

**Διερεύνηση Επιπτώσεων Ενίσχυσης των
Τοιχοπληρώσεων για τη Βελτίωση της Σεισμικής
Συμπεριφοράς Υφισταμένων Κτιρίων**
On the Effect of Strengthening Infill Walls in Seismically
Retrofitted Buildings

Ευαγγελία ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ¹, Αθανάσιος ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ²

*Λέξεις κλειδιά: Ενίσχυση κατασκευών, Ινοπλέγματα, Σύνθετα υλικά,
Τοιχοπληρώσεις*

Keywords: Composite materials, Infills, Seismic retrofitting, Textiles

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων σχεδιασμένων με παλαιότερο ή χωρίς αντισεισμικό κανονισμό μέσω της ενίσχυσης των τοιχοπληρώσεων ώστε να μπορούν να συμμετέχουν στο στατικό σύστημα ανάληψης οριζόντιων φορτίων είναι μία ελκυστική μέθοδος λόγω της σχετικής ευκολίας εφαρμογής της και της οικονομικότητάς της. Ωστόσο, η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων συνοδεύεται από δευτερογενείς επιβαρύνσεις των φερόντων μελών της κατασκευής, οι οποίες μπορούν να αποδειχθούν κρίσιμες. Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι τοπικές επιπτώσεις λόγω της αλληλεπίδρασης των τοιχοπληρώσεων με τον φέροντα οργανισμό και τη θεμελίωση σε παράδειγμα υφισταμένης δώροφης κατασκευής. Γίνεται ανάλυση: α) με τον “γυμνό” φέροντα οργανισμό της, β) με τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων πριν από την ενίσχυσή τους και γ) με τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων μετά από την ενίσχυσή τους με ινοπλέγματα. Στην τελευταία περίπτωση προκύπτουν απαιτήσεις διατμητικών ενισχύσεων στις δοκούς και τα υποστυλώματα που εμφατνώνουν τις τοιχοπληρώσεις, ενώ προκύπτουν και αυξημένα φορτία θεμελίωσης.

ABSTRACT: Seismic retrofitting of existing reinforced concrete buildings designed with older or without seismic provisions through the strengthening of their infill walls, is an attractive method due to its simplicity and low cost. However, strengthening of the infills might lead to adverse secondary effects to the RC frame and the foundation. In this paper the local effects of strengthening the infills are investigated for the case of a two-storey building. The structure is analyzed: (a) considering the bare frame only; (b) accounting for the contribution of the infill walls before their strengthening; and (c) accounting for the infill walls after their strengthening. In the latter case, there is need of shear strengthening of the beams and the columns framing the walls, while the seismic loads of the foundation also increase.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, ΕΤΕΠ Ε.Μ.Π., email: evapavl@central.ntua.gr

² Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: ttriant@upatras.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μεγάλο τμήμα του υφιστάμενου οικιστικού πλούτου της χώρας αποτελείται από κατασκευές που σχεδιάστηκαν με παλαιότερους κανονισμούς, για σεισμικές δράσεις αρκετά μικρότερες από τις προβλεπόμενες στους σύγχρονους κανονισμούς. Παράλληλα, η γήρανση των υλικών των παλαιότερων κατασκευών και η επιβαρυντική επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών έχουν προκαλέσει περαιτέρω εξασθένηση της φέρουσας ικανότητάς τους, χωρίς να συνυπολογίζονται και οι δυσμενείς επιπτώσεις από πιθανές αλλαγές χρήσεων ή τροποποιήσεις του αρχικού δομικού συστήματος.

Η επιλογή της καταλληλότερης σύνθεσης του σχήματος ενίσχυσης μιας κατασκευής από άποψη αποτελεσματικότητας και κατασκευασιμότητας συνιστά ένα σύνθετο πρόβλημα, αφού κάθε τεχνική ενίσχυσης τροποποιεί με διαφορετικό τρόπο τη συμπεριφορά της κατασκευής, ενώ παράλληλα ενδέχεται να έχει επιπτώσεις στη λειτουργικότητα και/ή την αισθητική του κτιρίου.

Μία μέθοδος ενίσχυσης, η οποία έχει αρχίσει να αποκτά ενδιαφέρον, είναι η αξιοποίηση της εφεδρείας αντίστασης που προσφέρουν οι τοίχοι πλήρωσης των κτιρίων για τη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής μέσω της εφαρμογής τεχνικών βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών των τοιχοπληρώσεων (π.χ. Koutas et al. 2015a). Ωστόσο, η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων συνοδεύεται από δευτερογενείς επιβαρύνσεις των φερόντων μελών της κατασκευής, οι οποίες μπορούν να αποδειχθούν κρίσιμες.

