CFRP	1300	85	800
	stone blocks	TRM	BFRP	1200	95	1120
Faella et al 2010	clay brick	FRCM	CFRP	1220	400	1140
	clay brick	FRCM	CFRP	1200	400	1200
	clay brick	FRCM	CFRP	1207	388	1148
	clay brick	FRCM	CFRP	1210	405	1153
	clay brick	FRCM	CFRP	1206	399	1155
	clay brick	FRCM	CFRP	1197	388	1153
Lignola et al 2009	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
Prota et al. 2006	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
	tuff	CMG	SRG	1030	250	1030

tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
tuff	CMG	SRG	1030	250	1030
tuff	CMG	SRG	1030	250	1030

Πίνακας 2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενισχυμένης άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας με FRP

Συγγραφείς	Τύπος τοιχοποιίας	Τύπος ενίσχυσης	Τύπος FRP	H (mm)	tm (mm)	L (mm)
*Martinelli et al. 2016	brick	FRP	CFRP	1160	250	1160
	brick	FRP	CFRP	1160	250	1160
	brick	FRP	CFRP	1160	250	1160
	brick	FRP	CFRP	1160	250	1160
Ferretti et al 2015	brick	FRP	CFRP	1200	300	1200
*Tomazevic et al 2014	brick	FRP	CFRP	1575	250	1030
	stone	FRP	CFRP	1500	500	1000
*Gattulli et al. 2014	clay brick	FRP	CFRP	1570	530	1480
	clay brick	FRP	GFRP	1570	530	1480
Dizhur A. et al 2013	clay brick	NSM	CFRP	1165	230	1150
	clay brick	NSM	CFRP	1165	230	1150
	clay brick	NSM	CFRP	1165	230	1150
	clay brick	NSM	CFRP	1165	230	1150
	clay brick	NSM	CFRP	1165	230	1150
Petersen et al. 2012	clay bricks	NSM	FRP	1200	110	1200
	clay bricks	NSM	FRP	1200	110	1200
	clay bricks	NSM	FRP	1200	110	1200
	clay bricks	NSM	FRP	1200	110	1200
	clay bricks	NSM	FRP	1200	110	1200
Petersen 2010	clay brick	NSM	CFRP	1200	110	1200
	clay brick	NSM	CFRP	1200	110	1200
	clay brick	NSM	CFRP	1200	110	1200
	clay brick	NSM	CFRP	1200	110	1200
	clay brick	NSM	CFRP	1200	110	1200
	clay brick	NSM	CFRP	1200	110	1200
Prota et al 2008	tuff	FRP	Grid CFRP	1570	530	1480
	tuff	FRP	Grid CFRP	1570	530	1480
	tuff	FRP	Grid CFRP	1570	530	1480
	tuff	FRP	Grid CFRP	1570	530	1480
	tuff	FRP	Cross	1570	530	1480
	tuff	FRP	Cross	1570	530	1480
*Marcari et al. 2007	tuff	FRP	Cross CFRP	1570	530	1480
	tuff	FRP	GFRP	1570	530	1480
	tuff	FRP	Cross GFRP	1570	530	1480
*ElGawady et al. 2007	clay brick	FRP	AFRP	730	95	1600
	clay brick	FRP	GFRP	730	95	1600
*Santa Maria et al. 2006	clay brick	FRP	GFRP	2000	140	1975
	clay brick	FRP	GFRP	2000	140	1975
	clay brick	FRP	GFRP	2000	140	1975
	clay brick	FRP	GFRP	2000	140	1975
*Stratford 2004	clay brick	FRP	GFRP SHEET	1200	60	1200
	concrete	FRP	GFRP SHEET	1200	60	1200
Valluzzi et al 2002	clay brick	FRP	CFRP	510	120	510
	clay brick	FRP	GFRP	510	120	510
	clay brick	FRP	PVAFRP	510	120	510
	clay brick	FRP	CFRP2	510	120	510
	clay brick	FRP	GFRP2	510	120	510
	clay brick	FRP	PVAFRP2	510	120	510

όπου H : το ύψος του τοίχου, t_m : το πάχος του τοίχου, L : το μήκος του τοίχου, f'_m : η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας, f_c : η θλιπτική αντοχή του κονιάματος, f'_t : η εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας, τ_0 : η αντοχή του δεσμού του κοινού κονιάματος, μ_0 : ο συντελεστής διατμητικής τριβής, Στους πίνακες με * παρουσιάζονται οι δοκιμές με οριζόντια δύναμη και κατακόρυφο φορτίο ενώ χωρίς * οι πειραματικές δοκιμές τοιχοποιιών σε διαγώνια θλίψη.

Υφιστάμενοι κανονισμοί σχεδιασμού

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η διατμητική ικανότητα της ενισχυμένης τοιχοποιίας σύμφωνα με τους παρακάτω κανονισμούς και τα προσομοιώματα σχεδιασμού ACI (2013), Triantafyllou and Antonopoulos (2000), Triantafyllou (1998), CNR-DT 200 R1/2013, Eurocode 6. Βασίζονται στην παραδοχή ότι η συνολική συνεισφορά σε διατμητική ικανότητα είναι το άθροισμα των δύο όρων, της τοιχοποιίας και της εξωτερικής ενίσχυσης, παρόμοια με το οπλισμένο σκυρόδεμα.

