

Ανελαστική Απόκριση Τοιχοπληρωμένων Κτιρίων Ω.Σ. με Ανοίγματα

Inelastic Response of Infilled Frame RC Structures With Openings

Άλκης ΦΩΤΟΣ¹, Φίλιππος ΦΩΣΚΟΛΟΣ¹, Κωνσταντίνος Χ. ΡΕΠΑΠΗΣ²,
Παναγιώτης Γ. ΑΣΤΕΡΗΣ¹

Λέξεις κλειδιά: Ανελαστική ανάλυση (inelastic analysis), τοιχοπληρώσεις (infill walls), κτίρια ωπλισμένου σκυροδέματος (RC buildings), σεισμική απόκριση (seismic response)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρά την ευρέως αναγνωρισμένη επιρροή των τοιχοπληρώσεων, καθώς αυξάνουν σημαντικά την πλευρική δυσκαμψία μιας κατασκευής αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό των κατασκευών. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής των τοιχοπληρώσεων με ανοίγματα στην συμπεριφορά πλαισίων Ω.Σ. υπό πλευρική φόρτιση. Πραγματοποιούνται ανελαστικές στατικές αναλύσεις σε τοιχοπληρωμένα πλαίσια Ω.Σ., υπολογίζεται η αντοχή και οι ανελαστικές παραμορφώσεις, σε τοπικό και ολικό επίπεδο και εκτιμάται η υπεραντοχή και η πλαστιμότητα των κτιρίων. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι η υπεραντοχή και η πλαστιμότητα των τοιχοπληρωμένων κτιρίων ενδέχεται να είναι μεγαλύτερη από τις τιμές που λαμβάνονται κατά τον σχεδιασμό. Η παρουσία των τοιχοπληρώσεων αυξάνει σημαντικά την δυσκαμψία των κατασκευών και την αντίστασή σε πλευρικά φορτία. Ωστόσο μια μη κανονική κατανομή καθ' ύψος, όπως η περίπτωση της πιλοτής, μειώνει σημαντικά την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής.

ABSTRACT: It is well known that masonry infill walls, although non-engineered and considered as non-structural, may provide most of the earthquake resistance. The objective of this study is to investigate the effect of masonry infill walls with openings on the performance of reinforced concrete frames under lateral loads. Specifically, this study is concerned with the evaluation of inelastic parameters of masonry infilled reinforced concrete buildings. Buildings with various heights are

¹ Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής, Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής & Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, email: fotos.alkis@gmail.com ; fil.foskolos@civil.aspete.gr ; panagiotisasteris@gmail.com

² Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ., email: crepapis@puas.gr

selected. Inelastic pushover analyses are performed and local and global strength and inelastic deformation characteristics are evaluated. The results from nonlinear pushover analyses indicate that the overstrength and ductility of RC buildings can be higher than the values considered in the design. The presence of infill walls increases considerably the stiffness of the structures and their global resistance to lateral loads. However, the irregular distribution of infills (soft storey – case of pilotis) significantly reduces the capacity of the structure.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι οι τοιχοπληρώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως στις πλαισιακές κατασκευές, αυτές δεν θεωρούνται φέροντα δομικά στοιχεία και δεν λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών. Η αβεβαιότητα των χαρακτηριστικών τους, και η αβεβαιότητα της αλληλεπίδρασης τους με το περιβάλλον πλαίσιο καθώς και οι ασυνέχειες που συνήθως παρουσιάζουν για αρχιτεκτονικούς λόγους, καθιστούν δύσκολη την συνεκτίμησή τους στην ανάληψη σεισμικών φορτίων κατά τον σχεδιασμό. Ωστόσο, η επιρροή τους στην σεισμική συμπεριφορά μιας κατασκευής είναι πολύ σημαντική και ευρέως αναγνωρισμένη. Οι τοιχοπληρώσεις αυξάνουν σημαντικά κυρίως την πλευρική δυσκαμψία μιας κατασκευής και μπορεί να βελτιώσουν σημαντικά την σεισμική συμπεριφορά αδύναμων κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος. Αντίθετα όμως, μία μη κανονική κατανομή των τοιχοπληρώσεων μπορεί να έχει δυσμενή επιρροή στην σεισμική απόκριση της κατασκευής.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του περιβάλλοντος πλαισίου και των τοιχοπληρώσεων είναι μια ιδιαίτερα σύνθετη και περίπλοκη διαδικασία και μάλιστα είναι γνωστό ότι κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος οι τοιχοπληρώσεις ενδέχεται να αποκολληθούν μερικώς από το περιβάλλον πλαίσιο, παραμένοντας σε επαφή μόνο στις δύο απέναντι γωνίες του φατνώματος. Έτσι αναπτύσσεται μηχανισμός θλιβόμενης διαγωνίου ανάμεσα στις γωνίες που βρίσκονται σε επαφή με το πλαίσιο, όπως φαίνεται και από μεγάλο αριθμό πειραματικών (Polyakou 1960, Mehrabi 1966, Smith 1966, Smith and Carter 1969, Klingner, and Bertero 1978, Buonopane, and White 1999, Dolšek and Fajfar 2002, Cavaleri et al. 2005, Karayannis et al. 2005, Santhi and Knigh 2005, Καραγιάννης και Κακαλέτσης 2006, Κακαλέτσης κ.α. 2006, Καρύδης κ.α. 2008, Kakaletsis and Karayannis 2009, Zonkić et al. 2012, Cavaleri and Trapani 2014, Vintzileou et al. 2017) και αναλυτικών εργασιών (Chrysostomou 1991, Dolšek and Fajfar 2001, 2008a, 2008b, Chrysostomou et al. 2002, Asteris 2003, 2005, 2008, Moghaddam 2004, Vintzileou et al. 2004, Μάνος κ.α. 2006, Συρμακέζης κ.α. 2006, Repapis et al. 2006, Kakaletsis and Karayannis 2008, Νταβλιάκος και Στυλιανίδης 2009, Τσίκας και Δρίτσος 2009, Κακαλέτσης και Καραγιάννης 2009, Kakaletsis 2009, Cavaleri and Papia 2014, Cavaleri and Trapani 2015, Campione et al. 2014, Drougkas et al. 2016a, 2016b, Kritikos et al. 2017). Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλοί τρόποι προσομοίωσης των τοιχοπληρώσεων, όπως διαγώνιοι ισοδύναμοι θλιπτήρες ή πεπερασμένα στοιχεία (Moghaddam and Dowling 1987, Papia et al. 2003, Asteris et al. 2011, 2013, Mohyeddin et al. 2017, Chrysostomou and Asteris 2012), όμως συνήθως δεν

συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα εξαιτίας των αβεβαιοτήτων που προαναφέρθηκαν.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επιρροή των τοιχοπληρώσεων με ανοίγματα στην συμπεριφορά πλαισίων ωπλισμένου σκυροδέματος υπό πλευρική φόρτιση μέσω ανελαστικών στατικών αναλύσεων. Ειδικότερα, διερευνάται η επιρροή του αριθμού των ορόφων, η κατανομή των τοιχοπληρώσεων, η αντοχή τους και το ποσοστό των ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Πλαίσια και παράμετροι τοιχοπληρώσεων

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η σεισμική απόκριση τοιχοπληρωμένων κτιρίων ωπλισμένου σκυροδέματος. Εξετάζονται κτίρια με 2, 4, 6, 8, 10 και 12 ορόφους. Το ύψος των ορόφων είναι σταθερό και ίσο με 3.0 m σε όλες τις περιπτώσεις. Όλα τα κτίρια έχουν 4 ανοίγματα μήκους 6.0 m. Στην εγκάρσια διεύθυνση το μήκος των ανοιγμάτων είναι ίσο με 5.0 m.

Για να διερευνηθεί η επιρροή των τοιχοπληρώσεων εξετάζονται τόσο μη τοιχοπληρωμένες κατασκευές όσο και πλήρως ή μερικώς τοιχοπληρωμένες, με ή χωρίς ανοίγματα. Η τοιχοποιία είναι μπατική, καλής ποιότητας, με πάχος 0.25 m και θλιπτική αντοχή ίση με 3.0 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας είναι 3.0 GPa. Εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις ανοιγμάτων στην τοιχοποιία, τοίχοι χωρίς ανοίγματα (0% ανοίγματα), τοίχοι με μικρά και μεγάλα ανοίγματα (25% και 50% ανοίγματα) και γυμνά πλαίσια (100% ανοίγματα). Οι τοιχοπληρώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλα τα ανοίγματα των πλαισίων. Επιπλέον, εξετάζεται η περίπτωση της πιλοτής για τοιχοποιίες με τις παραπάνω περιπτώσεις ανοιγμάτων.

Συνολικά αναλύθηκαν 42 διαφορετικές περιπτώσεις τοιχοπληρωμένων πλαισίων Ω.Σ. με σκοπό να διερευνηθεί η επιρροή αρκετών παραμέτρων στην σεισμική απόκριση τοιχοπληρωμένων πλαίσιακών κατασκευών.

Σχεδιασμός κατασκευών

Τα πλαίσια σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες με ιδιομορφική φασματική μέθοδο ανάλυσης, χρησιμοποιώντας το λογισμικό FESPA (LH Λογισμική, 2013). Ειδικότερα, τα πλαίσια σχεδιάστηκαν για σεισμική ζώνη Z1 ($a_{gR} = 0.16$ g), κατηγορία σπουδαιότητας II, κατηγορία εδάφους B, κατηγορία μέσης πλαστιμότητας και δείκτη συμπεριφοράς ίσο με 3.45. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη ήταν σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και χάλυβας B500c.

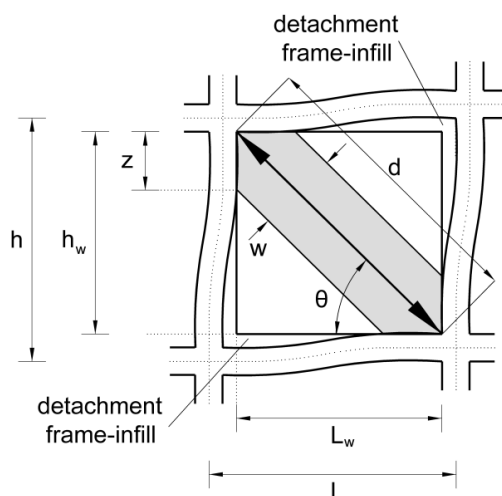
Τα φορτία είναι ίσα με 1.50 kN/m² επικάλυψη και 3.5 kN/m² κινητό. Η εσωτερική τοιχοποιία λαμβάνεται ως πρόσθετο φορτίο ομοιόμορφα κατανεμημένο στις πλάκες ίσο με 0.90 kN/m². Το φορτίο της μπατικής

τοιχοποιίας (ανά m^2 ύψους) είναι ίσο με $3.60kN/m^2$. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι πλάκες έχουν πάχος 15 cm. Οι δοκοί σε όλα τα πλαίσια έχουν διαστάσεις 250/600 mm. Τα υποστρώματα είναι τετραγωνικά. Ενδεικτικά, για το 10-όροφο κτίριο οι διαστάσεις των υποστρωμάτων κυμαίνονται από 65x65 [cm] στο ισόγειο έως 50x50 [cm] στην οροφή. Αντίστοιχα, για το 4-όροφο κτίριο οι διαστάσεις των υποστρωμάτων είναι 55x55 [cm] στους τρεις κατώτερους ορόφους και 50x50 [cm] στην οροφή. Σε όλα τα κτίρια, το ποσοστό του οπλισμού κυμαίνεται μεταξύ 1.1% έως 1.4% με τις περισσότερες περιπτώσεις να είναι μικρότερο από 1.15%.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Προσομοίωση τοιχοπληρώσεων

Οι τοιχοπληρώσεις προσομοιώνονται με διαγώνιους θλιπτήρες κατάλληλων γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών (Σχήμα 1). Στο Σχήμα 1, w είναι το πλάτος του διαγώνιου θλιπτήρα, d είναι το μήκος της διαγωνίου, L είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των υποστρωμάτων και z είναι το μήκος επαφής μεταξύ του διαγώνιου θλιπτήρα και του υποστρώματος.



Σχήμα 1. Γεωμετρικά στοιχεία τοιχοπλήρωσης και περιμετρικού πλαισίου Ω.Σ.