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι επιπτώσεις λόγω της αλληλεπίδρασης των τοιχοπληρώσεων με τον φέροντα οργανισμό, μετά την ενίσχυσή τους, και η επιρροή τους στη θεμελίωση. Για το σκοπό αυτό γίνεται ανάλυση μιας διώροφης κατασκευής: α) με τον “γυμνό” φέροντα οργανισμό της, β) με τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων της πριν από την ενίσχυσή τους και γ) με τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων της μετά από την ενίσχυσή τους με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM). Στην τελευταία περίπτωση προκύπτουν απαιτήσεις διατμητικών ενισχύσεων στις δοκούς και τα υποστυλώματα που εμφατνώνουν τις τοιχοπληρώσεις σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017), ενώ προκύπτουν και αυξημένα φορτία θεμελίωσης. Οι λεπτομέρειες της εργασίας δίνονται από την Παυλοπούλου (2017).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Το υπό διερεύνηση κτίριο αφορά σε μία διώροφη οικοδομή που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε σε δύο φάσεις, τα έτη 1957 και 1959. Το κτίριο διαθέτει πλαισιωτό φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα και μελετήθηκε με τον Κανονισμό οπλισμένου σκυροδέματος του 1954, ενώ για τον πρώτο όροφο εφαρμόστηκαν κατασκευαστικές διατάξεις του αντισεισμικού κανονισμού του 1959. Το κτίριο εντάσσεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I και είναι θεμελιωμένο επιφανειακά, με μεμονωμένα πέδιλα, σε έδαφος κατηγορίας A. Τα

υλικά κατασκευής του φέροντος οργανισμού είναι σκυρόδεμα B120 και χάλυβας οπλισμού StI. Το κέλυφος της κατασκευής διαμορφώνεται από μπατικές οπτοπλινθοδομές και διαμερισματοποιείται εσωτερικά από δρομικές οπτοπλινθοδομές.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για το υπόψη κτίριο γίνονται στατικές μη-γραμμικές αναλύσεις (pushover) για: α) το “γυμνό” φέροντα οργανισμό, β) λαμβάνοντας υπόψη και τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων πριν από την ενίσχυσή τους και γ) με τη συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων μετά από την ενίσχυσή τους με ινοπλέγματα. Οι αναλύσεις γίνονται με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος SAP2000 με προσομοίωση των δοκών και των υποστυλωμάτων ως γραμμικών στοιχείων και των τοιχοπληρώσεων ως διαγωνίων αμφιαρθρωτών στοιχείων. Όλα τα κατακόρυφα στοιχεία θεωρείται ότι εδράζονται με συνθήκες πάκτωσης.

Οι καμπύλες ικανότητας υπολογίζονται για ιδιομορφική και για ομοιόμορφη κατανομή φορτίων, ενώ οι στοχευόμενες μετακινήσεις υπολογίζονται με τη μέθοδο των συντελεστών σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017). Πιθανές πλαστικές αρθρώσεις καμπτικής παραμόρφωσης θεωρούνται στα άκρα των δοκών και των υποστυλωμάτων, ενώ θέσεις πλαστικών αρθρώσεων αξονικής παραμόρφωσης θεωρούνται στα άκρα των διαγωνίων στοιχείων προσομοίωσης των τοιχοπληρώσεων. Οι ροπές διαρροής υπολογίζονται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017) για μονοαξονική κάμψη για τις δοκούς και για διαξονική κάμψη για τα υποστυλώματα, λαμβάνοντας υπόψη και τυχόν απαιτούμενη τροποποίηση του διαγράμματος $M-\theta$ λόγω πρόωρης διατμητικής αστοχίας. Ο υπολογισμός γίνεται για τα αξονικά φορτία του σεισμικού συνδυασμού δράσεων ($G+0.30Q$), επειδή η κατασκευή υπάγεται στα χθαμαλά κτίρια (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017).

Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος λαμβάνεται $f_{cm} = 10.80$ MPa με αντιπροσωπευτική τιμή $f_c = f_{cm} \cdot (1-0.15) = 9.20$ MPa, ενώ η μέση εφελκυστική αντοχή του χάλυβα οπλισμού λαμβάνεται $f_{ym} = 260$ MPa με αντιπροσωπευτική τιμή $f_y = 240$ MPa.

Για την προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων, οι αντιπροσωπευτικές τιμές της αντοχής σε λοξή θλίψη λαμβάνονται για μεν τις μπατικές τοιχοπληρώσεις $f_{wc,s} = 2.00$ MPa για δε τις δρομικές $f_{wc,s} = 1.50$ MPa. Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται $E_w = 1000f_{wc,s}$, η παραμόρφωση διαρροής $\varepsilon_y = 0.001$ και η παραμόρφωση θραύσης $\varepsilon_u = 0.002$. Στις παραπάνω τιμές των αντοχών γίνονται απομειώσεις λόγω ανοιγμάτων στα φατνώματα των τοιχοπληρώσεων και λόγω λυγηρότητας σύμφωνα με τα σχετικά διαγράμματα και τυπολόγια του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017), ενώ λαμβάνεται συντελεστής ασφάλειας του υλικού $\gamma_m = 1.50$.

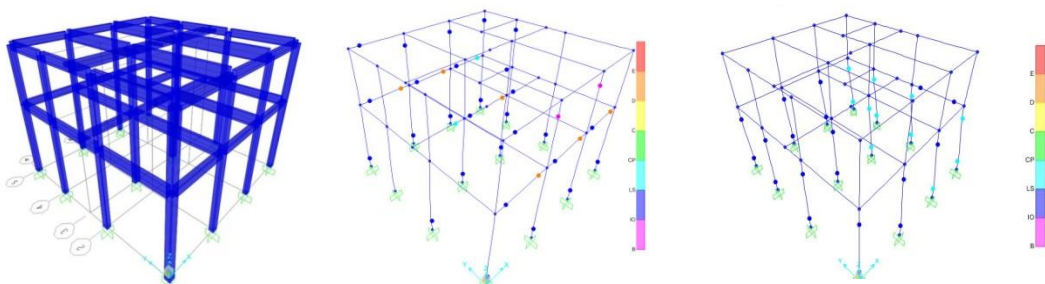
Οι έλεγχοι οπλισμένου σκυροδέματος γίνονται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (2004) και οι έλεγχοι της φέρουσας ικανότητας του εδάφους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7 (2004). Όλοι οι έλεγχοι των τοπικών φαινομένων που προκύπτουν

από την αλληλεπίδραση φέροντα οργανισμού – τοιχοπληρώσεων γίνονται με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017).