1) ACI (2013)

Η εντός επιπέδου διατμητική ικανότητα της ενισχυμένης τοιχοποιίας είναι το άθροισμα της συνεισφοράς της τοιχοποιίας και της ενίσχυσης FRCM, όπου η αποτελεσματικότητα των FRCM θεωρείται μόνο μετά την εμφάνιση της ρηγματωμένης τοιχοποιίας. Η διατμητική αντοχή σχεδιασμού υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\phi_v V_n = \phi_v (V_m + V_f) \quad (1)$$

όπου V_n : η ονομαστική διατμητική αντοχή και V_m και V_f η συνεισφορά της τοιχοποιίας και της ενίσχυσης FRCM, αντίστοιχα.

Συνεισφορά Τοιχοποιίας (V_m)

Ερευνητές έχουν δείξει ότι οι τέσσερις πιθανοί τρόποι αστοχίας εξαρτώνται από τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητες της άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας, και αυτές οι λειτουργίες έχουν αποδειχθεί μέσα από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ένας τοίχος αστοχεί όταν η τιμή της εφαρμοζόμενης διατμητικής δύναμης φτάνει την ελάχιστη διατμητική ικανότητα V_m της τοιχοποιίας που υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_m = \text{Min} (V_{ss}, V_{sf}, V_{dt}, V_c) \quad (1)$$

Διατμητική ολίσθηση: Η διατμητική ολίσθηση κατά μήκος ενός αρμού που μπορεί να προκαλείται από την αστοχία δεσμού μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος (Petersen 2009), διαμορφώθηκε από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Li et al. 2005, Silva et al. 2008) και εκφράζεται με τη σχέση:

$$V_{ss} = \frac{\tau_0}{1 - \mu_0 \tan \theta} A n \quad (3)$$

όπου τ_0 : η διατμητική αντοχή συνάφειας του κοινού κονιάματος, μ_0 ο συντελεστής διάτμησης τριβής θεωρείται ίσος με 0,3 (Li et al. 2005) και θ : η κεκλιμένη γωνία μεταξύ της οριζόντιας και κύριας διαγωνίου της τοιχοποιίας.

Διατμητική τριβή: Η διατμητική ικανότητα τριβής υπολογίζεται με βάση τον Crisafulli et al. ως:

$$V_{sf} = \frac{\tau_{0,m}}{1 - \mu_m \tan \theta} A n \quad (4)$$

Όπου,

$$\tau_{0,m} = \frac{\tau_0}{1 + 1.5 \mu_0 \frac{h}{w}} \quad (5)$$

Και

$$\mu_{0,m} = \frac{\mu}{1 + 1.5 \mu_0 \frac{h}{w}}$$

(6)

όπου h και w = ύψος και το μήκος του τούβλου, αντίστοιχα.

Διαγώνιος εφελκυσμός: Η αστοχία σε διαγώνιο εφελκυσμό εμφανίζεται όταν η κύρια εφελκυστική τάση που προκαλείται από ένα συνδυασμό μεγαλύτερης διατμητικής και θλιπτικής δύναμης φτάνει την αντοχή σε εφελκυσμό του τοιχώματος (Li et al. 2005, Silva et al. 2008, Petersen 2009). Η διατμητική ικανότητα σε διαγώνιο εφελκυσμό υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση.

$$V_{d,t} = \tan \theta + \frac{\sqrt{21.16 \tan^2 \theta}}{10.58} f'_t A_n \left(\frac{L}{H} \right) \quad (7)$$

όπου f'_t = η εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας σε (MPa) για άοπλη φέρουσα τοιχοποιία από τούβλα. L : το μήκος τοιχώματος στην κατεύθυνση της διατμητικής δύναμης και H : το ύψος της άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας ύψος.

Σύνθλιψη πέλματος: Η τοιχοποιία αστοχεί από σύνθλιψη πέλματος, όταν η τάση που δημιουργείται από τη μέγιστη φόρτιση φτάνει στην θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας (Li et al. 2005, Silva et al. 2008, Petersen 2009). Η διατμητική ικανότητα στη περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_c = \frac{2 w f'_m}{3 h + 2 w \tan \theta} A_m \quad (8)$$

όπου A_m σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης ορίζεται ως η περιοχή φόρτισης στη διεπαφή μεταξύ πέλματος χάλυβα και τοίχου.

Συμβολή της ενίσχυσης V_f

Η συμβολή της ενίσχυσης FRCM υπολογίζεται με τον ACI 549 (ACI 2013). Η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση της FRCM, ϵ_{fu} , είναι ο μέσος όρος μείον μία τυπική απόκλιση που προκύπτει από τη δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με AC434 (ICC Evaluation Service 2013). Η εφελκυστική παραμόρφωση της διατμητικής ενίσχυσης της FRCM, ϵ_{fv} , υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (9): $\epsilon_{fv} = \epsilon_{fu} \leq 0,004$ (9)

Η εφελκυστική αντοχή της διατμητικής ενίσχυσης FRCM, f_{fv} , υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (10): $f_{fv} = E_f \epsilon_{fv}$ (10)

όπου $E_f = 0$ συντελεστής ελαστικότητας σε εφελκυσμό της ρηγματωμένης ενίσχυσης με FRCM.

Η V_f υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (11):

$$V_f = 2n A_f L f_{fv} \quad (11)$$

όπου $f_{fv} = \eta$ εφελκυστική αντοχή της διατμητικής ενίσχυσης FRCM, A_f , n , L είναι το εμβαδόν του υφάσματος ενίσχυσης ανά μονάδα πλάτους, ο αριθμός των στρώσεων του υφάσματος, και το μήκος της τοιχοποιίας, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τις διατάξεις σχεδιασμού του ACI 549 (ACI 2013) περιορίζεται η αύξηση της διατμητικής ικανότητας της ενισχυμένης τοιχοποιίας που παρέχεται από την ενίσχυση FRCM να μην υπερβαίνει το 50% της ικανότητας της τοιχοποιίας χωρίς ενίσχυση. Επιπλέον, ο συντελεστής μείωσης της διατμητικής δύναμης, η , είναι ίσος με 0,75.