Οι Mainstone and Weeks (1970) και Mainstone (1974) βασιζόμενοι σε πειραματικά και αναλυτικά δεδομένα, πρότειναν την παρακάτω εμπειρική σχέση για τον προσδιορισμό του πλάτους του ισοδύναμου θλιπτήρα, η οποία στην συνέχεια ενσωματώθηκε από τους κανονισμούς FEMA-274 (1997) και FEMA-306 (1998):

$$\frac{w}{d} = 0.175\lambda_h^{-0.4} \quad (1)$$

όπου d είναι το μήκος του διαγώνιου θλιπτήρα της τοιχοποιίας και λ_h δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda_h = h \sqrt[4]{\frac{E_w t_w \sin 2\theta}{4 E I h_w}} \quad (2)$$

όπου E_w είναι το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοπλήρωσης, E το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και I η ροπή αδρανείας του υποστυλώματος, h_w το πάχος της τοιχοποιίας και του ισοδύναμου θλιπτήρα, h το ύψος της τοιχοποιίας, h το ύψος των υποστυλωμάτων από τα κέντρα των δοκών και θ η γωνία της οποίας η εφαπτομένη είναι ο λόγος του ύψους προς το μήκος της τοιχοπλήρωσης, η οποία είναι ίση με:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_w}{L_w} \right) \quad (3)$$

όπου L_w είναι το μήκος της τοιχοποιίας. Όλες οι παραπάνω παράμετροι φαίνονται στο Σχήμα 1.

Στην περίπτωση παρουσίας ανοιγμάτων στην τοιχοποιία, η δυσκαμψία των τοιχοπληρώσεων μπορεί να πολλαπλασιασθεί με τον παρακάτω μειωτικό συντελεστή λ , ο οποίος προτάθηκε από τον Asteris (2003) & Asteris et al. 2012.

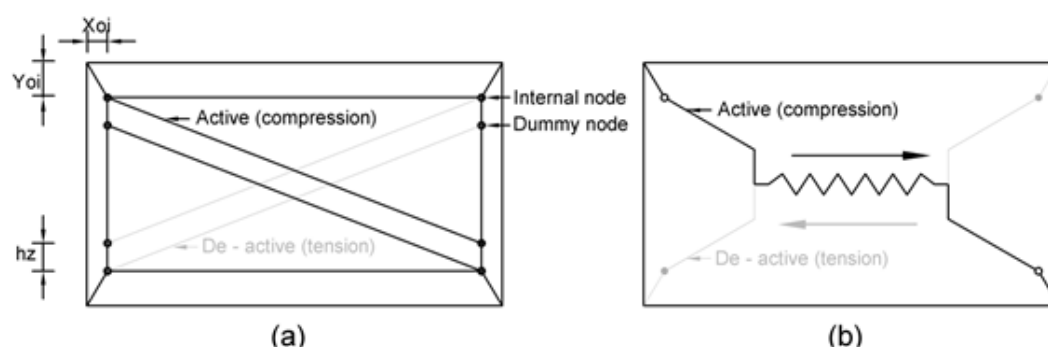
$$\lambda = 1 - 2 \alpha_w^{0.54} + \alpha_w^{1.14} \quad (4)$$

όπου α_w είναι το ποσοστό της επιφάνειας των ανοιγμάτων προς την επιφάνεια της τοιχοποιίας. Ο παραπάνω συντελεστής χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τον καθορισμό του πλάτους του ισοδύναμου διαγώνιου θλιπτήρα τοιχοπληρώσεων με ανοίγματα, πολλαπλασιάζοντας το πλάτος που προκύπτει από την Εξ. 1 με τον κατάλληλο συντελεστή λ .

Προσομοίωση πλαισίων Ω.Σ.

Όλα τα κτίρια προσομοιώθηκαν ως επίπεδα πλαίσια χρησιμοποιώντας το λογισμικό Seismostruct (2016). Η προσομοίωση των δοκών και των υποστυλωμάτων έγινε με χρήση στοιχείων συγκεντρωμένης πλαστικότητας στα άκρα τους. Το προσομοίωμα των Mander et al. (1988), το οποίο τροποποιήθηκε από τους Martinez-Rueda and Elnashai (1997) λαμβάνεται για το περισφιγμένο και απερίσφιγκτο σκυρόδεμα, ενώ το προσομοίωμα των Menegotto-Pinto (1973) χρησιμοποιείται για τον χάλυβα των οπλισμών. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος λήφθηκε ίση με 25 MPa και η τάση διαρροής του χάλυβα ίση με 500 MPa. Η μάζα η οποία λαμβάνεται υπόψη για την μη γραμμική ανάλυση ισούται με την μάζα από τα μόνιμα φορτία και το 30% των κινητών φορτίων.

Για την προσομοίωση της τοιχοπλήρωσης γίνεται χρήση του μαθηματικού μάκρο-προσομοιώματος των ισοδύναμων διαγώνιων θλιπτήρων το οποίο έχει προταθεί από τον Crisafulli (1997) για την προσομοίωση της μη γραμμικής απόκρισης τοιχοπληρώσεων. Κάθε προσομοίωμα αποτελείται από έξι μέλη. Η θλιπτική και διατμητική συμπεριφορά της τοιχοπλήρωσης υπολογίζεται χωριστά χρησιμοποιώντας δύο παράλληλες θλιβόμενες ράβδους καθώς και ένα διατμητικό ελατήριο σε κάθε διαγώνια διεύθυνση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Οι διαγώνιες ράβδοι λειτουργούν μόνο όταν βρίσκονται υπό θλίψη. Οι κατασταστικοί νόμοι για τους θλιπτήρες και το διατμητικό ελατήριο περιγράφονται από τον Crisafulli (1997).



Σχήμα 2. Στοιχείο τοιχοπλήρωσης προτεινόμενο από τον Crisafulli (1997). α) Θλιβόμενες/εφελκυόμενες διαγώνιες ράβδοι, β) διατμητικό ελατήριο.

