

**Διερεύνηση του τρόπου προσομοίωσης τοιχοπληρωμένων  
πλαϊσίων με ανοίγματα, σε κατασκευές Ο.Σ.**  
Investigation of the influence of wall partitioned openings in  
reinforced concrete frame structures

**Παναγιώτης ΤΣΙΚΑΣ<sup>1</sup>, Στέφανος ΔΡΙΤΣΟΣ<sup>2</sup>**

*Λέξεις κλειδιά: Τοιχοπληρωμένα πλαίσια, Τοιχοπληρώσεις, Ανοίγματα,  
Προσομοίωση*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα έρευνα σκοπεύει στον έλεγχο της αξιοπιστίας γνωστών προσομοιωμάτων θλιβομένης διαγωνίου που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του φαινόμενου τοιχοπληρώσεων με ή χωρίς ανοίγματα με ειδικότερη έμφαση στην επιρροή των πρόσθετων εντάσεων που εισάγονται στα δομικά μέλη του φέροντα οργανισμού. Επιπρόσθετα γίνονται αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα. Το σύνολο των αναλυτικών αποτελεσμάτων συγκρίνεται με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από έρευνες σε τοιχοπληρωμένα πλαίσια με ανοίγματα μορφής θυρών ή παραθύρων, μεταβλητού μεγέθους και θέσης ανοίγματος. Τέλος προτείνεται μια απλοποίηση της προσομοίωσης του φαινόμενου της τοιχοπλήρωσης στην οποία υπάρχουν ανοίγματα, με χρήση ενός μόνο θλιπτήρα.

**ABSTRACT:** The present research intends to assess the reliability of diagonal modeling used to simulate infill walls, with or without openings, in concrete frames. Additional action effects induced in frame elements are specifically considered. Finite element analyses results are used for comparison. All analytical results are compared with available experimental data from wall in filled frames with variably sized and placed door or window openings. Finally, a simplified simulation for infill walls with openings is proposed using only one compression diagonal.

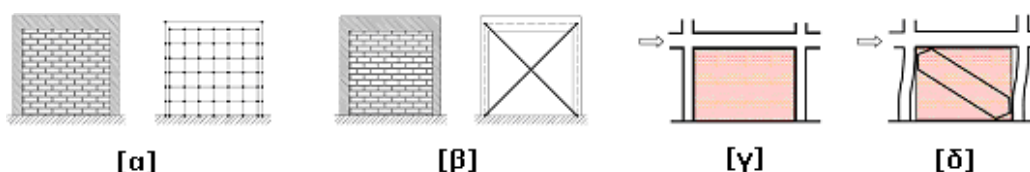
---

<sup>1</sup> Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιου Πατρών,

<sup>2</sup> Καθηγητής, Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιου Πατρών, 26500 Πάτρα,  
Τηλ.: 2610-997780, Fax: 2610-996575, email: [Dritsos@upatras.gr](mailto:Dritsos@upatras.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τοιχοπληρώσεις μπορούν να προσομοιώνονται είτε με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (**Σχήμα 1α**) είτε με χρήση γραμμικών στοιχείων (**Σχήμα 1β**).



**Σχήμα 1.** α) Προσομοίωση τοιχοποιίας με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. β) Προσομοίωση τοιχοποιίας με διαγώνια στοιχεία. γ) Συμπεριφορά τοιχοπληρωμένου πλαισίου για χαμηλά επίπεδα φόρτισης. δ) Συμπεριφορά τοιχοπληρωμένου πλαισίου για υψηλά επίπεδα φόρτισης.

Από πειράματα που έχουν γίνει σε τοιχοπληρωμένα πλαίσια (Klingner & Bertero, 1976, 1978) έχει παρατηρηθεί, ότι η αρχική εικόνα του πλήρους τοιχοπληρωμένου πλαισίου (**Σχήμα 1γ**) αλλάζει όσο αυξάνεται η οριζόντια δράση επί του πλαισίου. Σε υψηλά επίπεδα οριζόντιας δράσης η τοιχοπλήρωση αρχίζει να αποκολλάται από το πλαίσιο, στις δύο απέναντι γωνίες και ο μηχανισμός θλιβομένης διαγωνίου αναπτύσσεται ανάμεσα στις δυο γωνίες που βρίσκονται σε επαφή με το πλαίσιο (**Σχήμα 1δ**). Έτσι δικαιολογείται η προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων με γραμμικά διαγώνια θλιβόμενα στοιχεία (**Σχήμα 1β**). Στις περιπτώσεις συγχρόνων κτιρίων όπου η δόμηση περιμετρικών τοιχοπληρώσεων γίνεται με διπλούς δρομικούς τοίχους, η προσομοίωση θα μπορούσε να γίνει ξεχωριστά για καθ' έναν από τους δυο τοίχους.

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ

Η παρούσα ερευνά σκοπεύει στον έλεγχο της αξιοπιστίας γνωστών προσομοιωμάτων θλιβομένης διαγωνίου, που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων με ή χωρίς ανοίγματα. Εξετάζονται τα προσομοιώματα τοιχοπληρώσεων κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ., FEMA, Panagiotakos & Fardis (1994), και Mostafaei & Kabeyasawa (2004).

### Προσομοίωση τοιχοπληρώσεων κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και FEMA 356

Για την προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων, οι περιπτώσεις που προτείνονται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι η προσομοίωση με τη χρήση θλιβομένης διαγωνίου και η προσομοίωση με χρήση διατμητικού φατώματος.