2) CNR-DT 200 R1/2013

Με βάση το προσομοίωμα του Ιταλικού κανονισμού (CNR-DT 200 R1/2013) η συνολική διατμητική αντοχή φέρουσας τοιχοποιίας V_{Rd} ενισχυμένη αμφίπλευρα με οριζόντιες λωρίδες ανθρακούφασματος πάχους t_f και πλάτους b_f , υπολογίζεται από το μέγιστο του αθροίσματος της διατμητικής αντοχής μη ενισχυμένης τοιχοποιίας $V_{Rd,m}$ και της διατμητικής αντίστασης που προβάλλει το σύνθετο υλικό μέχρι

να επέλθει η αστοχία $V_{Rd,f}$ και τη μέγιστη διατμητική δύναμη που προκαλεί κατάρρευση του θλιπτήρα V_{max} .

$$V_{Rd} = \text{Min} (V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{max}) \quad (12)$$

Αν η διατμητική ενίσχυση τοποθετείται παράλληλα με τον αρμό, τότε:

$$V_{Rd,m} = x \cdot t \cdot f_{vd} \quad (13)$$

Αν η διατμητική ενίσχυση τοποθετείται παράλληλα με τον αρμό, η διατμητική αντοχή που παρέχεται από το σύστημα ενίσχυσης με FRP μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.6 \cdot d (E_f \cdot \varepsilon_{fd}) \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (14)$$

όπου: x : η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την ακραία θλιπτική ίνα, t : το πλάτος της τοιχοποιίας, f_{vd} : η διατμητική αντοχή σχεδιασμού, E_f : το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης, ε_{fd} : η μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού σύνθετου υλικού, t_f : το πάχος του FRP, b_f και p_f : το πλάτος και η απόσταση από κέντρο σε κέντρο της ενίσχυσης με σύνθετο υλικό, κάθετα στη διεύθυνση της διατμητικής δύναμης.

Η μέγιστη διατμητική δύναμη που προκαλεί κατάρρευση του θλιπτήρα, $V_{Rd,max}$, υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{Rd,max} = 0.3 \cdot f_{md}^h \cdot t \cdot d \quad (15)$$

όπου: f_{md}^h : η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας παράλληλα στο κονίαμα.

Η διατμητική ικανότητα της μη ενισχυμένης τοιχοποιίας θα πρέπει να υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{Rd,m} = x \cdot d \cdot f_{vd} \quad (16)$$

όπου: d : η απόσταση μεταξύ της θλιβόμενης ζώνης της τοιχοποιίας και του κέντρου της κατακόρυφης ενίσχυσης FRP.

Η μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού του σύνθετου υλικού δίνεται ως η ελάχιστη από τις δύο παρακάτω τιμές:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left(n_a \frac{\varepsilon_{fd}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right) \quad (17)$$

όπου: n_a : περιβαλλοντικός παράγοντας, γ_f : συντελεστής ασφαλείας σύνθετου υλικού, ε_{fk} : η παραμόρφωση αστοχίας του υλικού ενίσχυσης, ε_{fdd} : η παραμόρφωση αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{ffd}}{E_f} \quad (18)$$

και f_{ffd} η αντοχή σχεδιασμού αποκόλλησης του σύνθετου υλικού, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$f_{ffd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2 E_f \Gamma_{fk}}{t_f}} \quad (19)$$

όπου,

$$\Gamma_{fd} = k_b k_G \sqrt{f_{bm} f_{btm}} \quad (20)$$

με: γ_{fd} : συντελεστής ασφαλείας τοιχοποιίας ίσος με 1.2, f_{bm} και f_{btm} είναι η μέση θλιπτική και εφελκυστική αντοχή των λιθοσωμάτων της τοιχοποιίας, αντίστοιχα. Εάν δεν υπάρχουν αποτελέσματα από πειραματικές δοκιμές, η μέση εφελκυστική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί ως $0,10 f_{bm}$.

Εάν δεν είναι διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα το k_b μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f / b}{1 + b_f / b}} \quad (21)$$

k_G είναι διορθωτικός συντελεστής, που εκφράζεται σε mm και εξαρτάται από τον τύπο της τοιχοποιίας:

- για τοιχοποιία από διάτρητα τούβλα: $k_G = 0,031$ χιλιοστά
- για τοιχοποιία από ηφαιστειακή τέφρα: $k_G = 0,048$ χιλιοστά
- για τοιχοποιία από ασβεστολιθικό ψαμμίτη και πέτρες Lecce: $k_G = 0,012$ χιλιοστά

Για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα συμβεί στην τοιχοποιία η πρόωρη αστοχία σε διαγώνια σύνθλιψη, η μέγιστη διατμητική τάση πρέπει να είναι περιορισμένη. Ειδικότερα, όταν χρησιμοποιείται διάταξη πλέγματος, πρέπει να είναι χαμηλότερη από την τιμή $V_{t,c}$ που υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{t,c} = 0.3 t d f_{wh,c} \quad (22)$$

όπου: $f_{wh,c}$: η οριζόντια θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

3) Προσομοίωμα Τριανταφύλλου (1998)

Στα προσομοιώματα υπολογισμού των Triantafillou (1998) και CNR (2013) η συμβολή της άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας υπολογίζεται με την χαρακτηριστική διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας f_{vk} και η ενεργή διατομή της τοιχοποιίας μειώνεται κατά το συντελεστή υλικού ασφαλείας γ_M .