Κριτήρια αστοχίας

Καθορίζονται τοπικά και γενικά κριτήρια αστοχίας, με σκοπό την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας, καθώς και της παραμορφωσιμότητας και της πλαστιμότητας των τοιχοπληρωμένων πλαισίων Ω.Σ. Στην παρούσα εργασία, έχει γίνει η παραδοχή ότι τοπική αστοχία συμβαίνει όταν αστοχήσει κάποιο υποστύλωμα, θεωρώντας ότι η αστοχία των δοκών δεν μπορεί να προκαλέσει ψαθυρού τύπου αστοχία ολόκληρης της κατασκευής. Τα παρακάτω κριτήρια υπολογίζονται για κάθε κατασκευή:

- 1) Μέγιστη πλαστική στροφή των κρίσιμων διατομών των δοκών και υποστυλωμάτων, σύμφωνα με τον EC8-3,
- 2) Αντοχή έναντι τέμνουσας μεμονωμένων μελών με ή χωρίς αξονικό φορτίο, σύμφωνα με τον EC8-3
- 3) Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας (αστοχία διαγωνίων θλιπτήρων)

Στοχευόμενη μετακίνηση

Η στοχευόμενη μετακίνηση υπολογίζεται σύμφωνα με την διαδικασία που προτείνει ο EC8 (2005) για τρεις στάθμες επιτελεστικότητας. Η ιδεατή πλήρως

ελαστοπλαστική σχέση δύναμης-μετακίνησης προσδιορίζεται ώστε οι επιφάνειες κάτω από την πραγματική και την ιδεατή καμπύλη δύναμης-μετακίνησης να είναι ίσες και η δύναμη διαρροής του ιδεατού συστήματος ισούται με την τέμνουσα βάση στην δημιουργία του πλαστικού μηχανισμού.

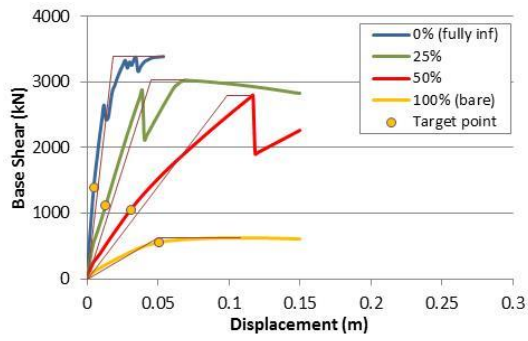
ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για κάθε πλαίσιο πραγματοποιούνται στατικές ανελαστικές αναλύσεις με δύο κατανομές πλευρικών φορτίων, ομοιόμορφη και τριγωνική. Οι καμπύλες ικανότητας των κατασκευών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3 έως 6. Σε κάθε καμπύλη ικανότητας παρουσιάζονται η ιδεατή καμπύλη και η στοχευόμενη μετακίνηση για στάθμη επιτελεστικότητας «Σημαντικές Βλάβες». Στην παρούσα εργασία η αστοχία θεωρείται όταν υπάρχει υπέρβαση σε ένα τουλάχιστον κριτήριο.

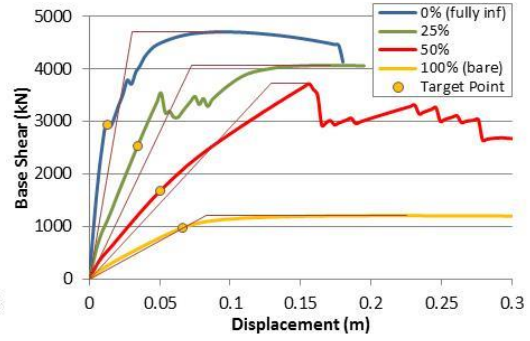
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας των πλαισίων με 2, 4, 6, 8, 10 και 12 ορόφους, για πλήρως τοιχοπληρωμένα πλαίσια (0% ποσοστό ανοίγματος), 25% και 50% ποσοστό ανοίγματος των τοιχοπληρώσεων και για τα γυμνά πλαίσια (100% ποσοστό ανοίγματος). Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τοιχοπληρώσεις επηρεάζουν σημαντικά την σεισμική απόκριση των πλαισίων. Για τα πλήρως τοιχοπληρωμένα πλαίσια, η δυσκαμψία αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το αντίστοιχο γυμνό πλαίσιο. Η αύξηση αυτή είναι μικρότερη για τα πλαίσια με 25% και 50% ποσοστό ανοιγμάτων. Για ποσοστά ανοίγματος μεγαλύτερα από 75-80% η επιρροή είναι αμελητέα, όπως έχει δειχθεί και σε προηγούμενες εργασίες (Asteris et al., 2015; 2016).

Η μετακίνηση οροφής και οι σχετικές μετακινήσεις των τοιχοπληρωμένων πλαισίων μειώνονται σε σχέση με τα γυμνά πλαίσια. Η στοχευόμενη μετακίνηση μειώνεται επίσης. Συνεπώς, τόσο η διατιθέμενη όσο και η απαιτούμενη πλαστιμότητα μειώνονται με την παρουσία τοιχοπληρώσεων. Η διατιθέμενη αντοχή των εξεταζομένων πλήρως τοιχοπληρωμένων πλαισίων αυξάνεται από 374% έως 417% σε σχέση με την αντοχή των γυμνών πλαισίων. Ωστόσο, μετά την αστοχία των τοιχοπληρώσεων, η αντοχή των πλαισίων μειώνεται.

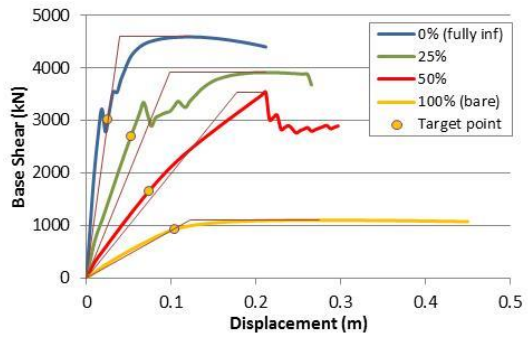
Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας των γυμνών και των πλήρως τοιχοπληρωμένων πλαισίων για διαφορετικό αριθμό ορόφων. Από το Σχήμα προκύπτει ότι πλαίσια με περισσότερους ορόφους έχουν μικρότερη αρχική δυσκαμψία και μεγαλύτερη στοχευόμενη μετακίνηση, τόσο για τα γυμνά όσο και τα τοιχοπληρωμένα πλαίσια. Στο Σχήμα 5 συγκρίνονται οι καμπύλες αντίστασης για ομοιόμορφη και τριγωνική κατανομή των πλευρικών δυνάμεων για το 6-όροφο γυμνό και πλήρως τοιχοπληρωμένο πλαίσιο. Από τις στατικές ανελαστικές αναλύσεις με ομοιόμορφη κατανομή πλευρικών φορτίων προκύπτει ότι η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής είναι μεγαλύτερη ενώ η στοχευόμενη μετακίνηση μικρότερη σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη από τις αναλύσεις με τριγωνική κατανομή πλευρικών φορτίων.