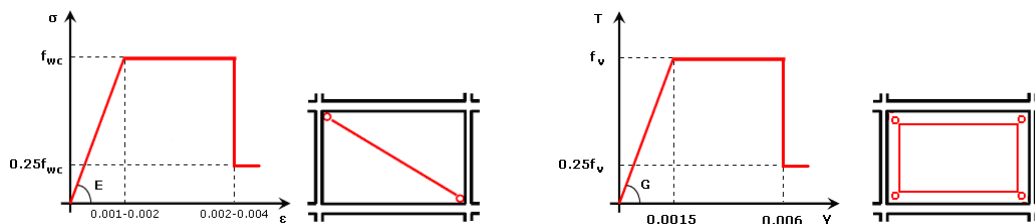
Στην περίπτωση της θλιβομένης διαγωνίου. Η τοιχοπλήρωση εξιδανικεύεται με ένα γραμμικό θλιβόμενο στοιχείο, η συμπεριφορά του οποίου καθορίζεται από ένα ελαστοπλαστικό διάγραμμα σ-ε (**Σχήμα 2α**). Το πάχος  $t$  της θλιβομένης

διαγωνίου λαμβάνεται ίσο με το συνολικό πάχος της τοιχοπλήρωσας. Το πλάτος  $b$  της θλιβομένης διαγωνίου κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ., θα εκτιμάται με βάση την ισοδυναμία και το συμβιβαστό παραμορφώσεων και δυνάμεων (τάσεων), όπου για μέσες τιμές υλικών κατά την ρηγμάτωση προκύπτει  $b \approx 0.15L$  ( $L$  μήκος θλιβομένης διαγωνίου). Η θλιπτική αντοχή του θλιπτήρα υπολογίζεται με βάση τον Ευρωκώδικα 6 και τον ΚΑΝ.ΕΠΕ (7.4.1.iii.)

Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της τοιχοπλήρωσης και με διατμητικό φάτνωμα (πέτασμα), η συμπεριφορά του οποίου καθορίζεται από ένα ελαστοπλαστικό διάγραμμα  $\tau$ - $\gamma$  (Σχήμα 2β). Η αντιστοίχιση δυστημσίας του φαντώματος ( $EA_p$ ) με την δυστένεια της θλιβομένης διαγωνίου φαντώματος δίδεται από την “Εξίσωση 1” όπου  $\alpha$  είναι η γωνία της θλιβομένης διαγωνίου.

$$EA_p = \frac{GA_\phi}{\cos^2 \alpha \sin \alpha} \quad (1)$$

Όταν η τοιχοπλήρωση προσομοιώνεται ως πέτασμα, απαιτείται κατάλληλη προσομοίωση. Το πάχος της θλιβομένης διαγωνίου λαμβάνεται ίσο με το συνολικό πάχος της τοιχοπλήρωσας.



Σχήμα 2. α) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων θλιβομένης διαγωνίου τοιχοπλήρωσης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. β) Διάγραμμα διατμητικών τάσεων-γωνιακών παραμορφώσεων τοιχοπλήρωσης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Σε τοιχοποιίες που δεν υπερβαίνουν το όριο λυγηρότητας (κατά FEMA 356), ώστε να αποκλειστεί ο πλευρικός λυγισμός, υπάρχουν δύο ενδεχόμενα εμφάνισης αστοχίας : η θλιπτική αστοχία, η οποία συνήθως εμφανίζεται στα άκρα του θλιπτήρα ( $V = \alpha t_{inf} f_m \cos \theta$ ) και η διατμητική ολίσθηση κυρίως κατά μήκος του πλέγματος των αρμών ( $V = f_{wv} t_{inf} l_{inf}$ ). Η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να αναλάβει η τοιχοπλήρωση δίνεται από τη Σχέση 2.

$$V_{m,max} = \min(\alpha t_{inf} f_m \cos \theta, f_{wv} t_{inf} l_{inf}) \quad (2)$$

Όπου  $f_m$  και  $f_{wv}$  είναι η θλιπτική αντοχή παράλληλα στους αρμούς και η διατμητική αντοχή της τοιχοπλήρωσης αντίστοιχα, το πάχος  $t_{inf}$  της θλιβομένης διαγωνίου λαμβάνεται ίσο με το συνολικό πάχος της τοιχοπλήρωσας,  $l_{inf}$  το μήκος της τοιχοπλήρωσης και  $\theta$  η γωνία της θλιβομένης διαγωνίου. Το πλάτος της θλιβομένης διαγωνίου  $a$  υπολογίζεται από τη Εξίσωση 3 (Later and

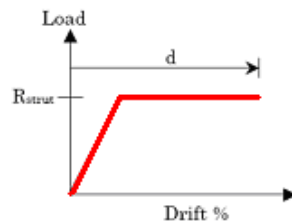
Mainstone, 1971) όπου  $r_{inf}$  και  $\lambda$  είναι το μήκος και η λυγηρότητα που υπολογίζεται από τις Εξισώσεις 4 και 5 αντίστοιχα.

$$a = 0.175(\lambda h_m)^{-0.4} r_{inf} \quad (3) \quad r_{inf} = \sqrt{l_m^2 + h_m^2} \quad (4) \quad \lambda = \left( \frac{E_m t_m \sin 2\theta}{4E_c I_c h_m} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$h_m$  : Ύψος τοιχοπλήρωσης  
 $l_m$  : Μήκος τοιχοποιίας  
 $t_m$  : Πάχος τοιχοποιίας  
 $d_m$  : Μήκος θλιπτήρα

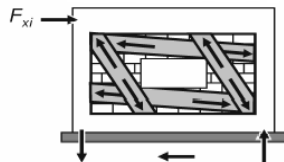
$I_c$  : Ροπή αδρανείας υποστρώματος  
 $E_m$  : Μέτρο ελαστικότητας θλιπτήρα  
 $G_m$  : Μέτρο διάτμησης τοιχοποιίας  
 $\theta$  : Γωνία θλιπτήρα

Για την προσομοίωση των θλιπτήρων κατά FEMA 356 χρησιμοποιείται διγραμμικό διάγραμμα, φορτίου - γωνιακής παραμόρφωσης ( $d$ ) (**Σχήμα 3**). Η  $d_{max}$  προσδιορίζεται από πίνακα της FEMA 356, με βάση το λόγο διατμητικής αντοχής του γυμνού πλαισίου προς της διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας και τον λόγος του μήκους της τοιχοποιίας προς το ύψος της.