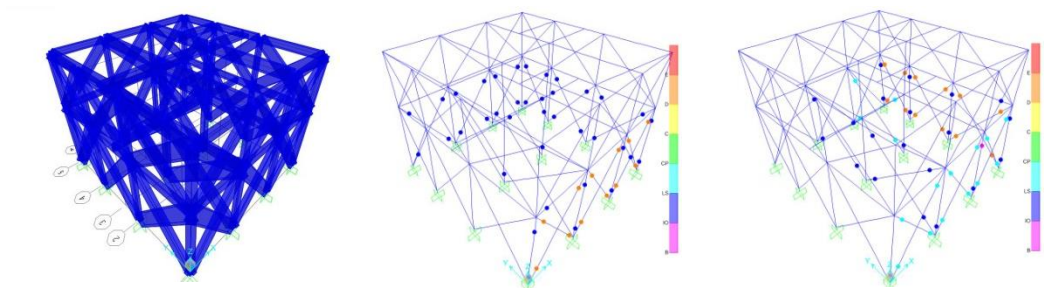
ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Αποτίμηση του “γυμνού” φέροντος οργανισμού

Η ανάλυση πραγματοποιείται με χωρικό προσομοίωμα (Σχήμα 1). Από την ανάλυση προέκυψε ανεπάρκεια της κατασκευής να εκπληρώσει τα κριτήρια υπαγωγής της στις κατηγορίες επιτελεστικότητας B1, Γ1 και B2 στη διεύθυνση X, όπως και στην κατηγορία B1 στη διεύθυνση Y, είτε λόγω αστοχίας μελών του φέροντος οργανισμού, είτε λόγω υπέρβασης του επιτρεπόμενου ορίου παραμόρφωσης αυτών.



Σχήμα 1. “Γυμνό” πλαίσιο: υπολογιστικό προσομοίωμα και παραμορφωμένος φορέας στόχου B1 για φόρτιση X+0.3Y και Y+0.3X.



Σχήμα 2. Τοιχοπληρωμένος φορέας: υπολογιστικό προσομοίωμα και παραμορφωμένος φορέας στόχου B1 για φόρτιση X+0.3Y και Y+0.3X.

Αποτίμηση κατασκευής με τη συμμετοχή των αρχικών τοιχοπληρώσεων

Η ανάλυση πραγματοποιείται με το χωρικό προσομοίωμα της προηγούμενης ανάλυσης στο οποίο προστίθενται τα στοιχεία των τοιχοπληρώσεων, τα οποία προσομοιώνονται με τη θεωρία του θλιπτήρα – ελκυστήρα μισής δυστένειας (Σχήμα 2). Από την ανάλυση προέκυψε ανεπάρκεια της κατασκευής να εκπληρώσει τα κριτήρια υπαγωγής της στις κατηγορίες επιτελεστικότητας B1

λόγω αστοχίας των θλιβόμενων διαγωνίων και στη B2 λόγω υπέρβασης του επιτρεπόμενου ορίου παραμόρφωσής τους τόσο στη X όσο και στην Y διεύθυνση.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Για την ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων υιοθετείται η μέθοδος της επένδυσής τους με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM) (π.χ. Koutas et al. 2015a,b). Συγκεκριμένα το σχήμα της ενίσχυσης περιλαμβάνει:

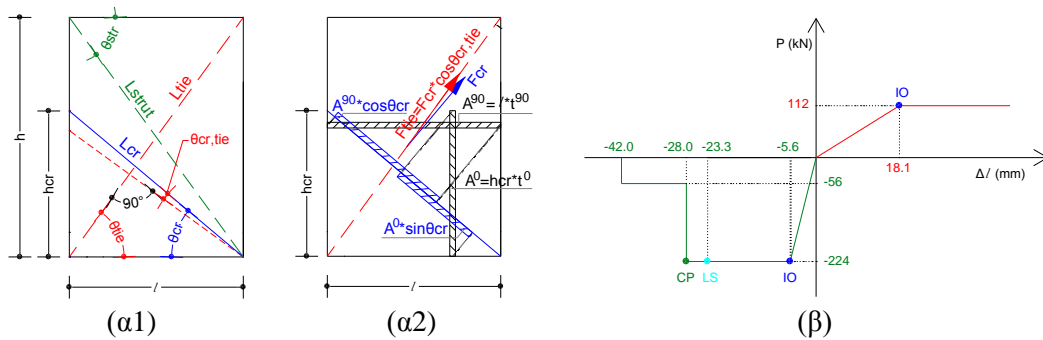
- Μία στρώση ενίσχυσης στην εξωτερική επιφάνεια των περιμετρικών φατνωμάτων του ισογείου, πλήρως αγκυρωμένης στα συνεπίπεδα μέλη του φέροντος οργανισμού που εμφανίζουν τις τοιχοπληρώσεις. Η στρώση αυτή θεωρείται ότι συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής και στη διατήρηση της συνοχής της τοιχοπλήρωσης.
- Μία στρώση ενίσχυσης στην εσωτερική επιφάνεια των περιμετρικών φατνωμάτων του ισογείου, μη αγκυρωμένης στα μέλη του φέροντος οργανισμού. Η στρώση αυτή θεωρείται ότι συμβάλλει στη διατήρηση της συνοχής της τοιχοπλήρωσης και εξασφαλίζει την ακεραιότητά της έναντι των εκτός επιπέδου δράσεων.
- Μειώσεις του εμβαδού των ανοιγμάτων σε δύο από τα έξι φατνώματα της κατασκευής στη μία εκ των κυρίων διευθύνσεών της (στη διεύθυνση X) και σε ένα εκ των έξι φατνωμάτων της στην άλλη διεύθυνση (στη διεύθυνση Y), για τα οποία το μέγεθος και η διάταξη των υφιστάμενων ανοιγμάτων ουσιαστικά μηδενίζει τις αντιστάσεις τους.