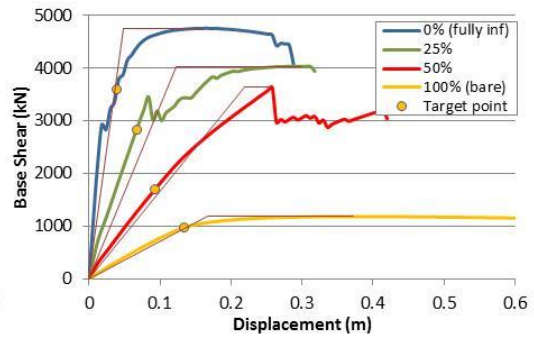
(α) 2-όροφο



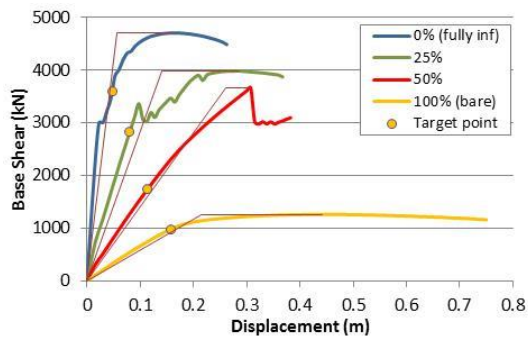
(β) 4-όροφο



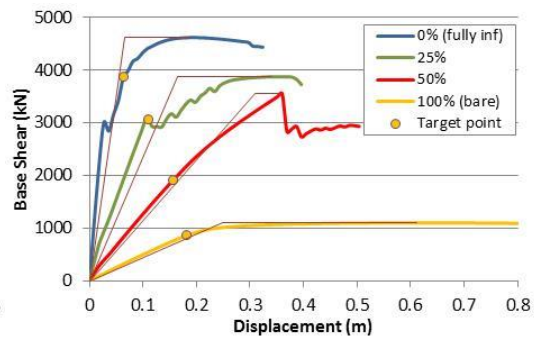
(γ) 6-όροφο



(δ) 8-όροφο

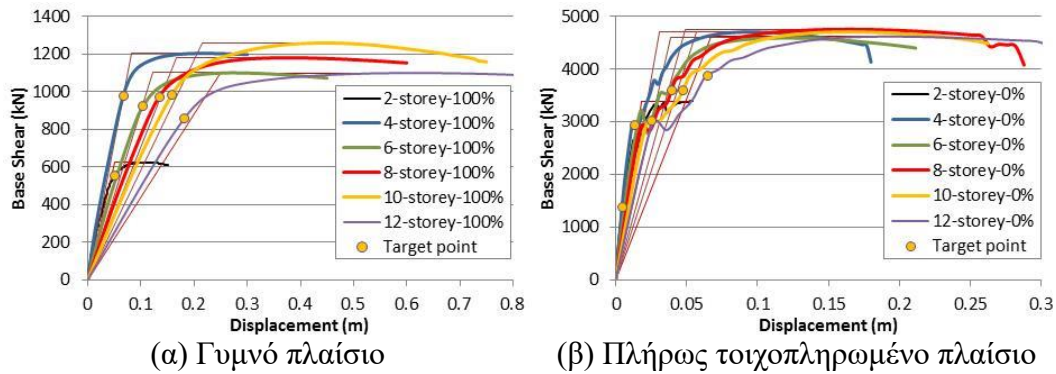


(ε) 10-όροφο

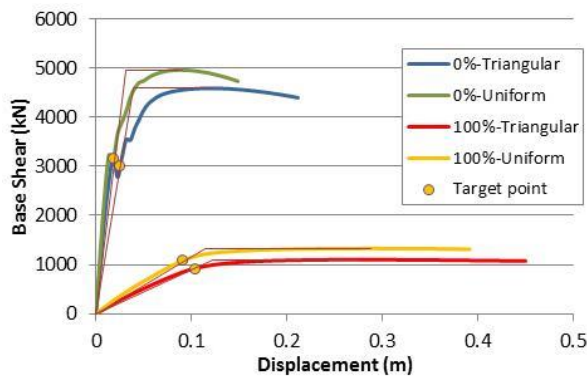


(στ) 12-όροφο

Σχήμα 3. Καμπύλες ικανότητας εξεταζόμενων πλαισίων.

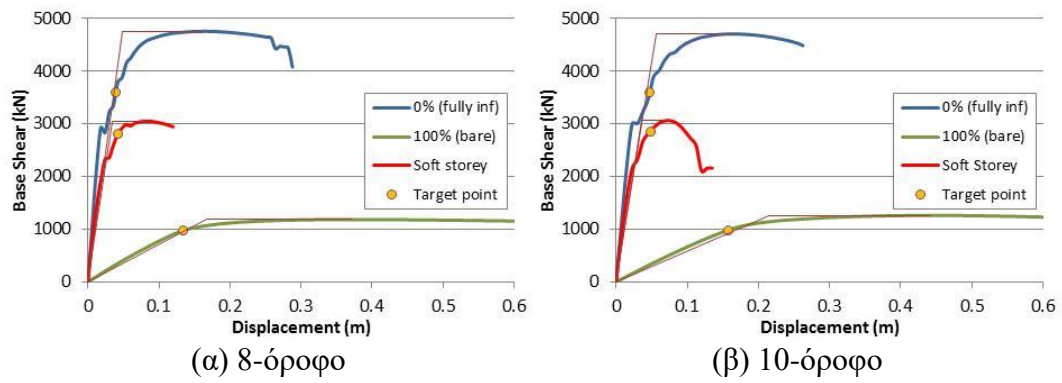


Σχήμα 4. Καμπύλες ικανότητας εξεταζομένων πλαισίων.