$$V_m = \frac{f_{vk} \cdot t \cdot d}{\gamma_M} \quad (23)$$

Το προσομοίωμα του Triantafillou (1998) είναι κατάλληλο μόνο για την περίπτωση όπου τα FRP έχουν τη μορφή ελάσματος. Η διατμητική συνεισφορά της ενίσχυσης V_{FRP} υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{FRP} = \rho_h E_{FRP} \left(r \frac{\varepsilon_{FRP,u}}{\gamma_{FRP}} \right) t 0.9 d \quad (24)$$

όπου r = συντελεστής απόδοσης ενίσχυσης, εξαρτώμενος από τον ακριβή μηχανισμό αστοχίας του FRP (αποκόλλησης ή θραύση σε εφελκυσμό), ρ_h = κλάσμα εμβαδού FRP στην οριζόντια κατεύθυνση, $\varepsilon_{FRP,u}$ = μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του FRP, t = πάχος τοιχοποιίας, d = ενεργό βάθος, το οποίο μπορεί να ληφθεί για τοιχοποιία με πολλές στρώσεις ενίσχυσης περίπου ίση με $0.8L$ και γ_{FRP} = μερικός συντελεστής ασφαλείας για FRP σε μονοαξονική ένταση, 1.15, 1.2 και 1.25 για το CFRP, AFRP, και GFRP, αντίστοιχα. Εάν χρησιμοποιείται η ενεργή παραμόρφωση FRP για να αντικαταστήσει τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση, $\varepsilon_{FRP,e} = r \varepsilon_{FRP,u}$, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_{FRP} = \frac{0.7}{\gamma_{FRP}} \rho_h E_{FRP} \varepsilon_{FRP,e} l t \quad (25)$$

Η ενεργή παραμόρφωση $\varepsilon_{FRP,e}$ μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω εξίσωση, η οποία αναπτύχθηκε από τον ίδιο συγγραφέα μέσω των πειραματικών δεδομένων για διατμητική ενίσχυση σκυροδέματος με FRP.

$$\varepsilon_{FRP,e} = 0,0119 - 0,0205 (\rho_h E_{FRP}) + 0,0104 (\rho_h E_{FRP})^2 \quad (26)$$

4) Προσομοίωμα Triantafillou and Antonopoulos (2000)

Αργότερα, οι συγγραφείς Triantafillou and Antonopoulos (2000) πρότειναν ένα βελτιωμένο προσομοίωμα στο οποίο η ενεργή παραμόρφωση FRP, έχει αναπτυχθεί περαιτέρω ως τρεις εκφράσεις για να διακρίνουν διαφορετικούς τρόπους αστοχίας των FRP αποκόλλησης ή θραύση για τα είδη των υλικών FRP, CFRP ή AFRP .

Πλήρως τυλιγμένο CFRP

$$\varepsilon_{FRP,e} = 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_{FRP} \rho_h} \right)^{0.3} \varepsilon_{FRP,u} \quad (27)$$

Πλευρικός ή U-σχήματος μανδύας CFRP

$$\varepsilon_{FRP,e} = \min \left[0.65 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_{FRP} \rho_h} \right)^{0.3} \times 10^{-3}, 0,17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_{FRP} \rho_h} \right)^{0.56} \varepsilon_{FRP,u} \right] \quad (28)$$

Πλήρως τυλιγμένα AFRP

$$\varepsilon_{FRP,e} = 0,048 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_{FRP} \rho_h} \right)^{0.47} \varepsilon_{FRP,u} \quad (29)$$

όπου f_c = θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας και $\varepsilon_{FRP,u}$ =0,015 για CFRP, 0,035 για AFRP.

Ως πλήρως τυλιγμένο FRP δεν έχει ποτέ χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση τοιχοποιίας, ως εκ τούτου μόνο η σχέση (28) είναι σχετική με τοιχοποιία. Στο προσομοίωμα του Τριανταφύλλου οι τάσεις υπολογισμού περιορίζονται από τη διατμητική αντοχή που αντιστοιχεί στη σύνθλιψη πέλματος V_{tc} , η οποία εξαρτάται από τη χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη της τοιχοποιίας f_k και γ_M .

$$V_{tc} = \frac{0.3 \cdot f_k \cdot t \cdot d}{\gamma_M} \quad (30)$$

5) Ευρωκώδικας 6

Ο Ευρωκώδικας 6 και 8, καθώς και τα ιταλικά πρότυπα κάνουν αναφορά σε τοιχοποιίες (ή πεσσούς) και δοκούς, για τις οποίες παρέχονται κριτήρια αντοχής. Τα κριτήρια αντοχής για εντός επιπέδου απόκριση των δομικών στοιχείων τοιχοποιίας προτείνονται στο πρότυπο EN 1996 και στο παράρτημα Γ του EN 1998-3. Και οι δύο κανονισμοί περιλαμβάνουν ένα κριτήριο αντοχής με τη διατύπωση του νόμου Coulomb για την αξιολόγηση της διατμητικής αντοχής:

$$V_{Rdm} = f_{vd} \cdot t \cdot l_c / \gamma_M \quad (31)$$

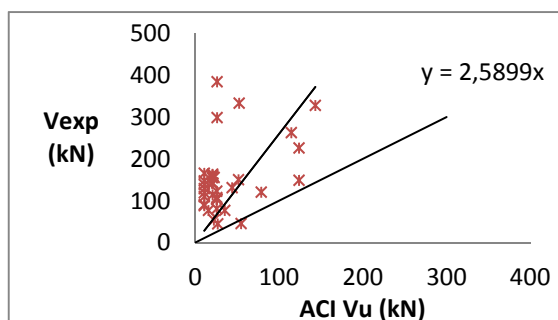
$$V_{Rd} = f_{vk} \cdot t \cdot d + 0,9d \cdot \rho_{FRP} \cdot E_{FRP} \cdot t \left(0,0119 - 0,0205(\rho_{FRP} \cdot E_{FRP}) + 0,0104(\rho_{FRP} \cdot E_{FRP})^2 \right) \quad (32)$$