Ως υλικό ενίσχυσης λαμβάνεται υπόψη διαξονικό υαλόπλεγμα με μέτρο ελαστικότητας $E = 65.000 \text{ N/mm}^2$, παραμόρφωση θραύσης $\varepsilon_u = 4.3\%$ και ονομαστικό πάχος $t = 0.028 \text{ mm}$ σε κάθε κατεύθυνση. Η ενεργός παραμόρφωση του πλέγματος λαμβάνεται $\varepsilon_{eff} = 0.30\varepsilon_u$.

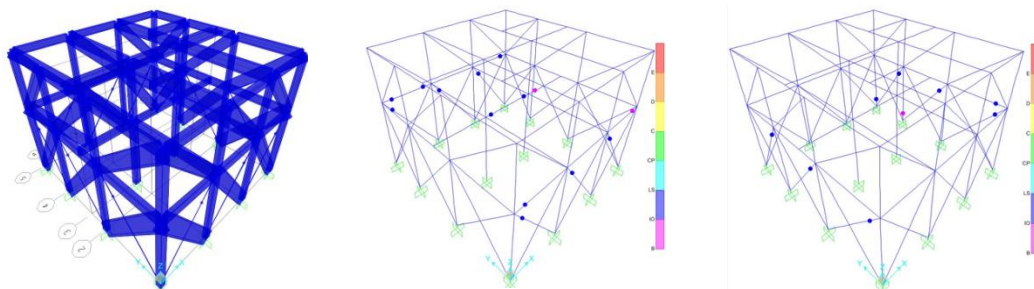
Η διατμητική ενίσχυση των φατνωμάτων αποδίδεται ως εφελκυστική αντοχή του ελκυστήρα του προσομοιώματος. Η δύναμη διαρροής του ελκυστήρα εκτιμάται από την ένταση που αναπτύσσεται στις ίνες που διαπερνούν μια πιθανή ρωγμή του φατνώματος στις δύο διευθύνσεις του πλέγματος, σύμφωνα με το Σχήμα 3α1 - 3α2. Η μετελαστική αξονική παραμόρφωση του ελκυστήρα θεωρείται πολύ μεγάλη. Το ενεργό μήκος του ελκυστήρα στο οποίο εκτείνεται η διασπορά της ρηγμάτωσης εκτιμάται στο 25% του μήκους του.

Η ανάλυση πραγματοποιείται με χωρικό προσομοίωμα (Σχήμα 4). Οι θλιπτήρες των ανοιγμάτων διατηρούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της προηγούμενης ανάλυσης με αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης στην τιμή $\varepsilon_u = 0.005$. Τόσο στους θλιπτήρες όσο και στους ελκυστήρες γίνονται απομειώσεις αντοχών λόγω ανοιγμάτων στα φατνώματα των τοιχοπληρώσεων. Η καμπύλη αντοχής του θλιπτήρα και του ελκυστήρα ενός ενδεικτικού ενισχυμένου πλήρους φατνώματος

φαίνεται στο Σχήμα 3β. Από την ανάλυση προέκυψε επάρκεια της κατασκευής να εκπληρώσει τα κριτήρια υπαγωγής της στην κατηγορία επιτελεστικότητας B1.



Σχήμα 3. (α1) Γεωμετρία ελκυστήρα (κόκκινη γραμμή) και πιθανής ρωγμής (μπλε γραμμή), (α2) Ενεργές διατομές πλέγματος που διαπερνούν οριζόντια και κατακόρυφα τη ρωγμή, εφελκυστική δύναμη κάθετα στη ρωγμή (μπλε) και προβολή της στον ελκυστήρα (κόκκινη), (β) Καμπύλη αντοχής ελκυστήρα (κόκκινη γραμμή) και θλιπτήρα (πράσινη γραμμή) ενός ενδεικτικού ενισχυμένου πλήρους φατώματος.