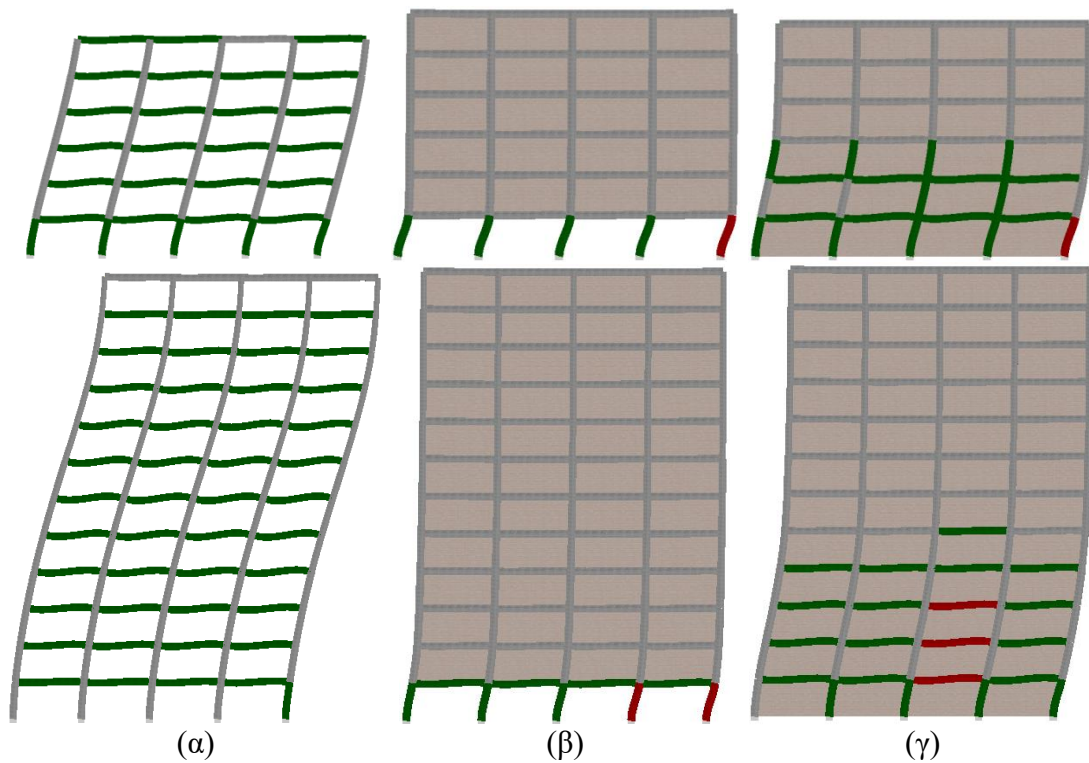


Σχήμα 5. Καμπύλες ικανότητας εξαώροφου γυμνού και πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου, για ομοιόμορφη και τριγωνική κατανομή πλευρικών φορτίων.

Οι καμπύλες ικανότητας του γυμνού πλαισίου, του πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου και του πλαισίου με πιλοτή συγκρίνονται στο Σχήμα 6 για το 8-όροφο και 10-όροφο πλαίσιο. Το παραμορφωμένο σχήμα των 6-όροφων και 12-όροφων πλαισίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Στο ίδιο Σχήμα, φαίνονται τα κριτήρια συμπεριφοράς για κάθε μέλος. Η διαρροή σημειώνεται με πράσινο, η καμπτική αστοχία (υπέρβαση μέγιστης πλαστικής στρώσης) με κόκκινο και η διατμητική αστοχία με μπλε. Στα πλαίσια με πιλοτή οι τοιχοποιίες δεν αστοχούν καθώς η ανελαστικότητα συγκεντρώνεται στα υποστυλώματα του ισογείου. Αντίθετα, οι τοιχοποιίες στους χαμηλότερους ορόφους των πλήρως τοιχοπληρωμένων πλαισίων παρουσιάζουν αστοχίες. Στα πλήρως τοιχοπληρωμένα πλαίσια τα οποία έχουν τοιχοποιίες κανονικά κατανομημένες, παρουσιάζονται μικρότερες μετακινήσεις, οι τοπικές απαιτήσεις είναι μικρότερες με αποτέλεσμα τα πλαίσια αυτά να συμπεριφέρονται με επιθυμητό τρόπο.



Σχήμα 6. Καμπύλες ικανότητας 8-όροφου και 10-όροφου γυμνού πλαισίου, πλαισίου με πιλοτή και πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου.



Σχήμα 7. Παραμορφωμένο σχήμα και κριτήρια επιτελεστικότητας 6-όροφων και 12-όροφων (α) γυμνών πλαισίων, (β) πλαισίων με πιλοτή και (γ) πλήρως τοιχοπληρωμένων πλαισίων. (πράσινο: διαρροή, κόκκινο: καμπτική αστοχία, μπλε: διατμητική αστοχία)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επιρροή των τοιχοπληρώσεων στην σεισμική απόκριση πλαισίων ωπλισμένου σκυροδέματος. Αρχικώς, σχεδιάζονται κτίρια με δύο έως δώδεκα ορόφους σύμφωνα με τον EC8 και στην συνέχεια πραγματοποιούνται ανελαστικές στατικές αναλύσεις σε γυμνά και τοιχοπληρωμένα κτίρια με διάφορα ποσοστά ανοιγμάτων της τοιχοποιίας. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Τα αποτελέσματα των ανελαστικών στατικών αναλύσεων επιβεβαιώνουν την σημαντική επιρροή των τοιχοπληρώσεων στην σεισμική απόκριση των κατασκευών. Συνεπώς, οι τοιχοπληρώσεις πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα.
2. Οι τοιχοπληρώσεις αυξάνουν σημαντικά την δυσκαμψία και την υπεραντοχή των κατασκευών, ωστόσο μειώνουν την πλαστιμότητά τους.
3. Μια μη κανονική κατανομή των τοιχοπληρώσεων ενδέχεται να έχει αρνητικά αποτελέσματα στην σεισμική απόκριση της κατασκευής, όπως π.χ. η πιλοτή, έχει ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση των βλαβών στο ισόγειο δημιουργώντας μηχανισμό μαλακού ορόφου. Μη κανονικές κατανομές των τοιχοπληρώσεων μειώνουν σημαντικά την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής, οπότε σ' αυτή την περίπτωση είναι επιβεβλημένο να συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα. Αντίθετα, κανονική κατανομή των τοιχοπληρώσεων σε μια κατασκευή συμβάλει στην μείωση της παραμόρφωσης και της απαιτούμενης πλαστιμότητας των μελών της κατασκευής, με αποτέλεσμα συνολικά η κατασκευή να παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά.
4. Καθώς το ποσοστό των ανοιγμάτων αυξάνεται, η δυσκαμψία και η υπεραντοχή του πλαισίου μειώνονται και η σεισμική συμπεριφορά πλησιάζει εκείνη του γυμνού πλαισίου. Για ποσοστά ανοιγμάτων μεγαλύτερα από 75% η επιρροή των τοιχοπληρώσεων είναι αμελητέα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Κακαλέτσης, Δ.Ι., Φαββατά, Μ.Ι. & Καραγιάννης, Χ.Γ., «Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση τοιχοπληρωμένων πλαισίων Ω/Σ με ανοίγματα», Πρακτικά 15^ο Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Αλεξανδρούπολη, (2006)
- Κακαλέτσης, Δ. και Καραγιάννης, Χ., «Συνεχές Προσομοίωμα Δύναμης- Παραμόρφωσης Τοιχοποιίας Πλήρωσης με Ανοίγματα», Πρακτικά 16^ο Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, (2009)
- Καραγιάννης, Χ. & Κακαλέτσης, Δ., «Πειραματική διερεύνηση τοιχοπληρωμένων πλαισίων Ω/Σ με κεντρικά ανοίγματα υπό κυκλική φόρτιση», Πρακτικά 15^ο Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, (2006)