όπου: το t είναι το πάχος του τοιχώματος, l_c είναι το μήκος του θλιβόμενου τμήματος της διατομής, f_{vd} είναι η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής της τοιχοποιίας,

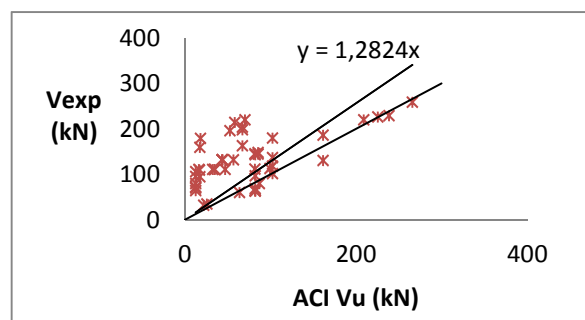
$f_{vd} = f_{v0} + 0.4\sigma_d \leq f_{v, Lim}$ είναι η αντοχή σε διάτμηση όπου: f_{v0} είναι η αρχική διατμητική αντοχή απουσία κατακόρυφου φορτίου, σ_d είναι η θλιπτική τάση κατά μήκος l_c , και $f_{v, Lim}$ είναι μια οριακή τιμή της f_v σε σχέση με τα υλικά που αστόχησαν.

Σύγκριση αναλυτικών σχέσεων σχεδιασμού και πειραματικών αποτελεσμάτων

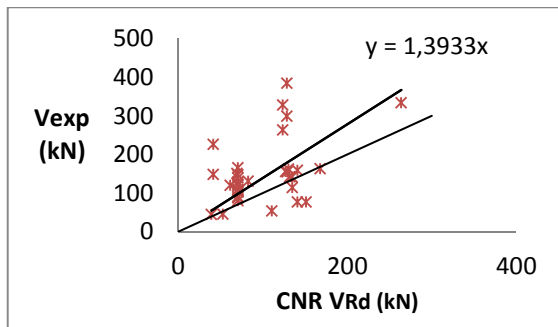
Τα αποτελέσματα από τους Πίνακες αναλύονται στατιστικά και αποδίδονται στα παρακάτω διαγράμματα για να εκτιμηθεί η ακρίβεια πρόβλεψης της διατμητικής ικανότητας ενισχυμένων τοιχοποιιών με χρήση των σχέσεων σχεδιασμού. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα (σχήματα 1-12) υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις.



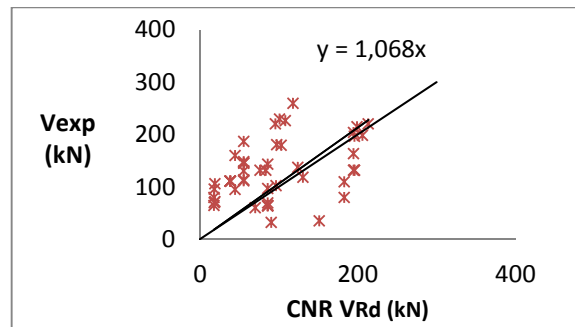
Σχ.1 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον κανονισμό ACI 549-13 για ενίσχυση με FRCM.



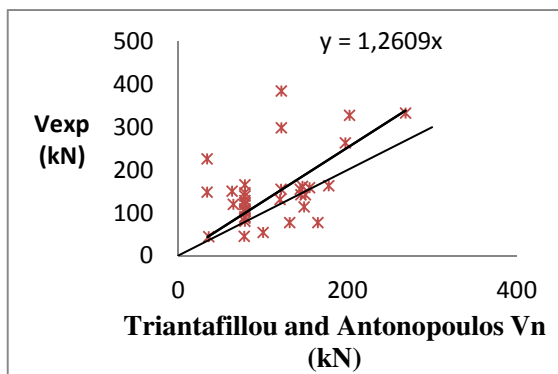
Σχ.2 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον κανονισμό ACI 549-13 για ενίσχυση με FRP.



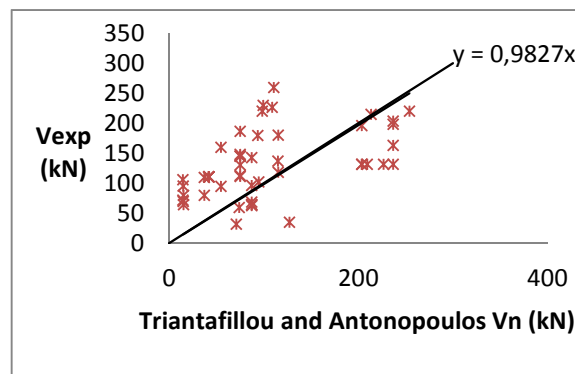
Σχ.3 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον κανονισμό CNR-DT 200 R1/2013 για ενίσχυση με FRCM.