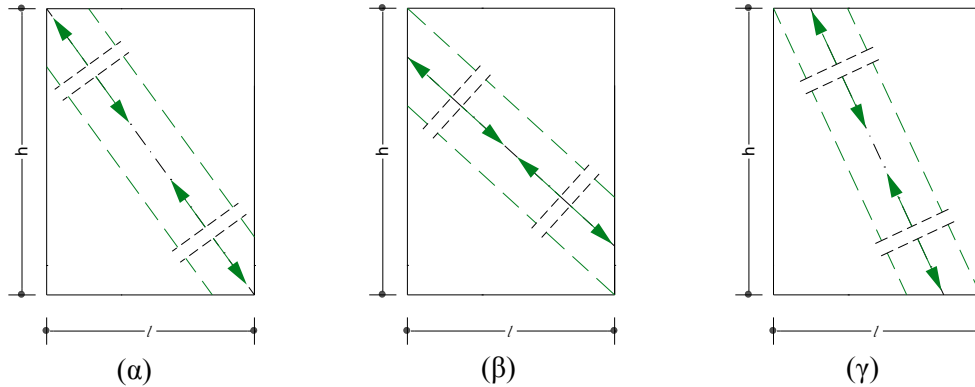
Σχήμα 4. Ενισχυμένος φορέας: υπολογιστικό προσομοίωμα και παραμορφωμένος φορέας στόχου B1 για φόρτιση X+0.3Y και Y+0.3X.

ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΩΝ ΤΟΥ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ

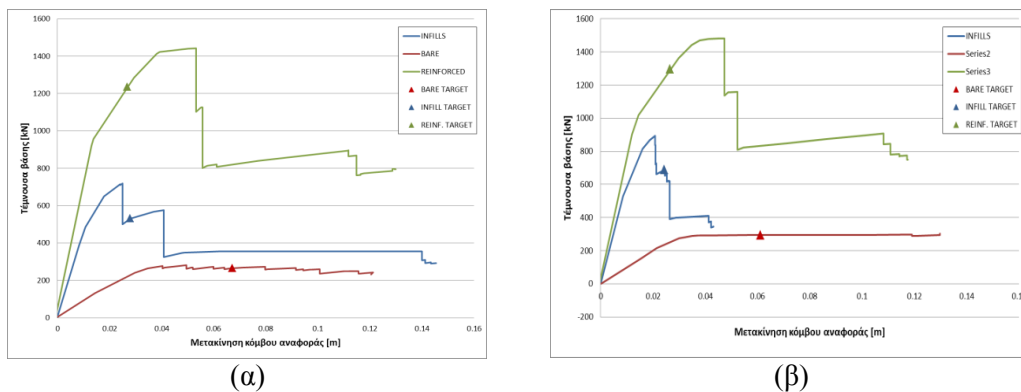
Λόγω των τοιχοπληρώσεων, τα μέλη του φέροντος οργανισμού που εμφανίζουν τις τοιχοπληρώσεις καταπονούνται διατμητικά από τις συγκεντρωμένες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά καθώς αλληλεπιδρούν με τις τοιχοπληρώσεις.

Το υπολογιστικό προσομοίωμα της τοιχοπλήρωσης δεν επιτρέπει την εκτίμηση αυτών των φαινομένων, καθώς οι αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις εφαρμόζονται απ'ευθείας στους κόμβους (Σχ. 5α). Ωστόσο στην πραγματικότητα η θλιβόμενη διαγώνιος σχηματίζεται σε διαφοροποιημένη θέση, αναλόγως των αποκολλήσεων που θα συμβούν, με ακραίες γεωμετρίες την ανάπτυξη των

διαγωνίων μεταξύ των υποστυλωμάτων (Σχ. 5β) ή μεταξύ των δοκών (Σχ. 5γ), επιβαρύνοντας διατμητικά τα αντίστοιχα μέλη.



Σχήμα 5. Ανάπτυξη διαγώνιων θλιπτικών δυνάμεων: (α) Θεωρητική ανάπτυξη θλιβόμενης διαγωνίου, (β) Ανάπτυξη θλιβόμενης διαγωνίου μεταξύ υποστυλωμάτων, (γ) Ανάπτυξη θλιβόμενης διαγωνίου μεταξύ δοκών.



Σχήμα 6. Καμπύλες αντίστασης “γυμνού” (με κόκκινο), τοιχοπληρωμένου (με μπλέ) και ενισχυμένου φορέα (με πράσινο). Η στοχευόμενη μετακίνηση αφορά τη στάθμη επιτελεστικότητας B1 για τη φόρτιση $X+0.3Y$ (α) και $Y+0.3X$ (β).

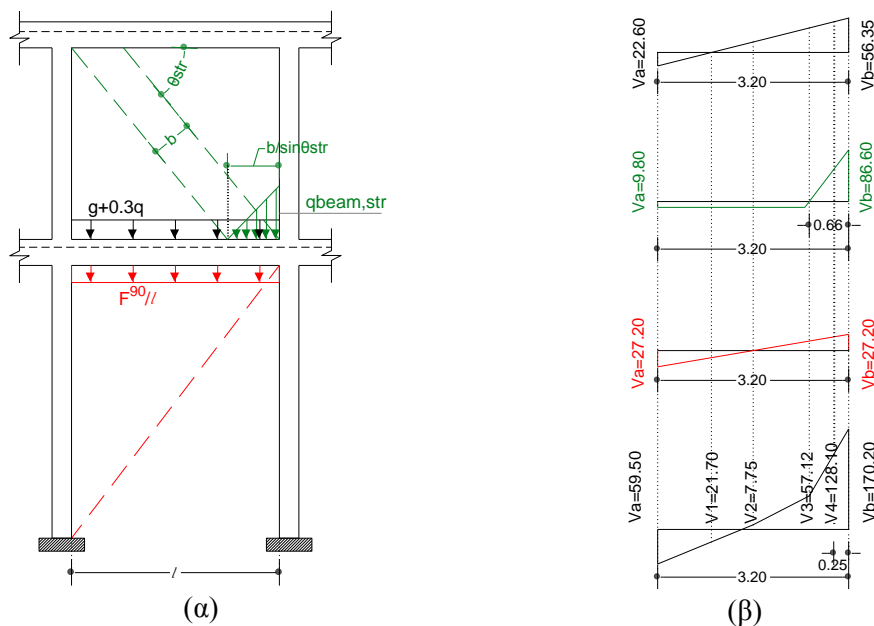
Στο Σχήμα 6 φαίνονται οι καμπύλες αντίστασης της κατασκευής για τις τρεις περιπτώσεις ανάλυσης. Από τις καμπύλες που αντιστοιχούν στον φορέα πριν την ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων (μπλέ χρώμα) γίνεται φανερό ότι, λόγω της αυξημένης διατμητικής αντοχής στην πρώιμη φάση της απόκρισης, όταν οι παραμορφώσεις είναι ακόμα μικρές και οι τοιχοπληρώσεις δεν έχουν αστοχήσει, προκαλούνται δυσμενείς τοπικές επιπτώσεις στα μέλη του φέροντος οργανισμού από την αλληλεπίδρασή τους με τις τοιχοπληρώσεις. Για το στάδιο αυτό ο Ευρωκώδικας 8 (2004) προβλέπει σχετικούς ελέγχους για τα υποστυλώματα, ενώ ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017) προβλέπει σχετικούς ελέγχους για δοκούς και