- Καρύδης, Π., Μουζάκης, Χ. & Καραπίττα, Λ., «Πειραματική διερεύνηση τρόπων επέμβασης για την αντιμετώπιση του προβλήματος της πιλοτής σε υφιστάμενα κτίρια» Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα, (2008)
- Μάνος, Γ.Χ., Σούλης, Β.Ι. & Θαουάμπτα, Τ., «Αποτίμηση της αριθμητικής προσομοίωσης τοιχοπληρωμένων πλαισίων Ο/Σ υπό οριζόντιο ανακυκλιζόμενο φορτίο», Πρακτικά 15^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Αλεξανδρούπολη, (2006)
- Νταβλιάκος, Γ. & Στυλιανίδης, Κ., «Η συμβολή των τοιχοπληρώσεων στην αντίσταση διατηρητέου κτιρίου από Ο/Σ έναντι σεισμού», Πρακτικά 16ου Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, (2009)
- Συρμακέζης, Κ.Α., Αστερής, Π.Γ. & Αντωνόπουλος, Α.Κ., «Επιρροή των Τοιχοπληρώσεων στη Σεισμική Συμπεριφορά των Πλαισιωτών Δομικών Συστημάτων Ωπλισμένου Σκυροδέματος», Πρακτικά 15^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Αλεξανδρούπολη, (2006)
- Τσίκας, Π. & Δρίτσος, Σ., «Διερεύνηση του τρόπου προσομοίωσης τοιχοπληρωμένων πλαισίων με ανοίγματα, σε κατασκευές Ο.Σ.», Πρακτικά 16^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, (2009).
- Asteris, P.G., “Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames”. ASCE Journal of Structural Engineering, 129(8), (2003) 1071-1079
- Asteris, P.G., “Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames”. ASCE Journal of Structural Engineering, 131(3), (2005) 523-524
- Asteris, P.G., “Finite element micro-modeling of infilled frames”. Electronic Journal of Structural Engineering, 8 (8), (2008) 1-11
- Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S. & Chrysostomou, C.Z. “Mathematical macromodeling of infilled frames: State of the art”. ASCE Journal of Structural Engineering, 137 (12), (2011) 1508-1517
- Asteris, P.G., Giannopoulos, I.P., Chrysostomou, C.Z. “Modeling of Infilled Frames With Openings”. The Open Construction and Building Technology Journal, 6, (2012) 81-91
- Asteris, P.G., Cotsovos, D.M., Chrysostomou, C.Z., Mohebkhah, A. & Al-Chaar, G.K., “Mathematical micromodeling of infilled frames: State of the art”. Engineering Structures, 56, (2013) 1905-1921
- Asteris, P.G., Repapis, C.C., Tsaris, A.K., Di Trapani, F. & Cavaleri, L., “Parameters affecting the fundamental period of infilled RC frame structures”, Earthquakes and Structures, 9(5), (2015) 999-1028
- Asteris, P.G., Repapis, C.C., Repapi, E.V. & Cavaleri, L., “Fundamental period of infilled reinforced concrete frame structures”, Structure and Infrastructure Engineering, 1-13, (2016)
- Buonopane, S.G., & White, R.N., “Pseudodynamic testing of masonry infilled reinforced concrete frame”. Journal of Structural Engineering, ASCE, 125(6), (1999) 578-589
- Campione, G., Cavaleri, L., Macaluso, G., Amato, G. & Di Trapani, F., “Evaluation of infilled frames: an updated in-plane-stiffness macro-model considering the effects of vertical loads”. Bulletin of Earthquake Engineering, 13(8), (2014) 2265-2281

- Cavaleri, L. & Papia, M., “A new dynamic identification technique: application to the evaluation of the equivalent strut for infilled frames”. *Engineering Structures*, 25(7), (2003) 889–901
- Cavaleri, L., Fossetti, M. & Papia, M., “Infilled frames: developments in the evaluation of cyclic behaviour under lateral loads”. *Structural Engineering and Mechanics*, 21(4), (2005) 469-494
- Cavaleri, L. & Di Trapani, F., “Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modelling”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65, (2014) 224-242
- Cavaleri, L. & Papia, M., “An output-only stochastic parametric approach for the identification of linear and nonlinear structures under random base excitations: Advances and comparisons”. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 35, (2014) 11–21
- Cavaleri, L. & Di Trapani, F., “Prediction of the additional shear action on frame members due to infills”, *Bulletin of Earthquake Engineering*; 13(5), (2015) 1425–1454
- Chrysostomou, C.Z., “Effects of degrading infill walls on the nonlinear seismic response of two-dimensional steel frames”. Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York, (1991)
- Chrysostomou, C.Z., Gergely, P. & Abel, J.F., “A six-strut model for nonlinear dynamic analysis of steel infilled frames”. *International Journal of Structural Stability and Dynamic*, 2(3), (2003) 335-353
- Chrysostomou, C.Z., Asteris, P.G., “On the in-plane properties and capacities of infilled frames”. *Engineering Structures*, 41, (2012) 385-402
- Celarec, D., Ricci, P. & Dolšek, M. “The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry-infilled reinforced concrete frames”. *Engineering Structures*, 35, (2012) 165-177
- Crisafulli, F.J., “Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills”, Ph.D. Dissertation, University of Canterbury, New Zealand, (1997)
- Dolšek, M. & Fajfar, P., “Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames”. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(1), (2001) 1-12
- Dolšek, M. & Fajfar, P., “Mathematical modelling of an infilled RC frame structure based on the results of pseudo-dynamic tests”. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(6), (2002) 1215-1230
- Dolšek, M. & Fajfar, P., “The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame – a deterministic assessment”. *Engineering Structures*, 30(7), (2008) 1991-2001
- Dolšek, M. & Fajfar, P., “The effect of masonry infills on the seismic response of a four storey reinforced concrete frame – a probabilistic assessment”. *Engineering Structures*, 30(11), (2008) 3186-3192
- Drougkas, A., Adamis, C., Vintzileou, E., & Palieraki, V., “Numerical Analysis of the Out-of-Plane Response of Two New Systems for Masonry Infills”. *Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Brick and Block Masonry: Trends, Innovations and Challenges, IBMAC 2016, Padova, (2016) 1179-1184*
- Drougkas, A., Adamis, C., Vintzileou, E., & Palieraki, V., “Numerical analysis of a masonry infill (divided into smaller wallettes) under in-plane cyclic loading”.

- Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Brick and Block Masonry: Trends, Innovations and Challenges, IBMAC 2016, Padova, (2016) 1185-1190
- FEMA-274. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington (DC), Federal Emergency Management Agency, (1997)
- FEMA-306. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: basic procedures manual, Washington (DC), Federal Emergency Management Agency, (1998)
- Kakaletsis, D., “Analytical modeling of masonry infills with openings”. *Structural Engineering and Mechanics*, 31(4), (2009) 423-437
- Kakaletsis, D.J. & Karayannis, C.G., “Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading.” *Journal of Earthquake Engineering*, 12(2), (2008) 197-221
- Kakaletsis, D.J. & Karayannis, C.G. “Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings”. *ACI Structural Journal*, 106(2), (2009) 132-141
- Karayannis, C.G., Kakaletsis, D.J. & Favvata, M.J., “Behavior of bare and masonry infilled R/C frames under cyclic loading: Experiments and analysis”. *WIT Transactions on The Built Environment*, 81, (2005)
- Klingner, R.E. & Bertero, V.V., “Earthquake resistance of infilled frames”. *ASCE Journal of the Structural Division*, 104(6), (1978) 73–989
- Kritikos, A.I., Ntasis, G.D., Zitouniatis, D.G., Lemonis, M.E., Asteris, P.G., “Lateral response evaluation of steel frame structures with masonry infills”, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis eds., 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2017), Rhodes Island, Greece, June 15–17, (2017)
- LH Λογισμική. FESPA 10 for windows, v.5.4.0.100. Athens, Greece, (2013)
- Mainstone, R.J. & Weeks, G.A., “The influence of bounding frame on the racking stiffness and strength of brick walls”, in *Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference*, Building Research Establishment, Watford, England, 165-171, (1970)
- Mainstone, R.J., “Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames”. *Current Paper CP 13/74*, Building Research Station, Garston, Watford, U.K., (1974)
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. & Park, R., “Theoretical stress-strain model for confined concrete”. *ASCE Journal of structural engineering*; 114 (8), (1998) 1804–1826
- Martinez-Rueda, J.E. & Elnashai, A.S., “Confined concrete model under cyclic load”, *Materials and Structures*, 30 (3), (1997) 139-147
- Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M. & Noland, J., “Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames”. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 122(3), (1996) 228-237
- Menegotto, M. & Pinto, P.E., “Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending”, *Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined*

- Repeated Loads, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, 15-22, (1973)
- Moghaddam, H.A. & Dowling, P.J. "The State of the Art in Infilled Frames". ESEE Research Report No. 87-2, Imperial College of Science and Technology, Civil Engineering Department, London, U.K, (1987)
- Moghaddam, H.A., "Lateral load behavior of masonry infilled steel frames with repair and retrofit". ASCE Journal of Structural Engineering, 130 (1), (2004) 56-63
- Mohyeddin, A., Dorji, S., Gad, E.F. & Goldsworthy, H.M., "Inherent limitations and alternative to conventional equivalent strut models for masonry infill-frames". Engineering Structures, 141, (2017) 666–675
- Papia, M., Cavaleri, L. & Fossetti, M. "Infilled frames: developments in the evaluation of the stiffening effect of infills". Structural engineering and mechanics, 16(6), (2003) 675-93
- Polyakov, S.V. "On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loading in the plane of the wall". Translation in earthquake engineering, Earthquake Engineering Research Institute, San Francisco, (1960) 36-42
- Repapis, C., Zeris, C. & Vintzileou, E. "Evaluation of the Seismic Behaviour of Existing RC Buildings: II. A Case Study for Regular and Irregular Buildings". Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, 10(3), (2006) 429-452
- Santhi, M.H., Knight, G.M.S. & Muthumani, K., "Evaluation of seismic response of soft-storey infilled frames". Computers and Concrete, 2(6), (2005) 423-437
- SeismoSoft. SeismoStruct 2016 - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Seismosoft Ltd., Pavia, Italy.
<http://www.seismosoft.com> [09 February 2016]
- Smith, B.S., "Behavior of square infilled frames". ASCE Journal of the Structural Division, 92(ST1), (1966) 381-403
- Smith, B.S., & Carter, C., "A method of analysis for infilled frames". Institution of Civil Engineers, 44(1), (1969) 31-48
- Vintzileou, E., Adami, C.E., Palieraki, V., Mouzakis, Ch. & Karapitta, L., "Seismic behavior of a reinforced masonry infill made with an innovative new brick unit: Results of a shaking table test", Papadrakakis, M. & Fragiadakis, M., eds., 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2017), Rhodes Island, Greece, June 15–17, (2017)
- Vintzileou, E., Zeris, C. & Repapis, C., "Seismic Behaviour of Infilled Existing RC Buildings", ICCES'04 Symposium: Earthquake Structural Engineering, Madeira, Portugal, July (2004)
- Zovkić, J., Sigmund, V. & Guljaš, I., "Testing of R/C frames with masonry infill of various strength." Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, January (2012)