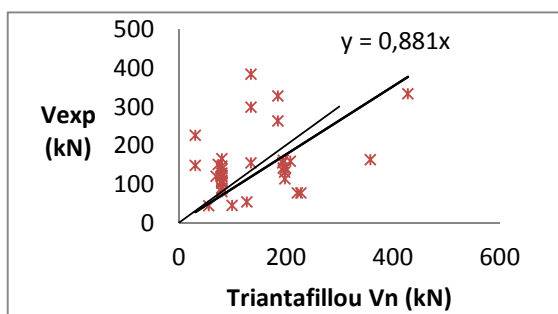
Σχ.4 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον κανονισμό CNR-DT 200 R1/2013 για ενίσχυση με FRP.



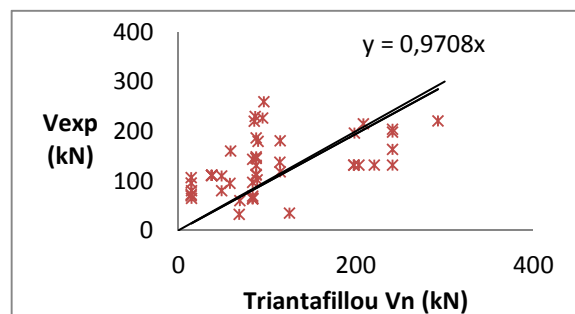
Σχ.5 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το προσομοίωμα TA για ενίσχυση με FRCM.



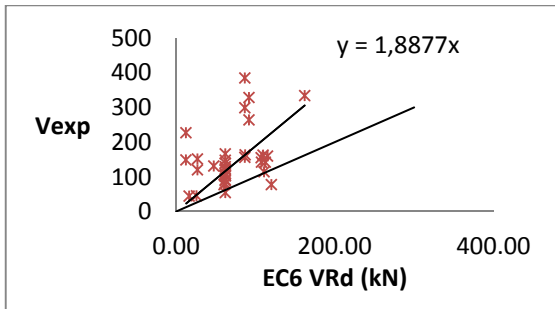
Σχ.6 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το προσομοίωμα TA για ενίσχυση με FRP.



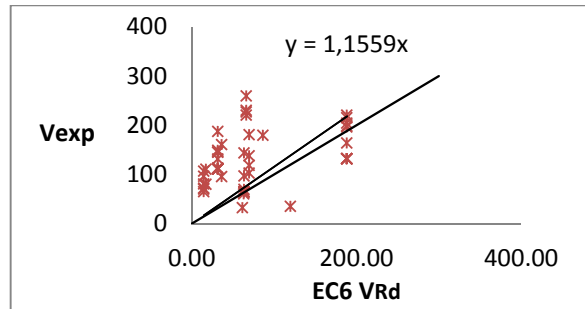
Σχ.7 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το προσομοίωμα Triantafillou για ενίσχυση με FRCM.



Σχ.8 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το προσομοίωμα Triantafillou για ενίσχυση με FRP.



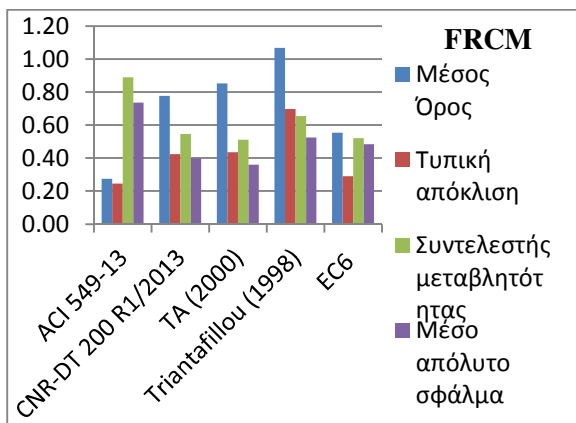
Σχ.9 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον κανονισμό EC 6 για ενίσχυση με FRCM.



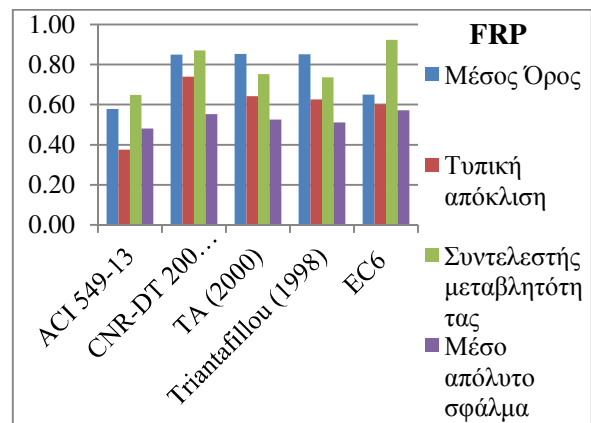
Σχ.10 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής διατμητικής αντοχής σύμφωνα με τον κανονισμό EC 6 για ενίσχυση με FRP.

Πίνακας 3. Αξιολόγηση κανονισμών / προσομοιωμάτων για πρόβλεψη διατμητικής αντοχής άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας για ενίσχυση FRCM και FRP.

Κανονισμός/ Προσομοίωμα	Πρόβλεψη διατμητικής αντοχής ενισχυμένης άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας							
	FRCM				FRP			
	Μέσος Όρος	Τυπική ή απόκλιση	Συντελεστής μεταβλητότητας	Μέσο απόλυτο σφάλμα %	Μέσος Όρος	Τυπική ή απόκλιση	Συντελεστής μεταβλητότητας	Μέσο απόλυτο σφάλμα %
ACI 549-13	0,27	0,25	0,89	73,6	0,58	0,38	0,65	48,1
CNR-DT 200 R1/2013	0,77	0,42	0,55	39,8	0,85	0,74	0,87	55,3
T.A. (2000)	0,85	0,44	0,51	36,1	0,85	0,64	0,75	52,5
Triantafyllou (1998)	1,06	0,70	0,65	52,5	0,85	0,63	0,74	51,1
EC6	0,55	0,29	0,52	48,4	0,65	0,60	0,92	57,2



Σχ.11 Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, συντελεστής συσχέτισης, μέσο απόλυτο σφάλμα της των θεωρητικών προβλέψεων διατμητικής αντοχής για ενίσχυση με FRCM έναντι των πειραματικών τιμών.