**Σχήμα 3.** Μηχανική συμπεριφορά θλιβομένης διαγωνίου κατά FEMA 356

Στην περίπτωση που οι τοιχοπληρώσεις διαθέτουν ανοίγματα και έχει επιλεγεί η προσομοίωση μέσω θλιβομένων γραμμικών στοιχείων ελέγχεται το κατά πόσον η διάταξη των ανοιγμάτων επιτρέπει τη διαμόρφωση λοξών θλιβομένων διαγωνίων και η προσομοίωση προσαρμόζεται κατάλληλα (**Σχήμα 4**). Όμως δεν υπάρχει επαρκής θεωρητική ερευνά και πειραματικά δεδομένα για τον τρόπο τοποθέτησης πολλαπλών θλιπτήρων και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του θλιπτήρα. Έτσι η χρήση αυτής της προσέγγισης απαιτεί ξεχωριστή εξέταση της κάθε περίπτωσης. Ελλείψει λεπτομερέστερης διερευνήσεως, μπορούν να λαμβάνονται υπ' όψη οι αλοποιήσεις που προτείνονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (7.4.1.iv)

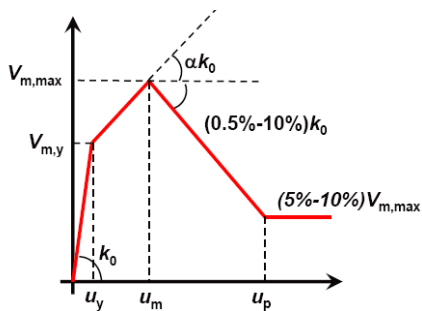


**Σχήμα 4.** Προσομοίωση ανοίγματος τοιχοποιίας (FEMA 356, ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

### Προσομοιώματα Panagiotakos & Fardis (1994) και Mostafaei & Kabeyasawa (2004)

Το πάχος  $t$  της θλιβομένης διαγωνίου λαμβάνεται ίσο με το συνολικό πάχος της τοιχοπληρώσεως. Το πλάτος  $a$  του θλιβομένου στοιχείου υπολογίζεται κατά Later, Mainstone (1971) FEMA 356, “Εξίσωση 3”.

Η μηχανική συμπεριφορά του διαγωνίου θλιπτήρα περιγράφεται από το διάγραμμα του **Σχήματος 5** κατά Panagiotakos & Fardis (1994) και από το διάγραμμα του **Σχήματος 6** κατά Mostafaei & Kabeyasawa (2004).



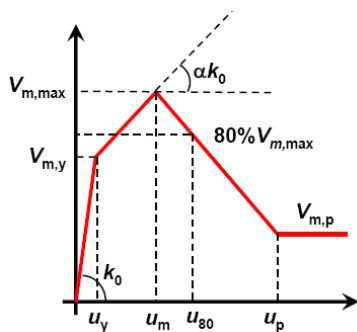
$$V_{m,y} = f_{wvk} t_m l_m, k_0 = \frac{G_m t_m l_m}{h_m}$$

$f_{wvk}$ : Διατμητική τάση τοιχοπλήρωσης  
 $G_m$ : Μέτρο διάτμησης τοιχοπλήρωσης

$$a k_0 = \frac{E_m t_m a}{r_{inf}} \cos^2 \theta$$

$$V_{m,max} = 1.30 V_{m,y}$$

**Σχήμα 5.** Μηχανική συμπεριφορά θλιβομένης διαγωνίου κατά Panagiotakos & Fardis (1994)



$$u_m = \frac{\varepsilon_m r_{inf}}{\cos \theta}, \theta = \arctan\left(\frac{h_w}{l_m}\right)$$

$\varepsilon_m$ : Θλιπτική παραμόρφωση θλιπτήρα (1.8‰)

$$k_0 = 2 \frac{V_{m,max}}{u_m}, (V_{m,max} = 1.33 V_{m,y})$$

$$a = 0.20 \Rightarrow V_{m,y} = \frac{V_{m,max} - a k_0 u_m}{1 - a} = 0.75 V_{m,max}$$

$$u_y = 0.375 u_m, u_p = 3.5(0.1h - u_m), V_{m,p} = 0.30 V_m$$

**Σχήμα 6.** Μηχανική συμπεριφορά θλιβομένης διαγωνίου κατά Mostafaei & Kabeyasawa (2004)

Η διατμητική δύναμη της τοιχοποιίας (Mostafaei & Kabeyasawa 2004) είναι η ελάχιστη από την τέμνουσα που προκαλεί διατμητική ολίσθηση και την τέμνουσα που οδηγεί σε θλιπτική αστοχία των θλιπτήρα, όπως στο προσομοίωμα κατά FEMA 356 (Σχέση 2).

Χαρακτηριστικά στοιχεία στα προσομοιώματα είναι ότι μετά τη διαρροή τα προσομοίωμα εμφανίζουν κράτυνση (περίπου 20%) και μετά την οριακή

μετατόπιση φθίνοντα κλάδο. Η οριακή μετατόπιση (για συνήθη πλαίσια) κατά Mostafaei & Kabeyasawa (2004) αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση του θλιπτήρα 1.8‰, ενώ η διαρροή του θλιπτήρα γίνεται σε αξονική παραμόρφωση 0.675‰. Η οριακή μετατόπιση (για συνήθη πλαίσια) κατά Panagiotakos & Fardis (1994) αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση του θλιπτήρα 1.75‰, ενώ η διαρροή του θλιπτήρα γίνεται σε αξονική παραμόρφωση 0.70‰. Η παραμένουσα αντοχή κατά Mostafaei & Kabeyasawa (2004) είναι το 30% της μέγιστης τιμής ενώ κατά Panagiotakos & Fardis (1994) κυμαίνεται από 5%-10%. Τα προσομοιώματα των Mostafaei & Kabeyasawa (2004) και Panagiotakos & Fardis (1994) παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες.