υποστυλώματα. Η αύξηση της αντοχής των φατνωμάτων, που αποτυπώνεται στην καμπύλη αντίστασης του ενισχυμένου φορέα (πράσινο χρώμα), επιτείνει το πρόβλημα.

Οι ενδεικτικοί διατμητικοί έλεγχοι μελών του φέροντος οργανισμού που ακολουθούν γίνονται από τα αποτελέσματα της ανελαστικής ανάλυσης του ενισχυμένου φορέα για το συνδυασμό των δράσεων του βήματος που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας B1.

Διατμητικός έλεγχος δοκών

Ο ενδεικτικός έλεγχος δοκού αφορά σε μία δοκό της οροφής ισογείου (Σχήμα 7α) και γίνεται για το άκρο εκείνο που επιβαρύνεται περισσότερο από τη σύγχρονη δράση των κατακόρυφων φορτίων του σεισμικού συνδυασμού ($G+0.30Q$) και την παραμόρφωσή της λόγω σεισμικής δράσης, τη δράση του θλιπτήρα του υπερκείμενου φατνώματος και την κατακόρυφη συνιστώσα της εφελκυστικής δύναμης που αναπτύσσεται στο πλέγμα της ενίσχυσης.



Σχήμα 7. Διατμητικός έλεγχος δοκού οροφής ισογείου: (α) Δράσεις επί της ελεγχόμενης δοκού, (β) επιμέρους και αθροιστικό διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων δοκού [τα χρώματα αντιστοιχούν στις δράσεις του Σχ. (α)].

Στο Σχήμα 7(β) φαίνονται το διάγραμμα τεμνουσών του σεισμικού συνδυασμού, το διάγραμμα τεμνουσών λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας της αξονικής δύναμης του θλιπτήρα, που μετατρέπεται σε ισοδύναμη τριγωνική κατανομή σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017), και το διάγραμμα τεμνουσών της

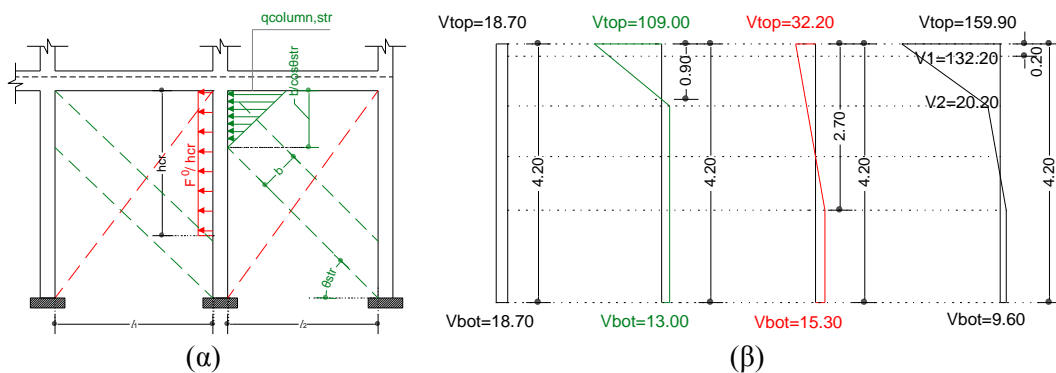
κατακόρυφης συνιστώσας της εφελκυστικής δύναμης του ελκυστήρα βάσει της ομοιόμορφης κατανομής της.

Η ελεγχόμενη δοκός έχει διατομή 20x40 cm και φέρει διατμητικό οπλισμό από ανοικτούς συνδετήρες $\varnothing 6/200$ mm. Από τους ελέγχους προκύπτει οριακά αποδεκτή υπέρβαση κατά 25% της αντοχής της δοκού σε διαγώνια θλίψη και μεγάλη ανεπάρκεια διατμητικού οπλισμού (απαιτούμενος/διαθέσιμος ≈ 6.5) για την οποία προτείνεται ενίσχυση με εφαρμογή ανθροκοϋφάσματος σε μία στρώση πάχους $t_j = 0.17$ mm, σε διάταξη τρίπλευρου μανδύα (μορφής U).