Σχ.12 Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, συντελεστής συσχέτισης, μέσο απόλυτο σφάλμα της των θεωρητικών προβλέψεων διατμητικής αντοχής για ενίσχυση με FRP έναντι των πειραματικών τιμών.

Για ενίσχυση με FRCM (πίνακας 3) παρατηρείται ότι ο μέσος όρος των λόγων αναλυτικής προς θεωρητική τιμή κυμαίνεται από 0.27 με μέσο απόλυτο σφάλμα 73.6% για τον ACI έως και 1.06 με μέσο απόλυτο σφάλμα 52.5% αντίστοιχα για το προσομοίωμα Triantafillou (1998). Τα προσομοιώματα CNR και EC6 είναι αρκετά συντηρητικά με μέσο όρο λόγων 0.77 και 0.55 αντίστοιχα ενώ τα μέσα απόλυτα σφάλματα είναι 39.8% και 48.4%. Το προσομοίωμα Triantafillou and Antonopoulos (2000) παρέχει ακριβέστερη εκτίμηση της διατμητικής αντοχής φέρουσας τοιχοποιίας, όταν αυτή ενισχύεται με FRCM με μέσο όρο των λόγων αναλυτικής προς θεωρητική τιμή 0,85 και το μέσο απόλυτο σφάλμα 36,1%.

Για ενίσχυση με FRP παρατηρείται ότι ο μέσος όρος των λόγων αναλυτικής προς θεωρητική τιμή κυμαίνεται από 0.58 με μέσο απόλυτο σφάλμα 48.1% για τον ACI έως και 0.85 με σφάλμα 51.5% αντίστοιχα για το προσομοίωμα Triantafillou (1998). Τα προσομοιώματα CNR και EC6 είναι πιο ακριβή για ενίσχυση με FRP από ό,τι με FRCM με μέσο όρο λόγων 0.85 και 0.65 αντίστοιχα ενώ τα μέσα απόλυτα σφάλματα είναι 55.3% και 57.2% αντίστοιχα. Το προσομοίωμα Triantafillou and Antonopoulos (2000) παρέχει μέσο όρο των λόγων αναλυτικής προς θεωρητική τιμή 0,85 και μέσο απόλυτο σφάλμα 52.5%

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία συγκεντρώνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας από εντός επιπέδου φόρτιση άοπλων φερουσών τοιχοποιιών ενισχυμένων με FRCM ή FRP. Συγκαταλέγονται τα αποτελέσματα από 51 δοκιμές τοιχοποιιών με ενίσχυση με FRP και από 36 δοκιμές με ενίσχυση με FRCM. Περιλαμβάνονται ενισχύσεις FRP από γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP), πολυβυνιλαλκοόλη (PVAFRP) ή βασάλτη (BFRP), σε μήτρα από τσιμέντο, πολυουρεθάνη ή εποξειδική ρητίνη, πάνω σε οπτοπλινθοδομή, τσιμεντοπλινθοδομή, ή λιθοδομή. Οι ενισχύσεις FRP διαμορφώνονται οριζόντια, κατακόρυφα, διαγώνια ή σε πλέγμα οριζόντιων και κατακόρυφων λωρίδων, σε τοιχοποιίες που υποβάλλονται σε δοκιμές διαγώνιας θλίψης ή σε δοκιμές θλίψης-διάτμησης.

Επίσης, παρουσιάζονται οι σχετικές σχέσεις σχεδιασμού έναντι τέμνουσας κατά ACI 2013, Triantafillou and Antonopoulos (2000), Triantafillou (1998), CNR-DT 200 R1/2013, Eurocode 6 οι οποίες έχουν διαφορές στην εκτίμηση της άοπλης μη ενισχυμένης διατμητικής ικανότητας V_m αλλά και στη συμβολή της ενίσχυσης στη συνολική διατμητική ικανότητα V_n . Από τα δυο προσομοιώματα Triantafillou and Antonopoulos (2000) και Triantafillou (1998) το πρώτο δίνει πιο συντηρητικές τιμές διατμητικής αντοχής φέρουσας τοιχοποιίας V_n σε σχέση με το δεύτερο, λόγω του συντελεστή απόδοσης $\gamma_{FRP,u}$ που χρησιμοποιεί. Επιπλέον, ο κανονισμός ACI 2013 δεν λαμβάνει υπόψη του το κατακόρυφο φορτίο που ασκείται στην τοιχοποιία, ενώ οι υπόλοιποι το λαμβάνουν.

Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω για την αξιοπιστία των σχέσεων σχεδιασμού:

Τα προσομοιώματα Triantafillou and Antonopoulos (2000) και Triantafillou (1998) παρέχουν ακριβέστερη εκτίμηση της διατμητικής αντοχής φέρουσας τοιχοποιίας, όταν αυτή ενισχύεται με FRCM αλλά και με FRP. Ο μέσος όρος των λόγων αναλυτικής προς θεωρητική τιμή για το προσομοίωμα Triantafillou and Antonopoulos (2000) είναι 0,85 και το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι 36,1%, για ενίσχυση με FRCM. Αντίστοιχα για ενίσχυση με FRP, ο μέσος όρος των λόγων

αναλυτικής προς θεωρητική τιμή είναι 0,85 για τα προσομοιώματα Triantafillou and Antonopoulos (2000), Triantafillou (1998) και για τον κανονισμό CNR-DT 200 R1/2013, ενώ το μέσο απόλυτο σφάλμα για το προσομοίωμα Triantafillou (1998) είναι 51,1 % .