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΗΣ

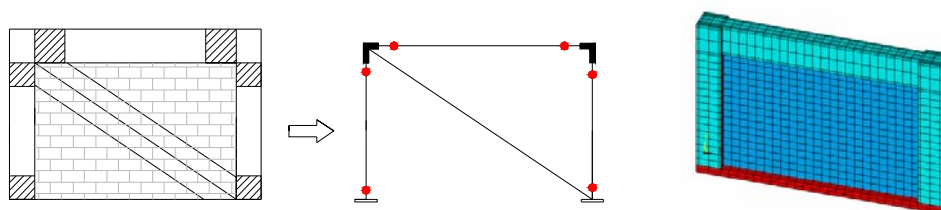
### Πειραματικά δεδομένα

Για τον έλεγχο του βαθμού αξιοπιστίας των προηγούμενων προσομοιωμάτων γίνονται αναλύσεις σε μια σειρά από τοιχοπληρωμένα πλαίσια (με ή χωρίς ανοίγματα) για τα οποία διατίθενται πειραματικά αποτελέσματα (Καραγιάννης Χ. και Κακαλέτσης Δ. 2006, Kakaletsis D. and Karayannis C. 2007, Κακαλέτσης Δ. 2007)

Τα πλαίσια έχουν μήκος 1.50m και ύψος 1.00m, τα υποστυλώματα είναι 0.15x0.15m με οπλισμένο 8Φ5.6 ενώ η δοκός είναι 0.10x0.20m με οπλισμό 7Φ5.6. Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι 24.65MPa. Ο διαμήκης χάλυβας οπλισμού έχει όριο διαρροής  $f_y=390.47$  MPa και η κράτυνση του είναι 2.2%.

### Προσομοίωση τοιχοπληρωμένων πλαισίων

Τα τοιχοπληρωμένα πλαίσια επιλύονται με χρήση διαγωνίων στοιχείων (Σχήμα 7α) σύμφωνα με τα προσομοιώματα που έχουν παρουσιαστεί προηγούμενος για την επίλυση τους χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ανελαστικής ανάλυσης DRAIN-2DX. Αλλά και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 7β) όπου για την ανάλυση τους χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ANSYS.



Σχήμα 7. α) Προσομοίωση τοιχοπληρωμένου πλαισίου με γραμμικά στοιχεία β) Προσομοίωση τοιχοπληρωμένου πλαισίου με πεπερασμένα στοιχεία

### **Προσομοίωση τοιχοπληρωμένων πλαισίων με χρήση διαγωνίων στοιχείων**

Για τη προσομοίωση των δοκών και των υποστυλωμάτων χρησιμοποιείται το στοιχείο 15 του προγράμματος DRAIN-2DX. Πρόκειται για ένα απλό μη ελαστικό στοιχείο για την προσομοίωση δοκών-υποστυλωμάτων, το οποίο προσεγγίζει την έννοια της κατανεμημένης ανελαστικότητας (ή πλαστικότητας) κατά μήκος του στοιχείου που προσομοιώνεται. Κάθε στοιχείο προσομοίωσης διαιρείται σε τμήματα, κάθε ένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από τη συμπεριφορά της διατομής στο μέσο του τμήματος (διατομή ελέγχου). Κάθε διατομή διαιρείται σε έναν αριθμό ινών. Οι ίνες έχουν μη γραμμικές κατά μήκος σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης. Για τη διατομή οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται ξεχωριστές ίνες για το σκυρόδεμα και για το χάλυβα. Για τις ίνες σκυροδέματος χρησιμοποιείται το προσομοίωμα τάσεων-παραμορφώσεων με φθίνοντα κλάδο που έχει προταθεί από τους Park and Paulay (1975), ενώ για τις ίνες χάλυβα σχήμα ένα διγραμμικό διάγραμμα με μέτρο ελαστικότητας  $E=200\text{GPa}$  και κράτυνση 2.2%. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η τοιχοπλήρωση που φέρει άνοιγμα προσομοιώνεται με τη μέθοδο της θλιβομένης διαγωνίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το στοιχείο 9 του προγράμματος DRAIN-2DX. Πρόκειται για ένα απλό μη ελαστικό ραβδωτό στοιχείο που λειτουργεί μόνο σε αξονική δύναμη. Το στοιχείο έχει μη γραμμική κατά μήκος σχέση δύναμης-παραμόρφωσης, που θεωρείται ανάλογα με το προσομοίωμα που αναλύεται κάθε φορά.