Διατμητικός έλεγχος υποστυλωμάτων

Ο ενδεικτικός έλεγχος υποστυλώματος αφορά σε ένα υποστύλωμα του ισογείου (Σχήμα 8α) και γίνεται για την κεφαλή του, που καταπονείται από την καμπτική του παραμόρφωση λόγω της σεισμικής δράσης και τις δράσεις του θλιπτήρα και του ελκυστήρα των παρακείμενων φατνωμάτων.

Στο Σχήμα 8β φαίνονται το διάγραμμα τεμνουσών από την καμπτική παραμόρφωση του υποστυλώματος, το διάγραμμα τεμνουσών λόγω της οριζόντιας συνιστώσας της αξονικής δύναμης του θλιπτήρα, που μετατρέπεται σε ισοδύναμη τριγωνική κατανομή σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017), και το διάγραμμα τεμνουσών της οριζόντιας συνιστώσας της εφελκυστικής δύναμης του ελκυστήρα βάσει της ομοιόμορφης κατανομής της.



Σχήμα 8. Διατμητικός έλεγχος υποστυλώματος ισογείου: (α) Δράσεις επί του ελεγχόμενου υποστυλώματος, (β) επιμέρους και αθροιστικό διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων υποστυλώματος [τα χρώματα αντιστοιχούν στις δράσεις του Σχ. (α)].

Το ελεγχόμενο υποστύλωμα έχει διατομή 30x25 cm και φέρει διατμητικό οπλισμό από κλειστούς συνδετήρες $\varnothing 6/250$ mm. Από τους ελέγχους προκύπτει ανεπάρκεια κατά 20% σε διαγώνια θλίψη και μεγάλη ανεπάρκεια διατμητικού οπλισμού (απαιτούμενος/διαθέσιμος ≈ 11). Ως εκ τούτου προτείνεται περίσφιγξη

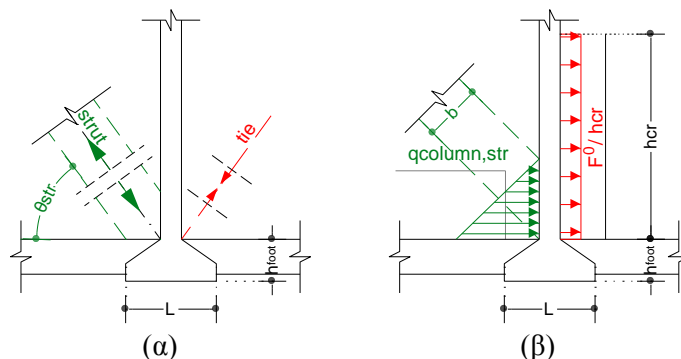
και διατμητική ενίσχυση του υποστυλώματος με εφαρμογή ανθροκουφάσματος με δύο στρώσεις, πάχους $t_j = 0.11 \text{ mm}$.

Έλεγχος θεμελίωσης

Η αυξημένη δυσκαμψία της τοιχοπληρωμένης κατασκευής, έναντι της δυσκαμψίας του πλαισιωτού φέροντος οργανισμού της, μειώνει δραστικά την περίοδο της κατασκευής, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερης σεισμικής επιτάχυνσης κατά την απόκριση. Ως εκ τούτου, η υφιστάμενη θεμελίωση καλείται να μεταφέρει στο έδαφος σημαντικά αυξημένα σεισμικά φορτία έναντι αυτών για τα οποία είχε μελετηθεί. Η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων επιτείνει το πρόβλημα. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 1 δίνεται η ελαστική ιδιοπερίοδος των τριών περιπτώσεων που μελετώνται και η τέμνουσα βάση που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας B1 σύμφωνα με τα αποτελέσματα της στατικής ανελαστικής ανάλυσης.

Πίνακας 1. Ελαστικές ιδιοπερίοδοι και τέμνουσες βάσης για στάθμη B1.

Στατικό σύστημα	Θεμελιώδης ελαστική ιδιοπερίοδος (sec)		Τένουσα βάση ανελαστικής ανάλυσης (kN)	
	$T_1(X)$	$T_2(Y)$	$F_b(X+0.3Y)$	$F_b(Y+0.3X)$
“Γυμνό” πλαίσιο	0.94	0.916	267	294
Τοιχοπληρωμένο πλαίσιο	0.461	0.393	531	689
Ενισχυμένο τοιχ. πλαίσιο	0.372	0.361	1204	1262
Αρχική μελέτη ($\varepsilon=0.02$)			123	123



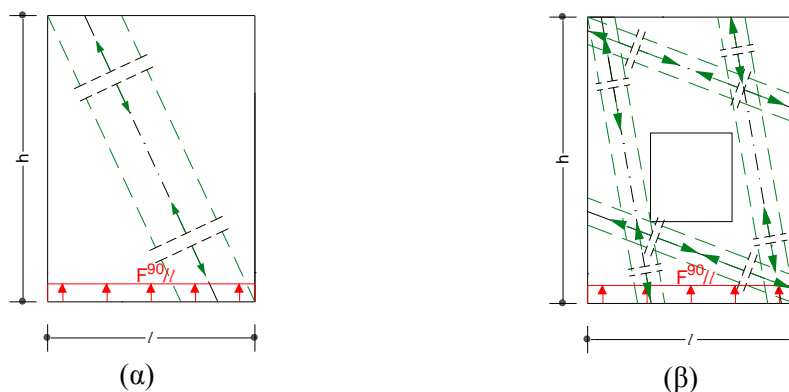
Σχήμα 9. Δράσεις επί των πεδύλων λόγω των τοιχοπληρώσεων: (α) αξονικές δυνάμεις θλιπτήρων-ελκυστήρων, (β) ισοδύναμα κατανεμημένα φορτία στην οριζόντια διεύθυνση.