Λαμβάνοντας υπόψη το σημαντικό μέσο απόλυτο σφάλμα των προβλέψεων συμπεραίνεται ότι απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση παραμέτρων τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά ώστε να προκύψουν πιο αξιόπιστα προσομοιώματα.

Βιβλιογραφία

- Crisafulli FJ, Carr AJ, Park R. Shear strength of unreinforced masonry panels. In: Proc Pacific conference on earthquake engineering. Melbourne, Australia. November 20–22; p. 77–86., 1995
- Valluzzi M.R., Tinazzi D., Modena C., Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Construction and Building Materials* (Elsevier), 16:409-416., 2002
- Stratford, T., Pascale, G., Manfroni, O., and Bonfiglioli, B. “Shear strengthening masonry panels with sheet glass-fiber reinforced polymer.” *J. Compos. Constr.*, 8_5_, 434–443., 2004
- Triantafillou T.C., Papanicolaou C.G. (2005) Textile reinforced mortars (TRM) as strengthening materials for concrete structures. In: Balazs GL, Borosnyoi A (eds) Proceedings of the fib symposium “Keep Concrete Attractive”. Budapest, Hungary, May 2005, pp 345–350
- Li, T., Galati, N., Tumialan, J. G., and Nanni, A., Analysis of unreinforced masonry concrete walls strengthened with glass fiber reinforced polymer bars., *ACI Struct. J.*, 102(4), 569–577., 2005
- Triantafillou T.C., Papanicolaou C.G., Zissimopoulos P., Laourdekis T., Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets, *ACI Struct J*, 103 (1) (2006), pp. 28–37
- 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
- Papanicolaou CG, Triantafillou TC, Karlos K, Papathanasiou M. Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Mater Struct, RILEM* 2007;40(10):1081–97.
- Santa-Maria H, Alcaino P., Luders C., Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fibers fabrics. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA, 2006
- ElGawady, M., P. Lestuzzi, M. Badoux, Shear Strength of URM Walls Retrofitted Using FRP, *Engineering Structures*, 28(12), pp. 1658-1670., 2006
- Marcari, G., Manfredi, G., Prota, A., and Pecce, M. 2007_. “In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP.” *Composites, Part B*, 38, 887–901.
- Triantafillou TC. Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates. *J Compos Constr ASCE* 1998;2(2):96 –104.
- Prota A., Manfredi G. and Nardone F., Assessment of Design Formulas for In-Plane FRP Strengthening of Masonry Walls, *ASCE, J. Compos. Constr.* 12:643-649, 2008
- Silva, P. F., Yu, P., and Nanni, A., Monte Carlo simulation of shear capacity of URM walls retrofitted by polyurea reinforced GFRP grids. *J. Compos. Constr.*, 12(4), 405–415., 2008
- Lignola, G., Prota, A., and Manfredi, G. (2009). “Nonlinear analyses of tuff masonry walls strengthened with cementitious matrix-grid composites.” *J. Compos. Constr.*, 13(4), 243–251.

- 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.
- Petersen RB, Masia MJ, Seracino R. In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with NSM FRP strips. II: Finite element model. *J Compos Constr*, 14(6):764–74., 2010
- Triantafillou, T. C. and Antonopoulos, C. P., “Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP”, *J. of Comp. for Constr.*, ASCE, 4(4), 2000, pp. 198-204.
- Papanicolaou C., Triantafillou T., Lekka M., Assessment of Design Formulas for In-Plane FRP Strengthening of Masonry Walls, Elsevier Ltd, *Construction and Building Materials* 25, 504–514, 2011
- Petersen RB, Ismail N., Masia MJ, Ingham J.M., Finite element modelling of unreinforced masonry shear wallettes strengthened using twisted steel bars., *Construction and Building Materials* 33, 14–24, 2012
- Babaeidarabad, S., De Caso, F., and Nanni, A.(2013). "URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to Diagonal Compression." *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000441, 04013045.
- 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
- Dizhur D.,Griffith M. and Ingham J., In-Plane Shear Improvement of Unreinforced Masonry Wall Panels Using NSM CFRP Strips, M.ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000400., American Society of Civil Engineers., *J. Compos. Constr.*, 2013
- Tomažević M., Gams M., Berset T., Seismic strengthening of brick masonry walls with composites: an experimental study, 2014
- Gams M., Kwiecien A., Zajac B., Tomacevic M.: Seismic Strengthening Of Brick Masonry Walls With Flexible Polymer Coating. 9th International Masonry Conference in Guimarães, 2014
- 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.
- 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
- Gattuli V., Marcari G., Paolone A., Potenza F., Simple modeling approach for the structural retrofitting of FRP-strengthened masonry systems, 9th International Masonry Conference, Guimarães, 2014
- 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)
- 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)
- Martinelli E., Perri F., Sguazzo C., Faella C., Cyclic shear-compression tests on masonry walls strengthened with alternative configurations of CFRP strips, *Bull Earthquake Eng.*, DOI 10.1007/s10518-016-9895-6, 2016

- 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.
- American Concrete Institute, “Guide to Design and Construction of Externally Bonded FRCM Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures”, Detroit, 2013
- EN (European Standard). (1998). “Design of structures for earthquake resistance, part 3: Assessment and retrofitting of buildings.” EN 1998-3, European Standard, Brussels, Belgium.
- 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