### **Προσομοίωση τοιχοπληρωμένων πλαισίων με πεπερασμένα στοιχεία**

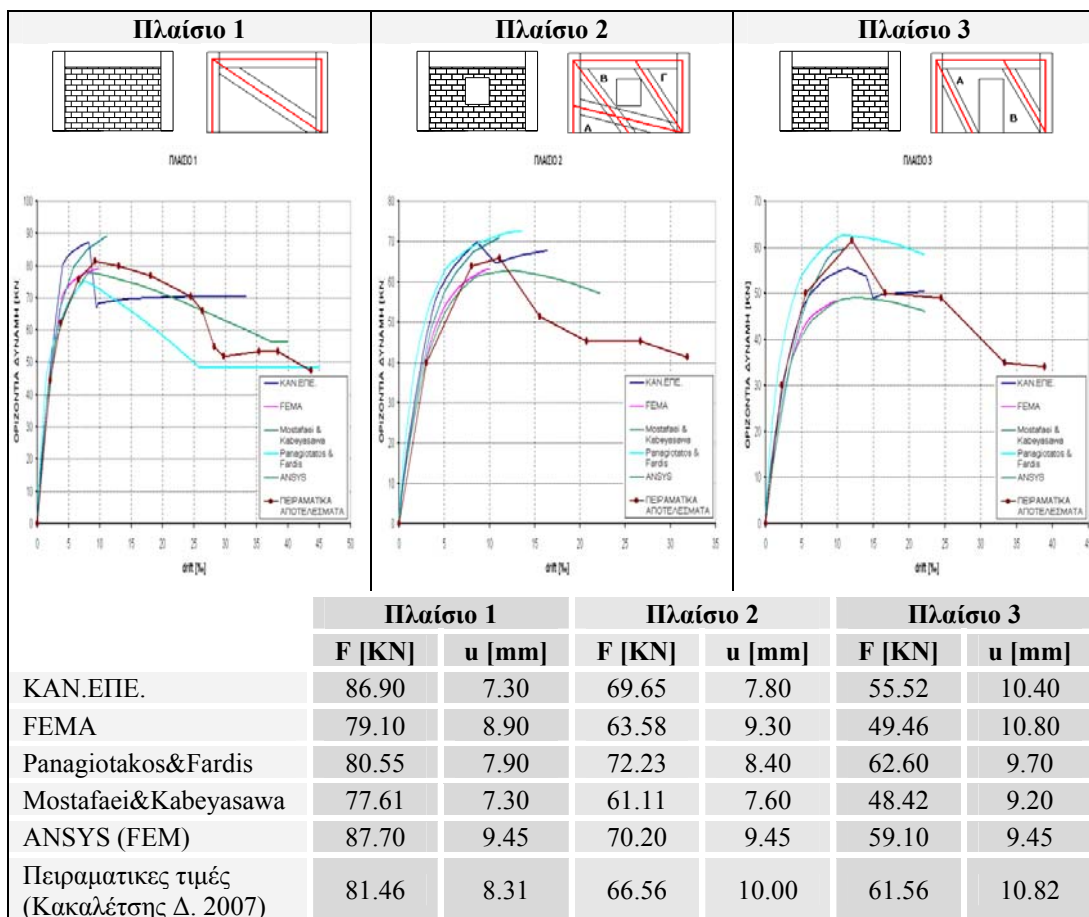
Για τη κατασκευή του τρισδιάστατου προσομοιώματος χρησιμοποιείται το στοιχείο σκυροδέματος (SOLID) Concrete 65 του προγράμματος ANSYS. Πρόκειται για ένα στοιχείο 8 κόμβων με 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση τρισδιάστατης γεωμετρίας σκυροδέματος με ή χωρίς οπλισμό. Το στοιχείο Concrete 65 παρέχει μέσω του αντίστοιχου μη γραμμικού, ανελαστικού νόμου συμπεριφοράς υλικού με το οποίο αντιστοιχίζεται, τη δυνατότητα προσομοίωσης της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος λόγω εφελκυσμού και της συντριβής του λόγω σύνθλιψης (cracking & crushing capabilities). Η προσομοίωση του οπλισμού εισάγεται διακριτά με τη μορφή εσωτερικών ραβδών (με τη μορφή στοιχείων links) από χάλυβα (discrete reinforcement). Εξαιτίας της δυνατότητας προσομοίωσης ψαθυρής αστοχίας, το στοιχείο σκυροδέματος (SOLID) Concrete 65 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα υλικά παρόμοιας συμπεριφοράς σε εφελκυσμό όπως τοιχοποιία. Η διεπιφάνεια μεταξύ πλαισίου σκυροδέματος και τοιχοπλήρωσης προσομοιώνεται με Contact Pair (ζεύγος επαφής).

### **Διαδικασία φόρτισης**

Η διαδικασία φόρτισης ακολουθεί την αντίστοιχη πειραματική και είναι η εξής: αφού πακτωθούν τα υποστυλώματα στο κάτω άκρο τους εφαρμόζεται σε κάθε υποστυλώμα σταθερή αξονική δύναμη 50KN ( $\nu=0.1$ ). Ακολούθως επιβάλλεται οριζόντια μετακίνηση στο άνω άκρο του πλαισίου, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται σε κάθε βήμα (Pushover)

### Αποτελέσματα ανάλυσης τοιχοπληρωμένων πλαισίων

Στη συνέχεια (Σχήμα 8) παρουσιάζονται αποτελέσματα από 3 επιλεγμένα πλαίσια. Ένα πλήρως τοιχοπληρωμένο, ένα με άνοιγμα παραθύρου στο μέσο της τοιχοπλήρωσης και το τρίτο με άνοιγμα μορφής πόρτας. Παρουσιάζεται ο τρόπος προσομοιώσεις των πλαισίων. Δίνονται συγκριτικά διαγράμματα οριζόντιας δύναμης – γωνιακής παραμόρφωσης, και πινακοποιούνται οι τιμές που προκύπτουν για την οριζόντια δύναμη αστοχίας και την αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση για όλα τα πλαίσια που έχουν αναλυθεί σύμφωνα με τα προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της τοιχοπλήρωσης (ΚΑΝΕΠΕ, FEMA, Panagiotakos & Fardis, 1994 και Mostafaei & Kabeyasawa, 2004) αλλά και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ANSYS (FEM).



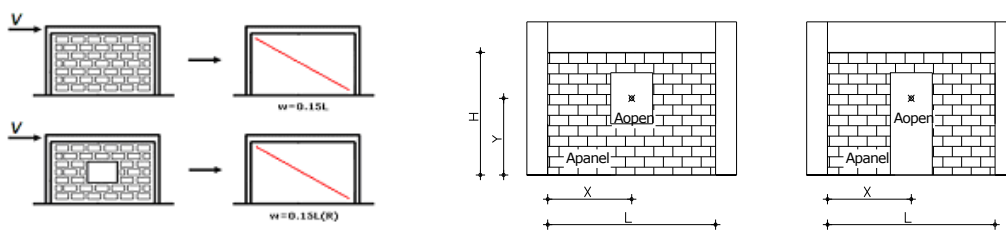
Σχήμα 8. Αποτελέσματα αναλύσεων για τα πλαίσια από όλα τα προσομοιώματα.



Όπως σαφώς μπορεί να παρατηρηθεί από το σύνολο των αποτελεσμάτων όλα τα προσομοιώματα έχουν καλή σύγκλιση στα πειραματικά δεδομένα. Για όλα τα προσομοιώματα η μέγιστη οριζόντια δύναμη αστοχίας και η αντίστοιχη μετατόπιση των πλαισίων δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Το προσομοίωμα κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζει απότομη μείωση της αντοχής μετά την υπέρβαση της οριακής παραμόρφωσης. Το προσομοίωμα κατά FEMA δεν έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης μετά την οριακή μετατόπιση. Τέλος τα προσομοιώματα με φθίνοντα κλάδο (Panagiotakos & Fardis 1994 και Mostafaei & Kabeyasawa 2004) έχουν καλύτερη σύγκλιση στα πειραματικά δεδομένα και τη δυνατότητα πρόβλεψης μετά την οριακή μετατόπιση.

## ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΣ ΠΛΑΤΟΥΣ ΘΛΙΠΤΗΡΑ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η δυνατότητα προσομοίωσης μιας τοιχοπλήρωσης που έχει άνοιγμα με έναν ιδεατό διαγώνιο θλιπτήρα, με μειωμένο πλάτος (έναντι του πλήρως τοιχοπληρωμένου) που εξαρτάται από το μέγεθος και τη θέση του ανοίγματος (**Σχήμα 9α**). Για το σκοπό αυτό εισάγονται δυο συντελεστές,  $R_1$  και  $R_2$ . Ο συντελεστής  $R_1$  σχετίζεται με την επιρροή του μεγέθους του ανοίγματος και ισούται με μονάδα όταν η τοιχοπλήρωση δεν έχει άνοιγμα. Ο συντελεστής  $R_2$  σχετίζεται με την επιρροή της θέσης του ανοίγματος και ισούται με τη μονάδα όταν το άνοιγμα είναι στο κέντρο.



**Σχήμα 9.** α) Υποβιβασμός πλάτους θλιπτήρα. β) Άνοιγμα μορφής παραθύρου. γ) Άνοιγμα μορφής θύρας.

Για την εύρεση των τιμών του λόγου  $R_1$  και  $R_2$ , αναλύονται κατάλληλα τοιχοπληρωμένα πλαίσια με το πρόγραμμα ANSYS (με χρήση πεπερασμένων στοιχείων). Ως πλαισιακός φορέας επιλέγεται το πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε πειραματικά (Καραγιάννης Χ. και Κακαλέτσης Δ. 2006, Kakaletsis D. and Karayannis C. 2007, Κακαλέτσης Δ. 2007). Οι εμφανιζόμενες τοιχοπληρώσεις έχουν ανοίγματα παραθύρων και θυρών, διαφορετικό για κάθε περίπτωση εμβαδόν ανοίγματος ( $A_{open}$ ) και το άνοιγμα βρίσκεται σε τυχαία θέση ( $X/L$ ). Ως αστοχία θεωρείται η υπέρβαση της μέγιστης γωνιακής παραμόρφωσης η οποία υπολογίζεται κατά FEMA 356.

### Επιρροή μεγέθους ανοίγματος

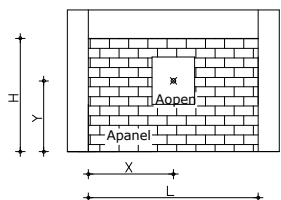
Για την εύρεση των τιμών του λόγου  $R_1$  αναλύονται δυο ομάδες πλαισίων, μια ομάδα με κεντρικό άνοιγμα μορφής παραθύρου (**Σχήμα 9β**) μεταβλητού μεγέθους ( $A_{open}/A_{panel}=10\%, 20\%, 30\%, 40\%$  και  $50\%$ ) και μια ομάδα με κεντρικό άνοιγμα μορφής θύρας (**Σχήμα 9γ**) μεταβλητού μεγέθους ( $A_{open}/A_{panel}=20\%, 30\%, 40\%$  και  $50\%$ ). Ο λόγος  $R_1$  προκύπτει με διαίρεση της οριζόντιας μέγιστης αντοχής της τοιχοπλήρωσης του εκάστοτε πλαισίου προς τη μέγιστη οριζόντια αντοχή της τοιχοπλήρωσης του πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου (**Σχήμα 11α**).

### Επιρροή θέσης ανοίγματος

Για την εύρεση των τιμών του λόγου  $R_2$  αναλύονται 3 ομάδες πλαισίων, 2 ομάδες με κεντρικό άνοιγμα μορφής παραθύρου (σχήμα 9β) μεταβλητής θέσης (σταθερή καθ' ύψος θέση  $Y/H=0.5$  και μεταβλητή κατά μήκος  $x/L=0.16, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83$ , ομοίως για  $Y/H=0.63$ ) και μια ομάδα με κεντρικό άνοιγμα μορφής θύρας (**Σχήμα 9γ**) μεταβλητής θέσης ( $X/L=0.16, 0.33, 0.50, 0.67$  και  $0.83$ ). Ο λόγος  $R_2$  προκύπτει με διαίρεση της οριζόντιας μέγιστης αντοχής της τοιχοπλήρωσης του εκάστοτε πλαισίου προς τη μέγιστη οριζόντια αντοχή της τοιχοπλήρωσης του ίδιου πλαισίου με κεντρικό άνοιγμα ίδιου μεγέθους, (**Σχήμα 11β**).

### Προσομοίωμα υποβιβασμού πλάτους θλιπτήρα

Η ύπαρξη ανοίγματος στο φάτνωμα της τοιχοπλήρωσης προσομοιώνεται με χρήση ενός μόνο θλιπτήρα (**Σχήμα 10**), μειώνοντας το πλάτος του θλιπτήρα ( $w_{red}=wR$ ,  $R=R_1R_2$ ) που αντιστοιχεί στο πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου ( $w \approx 0.15L$ ).



$$w_{red} = wR$$

$$w_{red} = (0.15L)(R_1R_2)$$

$$R_1 = 2.24 \left( \frac{A_{open}}{A_{panel}} \right)^2 - 2.77 \left( \frac{A_{open}}{A_{panel}} \right) + 1 \quad (6)$$