Σε επίπεδο μελέτης, η θεμελίωση πρέπει να ελέγχεται για το συνδυασμό των δράσεων της καμπτικής παραμόρφωσης των υποστυλωμάτων και των αξονικών δυνάμεων των θλιπτήρων και των ελκυστήρων των τοιχοπληρώσεων, οι οποίες αναλύονται στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση (Σχήμα 9).

Σημειώνεται ότι η αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής λόγω των τοιχοπληρώσεων μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση των ακραίων πεδίων από το έδαφος, όχι μόνον επειδή αυξάνεται η ροπή ανατροπής λόγω της αύξησης των σεισμικών δυνάμεων, αλλά και επειδή η κατασκευή τείνει να συμπεριφερθεί ως στερεό σώμα.

Επάρκεια θεμελίωσης τοιχοπληρώσεων

Οι τοιχοπληρώσεις του κατώτατου ορόφου των κατασκευών πρέπει να διαθέτουν στοιχεία θεμελίωσης ικανά να εξασφαλίσουν την ακλόνητη έδραση των λοξών θλιπτήρων όπως και την αγκύρωση των ινοπλεγμάτων της ενίσχυσης (Σχήμα 10α). Το αντικείμενο αφορά και τα πλήρη φάτνωμα, αλλά πολύ περισσότερο εκείνα που διαθέτουν ανοίγματα, οπότε η γεωμετρία των σχηματιζόμενων θλιβόμενων διαγωνίων είναι γενικά πολύπλοκη (Σχήμα 10β).



Σχήμα 10. Δράσεις επί της θεμελίωσης των τοιχοπληρώσεων: (α) πλήρες φάτνωμα, (β) φάτνωμα με άνοιγμα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων υφιστάμενων κατασκευών αποτελεί μία ελκυστική μέθοδο για τη βελτίωση της ικανότητάς τους να παραλαμβάνουν σεισμικά φορτία. Για την διώροφη κατασκευή που μελετήθηκε, η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων της με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα επιτρέπει τη συμμόρφωσή της με τους στόχους της κατηγορίας επιτελεστικότητας Β1.

Ωστόσο, τα μέλη του φέροντος οργανισμού του ενισχυμένου κτιρίου υφίστανται σημαντική διατμητική επιβάρυνση και μπορεί να παρουσιάσουν σχετικές ανεπάρκειες, λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τις τοιχοπληρώσεις. Για την άρση των ανεπαρκειών απαιτούνται διατμητικές ενισχύσεις, π.χ. με ινοπλισμένα πολυμερή, στις δοκούς και στα υποστυλώματα. Η έκταση των

δευτερογενών εργασιών καθαίρεσης και ανακατασκευής των τοιχοπληρώσεων που απαιτούνται για την υλοποίηση των διατμητικών ενισχύσεων, ενδέχεται να περιορίζει την ευκολία εφαρμογής της μεθόδου ενίσχυσης.

Από την αύξηση της αντίστασης της κατασκευής και τη συνακόλουθη μείωση των ιδιοπεριόδων γενικώς προκύπτει αύξηση της τέμνουσας βάσης και της ροπής ανατροπής, με πιθανό αποτέλεσμα να μην επαρκεί η υφιστάμενη θεμελίωση, ενώ υπάρχει και κίνδυνος πλήρους αποκόλλησης των ακραίων πεδύλων.

Η τυχόν ανεπάρκεια της υφιστάμενης θεμελίωσης μπορεί να αρθεί με την κατασκευή μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα, απαιτώντας περαιτέρω αύξηση των απαιτούμενων δευτερογενών εργασιών για την υλοποίησή τους. Σε περίπτωση αποκόλλησης πεδύλων, απαιτείται επίλυση με ανελαστική έδραση των υποστυλωμάτων, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ανακατανομή της έντασης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Koutas, L., Triantafyllou, T. C. and Bousias, S. N. (2015a). “Analytical Modeling of Masonry-Infilled RC Frames Retrofitted with Textile Reinforced Mortar”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 19(5), 04014082.

Koutas, L., Bousias, S. N. and Triantafyllou, T. C. (2015b). “Seismic Strengthening of Masonry Infilled RC Frames with TRM: Experimental Study”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 19(2), 04014048-1.

Μεταπτυχιακές εργασίες

Παυλοπούλου, Ε. (2017) «Διερεύνηση αποτελεσματικότητας και εφικτότητας ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων με τοιχοπληρώσεις οπλισμένες με σύνθετα υλικά» Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Πρότυπα (standards)

Ευρωκώδικας 2 (2004) Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα, Μέρος 1-1. Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια. Brussels.

Ευρωκώδικας 7 (2004) Γεωτεχνικός σχεδιασμός, Μέρος 1. Γενικοί κανόνες. Brussels.

Ευρωκώδικας 8 (2004) Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Μέρος 1. Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια. Brussels.

ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017) Κανονισμός Επεμβάσεων, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, 2η Αναθεώρηση, ΦΕΚ2984/30.08.2017.