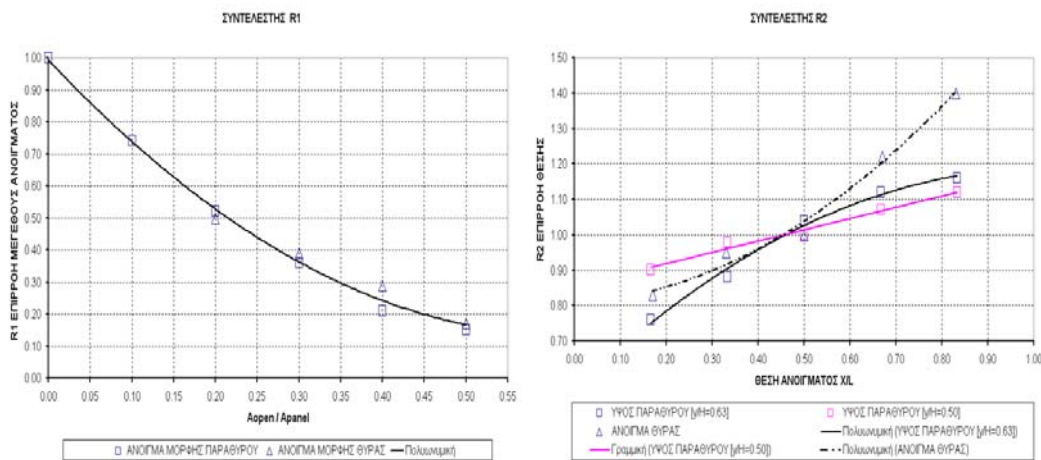
$$R_2 = 0.32 \frac{X}{L} + 0.86 \quad (7)$$

$$R_2 = 0.61 \left( \frac{X}{L} \right)^2 + 1.24 \left( \frac{X}{L} \right) + 0.56 \quad (8)$$

$$R_2 = 0.77 \left( \frac{X}{L} \right)^2 + 0.07 \left( \frac{X}{L} \right) + 0.81 \quad (9)$$

**Σχήμα 10.** Υποβιβασμός πλάτους θλιπτήρα

Στο **σχήμα 11** παρουσιάζονται οι καμπύλες για την εύρεση των συντελεστών  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα. Για το σχεδιασμό του λόγου που προκύπτει από τα πλαίσια με άνοιγμα μορφής παραθύρου χρησιμοποιείται το τετράγωνο ενώ για το σχεδιασμό του λόγου που προκύπτει από τα πλαίσια με άνοιγμα μορφής θύρας το τρίγωνο. Για την εύρεση το συντελεστή  $R_1$  δίνεται μια καμπύλη ανεξάρτητος μορφής ανοίγματος (**Σχήμα 11α**, Εξίσωση 6). Ενώ για την εύρεση του συντελεστή  $R_2$  δυο καμπύλες για άνοιγμα μορφής παράθυρου (**Σχήμα 11β**, Εξίσωση 7 για  $Y/H=0.5$  και Εξίσωση 8 για  $Y/H=0.63$ ) και μια για άνοιγμα μορφής θύρας (**Σχήμα 11β**, Εξίσωση 9).







Σχήμα 11. α) Επιρροή μεγέθους ανοίγματος ( $R_1$ ). β) Επιρροή θέσης ανοίγματος ( $R_2$ ).

### Έλεγχος αξιοπιστίας προσομοιώματος υποβιβασμού πλάτους θλιπτήρα

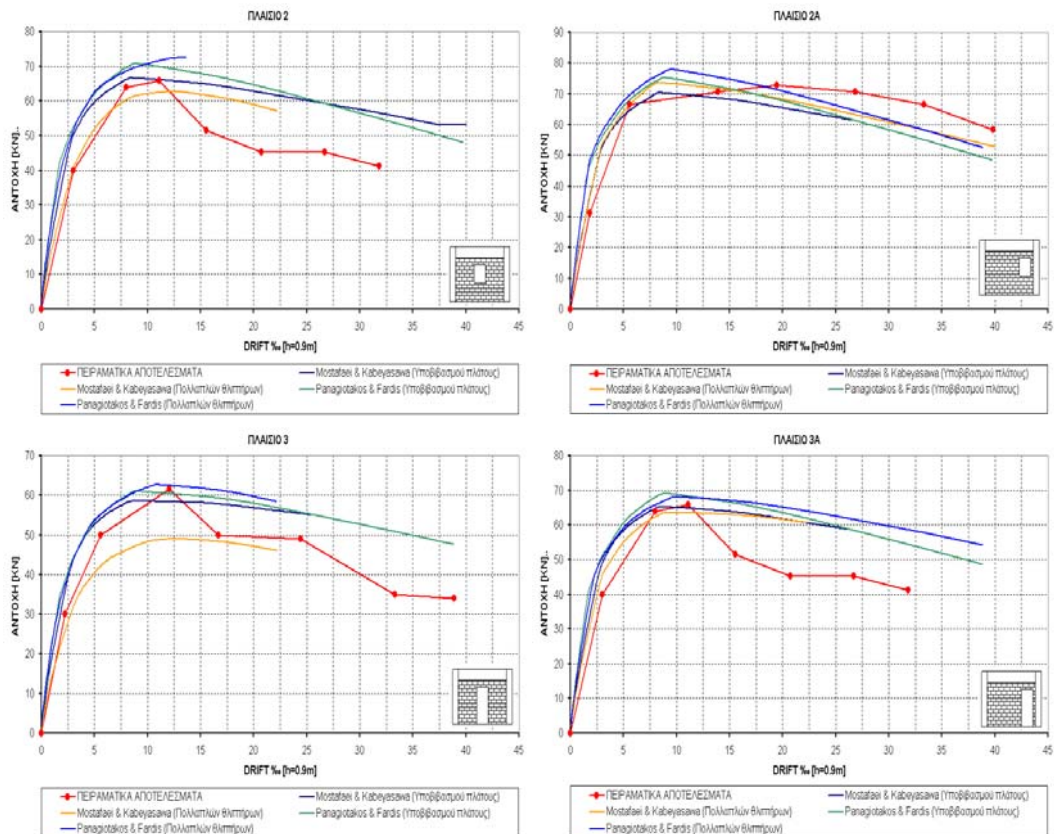
Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος υποβιβασμού πλάτους θλιπτήρα, θα αναλυθούν τέσσερα πλαίσια (μορφή πλαισίων “Πίνακας 1”) τα οποία έχουν ελέγξει πειρατικά (Καραγιάννης Χ. και Κακαλέτσης Δ. 2006, Kakaletsis D. and Karayannis C. 2007, Κακαλέτσης Δ. 2007). Τα πλαίσια 2 και 3 που έχουν παρουσιαστεί προηγούμενος (Σχήμα 8) και επιπλέον τα πλαίσια 2Α και 3Α που παρουσιάζονται στον “Πίνακα 1”. Ο λόγος μείωσης του πλάτους του θλιπτήρα ( $R=R_1R_2$ ) για τα πλαίσια έχει υπολογιστεί στον “Πίνακα 1”.

Τα πλαίσια επιλύονται με χρήση του προγράμματος ανελαστικής ανάλυσης DRAIN-2DX. Για τη μηχανική συμπεριφορά του διαγωνίου θλιπτήρα χρησιμοποιούνται τα προσομοίωμα με φθίνοντα κλάδο (Mostafaei & Kabeyasawa, 2004 και Panagiotakos & Fardis, 1994), το άνοιγμα στην τοιχοπληρωση προσομοιώνεται με χρήση πολλαπλών θλιπτήρων (Σχήμα 4) αλλά και με υποβιβασμό πλάτους του θλιπτήρα (Σχήμα 10). Τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίνονται στο Σχήμα 12.

Πίνακας 1. Υποβιβασμός πλάτους θλιπτήρα

Πλαίσιο 2	Πλαίσιο 3	Πλαίσιο 2Α	Πλαίσιο 3Α
			
<b>Μέγεθος:</b> 10% X/L=0.50 & Y/H=0.63	<b>Μέγεθος:</b> 20% X/L=0.50	<b>Μέγεθος:</b> 10% X/L=0.83 & Y/H=0.63	<b>Μέγεθος:</b> 20% X/L=0.83
$R_1=0.74$ & $R_2=1.00$	$R_1=0.50$ & $R_2=1.00$	$R_1=0.74$ & $R_2=1.16$	$R_1=0.50$ & $R_2=1.40$
<b>R=0.74</b>	<b>R=0.50</b>	<b>R=0.85</b>	<b>R=0.70</b>

Δίνονται συγκριτικά διαγράμματα οριζόντιας δύναμης – γωνιακής παραμόρφωσης (Σχήμα 12), και πινακοποιούνται οι τιμές που προκύπτουν για την οριζόντια δύναμη αστοχίας και την αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση “Πίνακας 2” για όλα τα πλαίσια που έχουν αναλυθεί σύμφωνα με τα προσομοιώματα (Panagiotakos & Fardis, 1994 και Mostafaei & Kabeyasawa, 2004). Το άνοιγμα στην τοιχοπλήρωση προσομοιώνεται με χρήση πολλαπλών θλιπτήρων αλλά και με υποβιβασμό πλάτους του θλιπτήρα.



Σχήμα 12. Συγκριτικά διαγράμματα αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πλαισίων 2, 2Α, 3 και 3Α

Όπως σαφώς μπορεί να παρατηρηθεί από το σύνολο των αποτελεσμάτων η προσομοίωση του ανοίγματος με χρήση ενός μόνο θλιπτήρα (υποβιβασμός πλάτους θλιπτήρα) αλλά και η χρήση περισσοτέρων θλιπτήρων (πολλαπλοί θλιπτήρες) έχουν καλή σύγκλιση τόσο μεταξύ τους όσο και με τα πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 12). Η προσομοίωση του ανοίγματος της τοιχοπλήρωσης με χρήση ενός μόνο θλιπτήρα (υποβιβασμός πλάτους θλιπτήρα), χρησιμοποιώντας τα προσομοιώματα Panagiotakos & Fardis (1994) και Mostafaei & Kabeyasawa (2004) παρουσιάζουν καλή σύγκλιση τόσο μεταξύ τους όσο και με τα

πειραματικά δεδομένα “Πίνακας 2”. Η προσομοίωση της τοιχοπλήρωσης με χρήση ενός μόνο θλιπτήρα είναι ελκυστική λόγω των προφανών πλεονεκτημάτων σε απλότητα. Ειδικότερα επισημαίνονται η εξιδανίκευση όμως με τη χρήση ενός πλασματικού θλιπτήρα είναι ανακριβής ως προς το μέγεθος και τη θέση των προσθετών τεμνουσών που εισάγονται στο περιβάλλον πλαίσιο. Τοπικές επιρροές η οποίες προσομοιώνονται με τη χρήση των πολλαπλών θλιπτήρων.

**Πίνακας 2.** Οριζόντια δύναμη αστοχίας και οριζόντια μετακίνηση τοιχοπληρωμένων πλαισίων

	Πλαίσιο 2		Πλαίσιο 3		Πλαίσιο 2Α		Πλαίσιο 3Α	
	F [KN]	u [mm]	F [KN]	u [mm]	F [KN]	u [mm]	F [KN]	u [mm]
Panagiotakos&Fardis (πολλαπλοί θλιπτήρες)	72.23	8.4	62.60	9.70	77.38	8.50	68.09	8.80
Mostafaei&Kabeyasawa (πολλαπλοί θλιπτήρες)	61.11	7.60	48.42	9.20	73.55	7.40	63.47	7.90
Panagiotakos&Fardis (υποβιβασμός πλάτους)	70.74	7.90	60.91	7.90	75.17	7.90	69.09	7.90
Mostafaei&Kabeyasawa (υποβιβασμός πλάτους)	69.58	7.40	60.30	7.40	73.84	7.40	68.03	7.40
Πειραματικές τιμές (Κακαλέτσης Δ. 2007)	66.56	10.00	61.56	10.82	72.71	18.97	64.69	12.51

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αναλυτικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σ’ αυτή την εργασία εξάγονται οι εξής παρατηρήσεις: (α) Τα προσομοιώματα τα οποία διαθέτουν φθίνοντα κλάδο (Panagiotakos & Fardis, 1994 και Mostafaei & Kabeyasawa, 2004) παρουσιάζουν μεγαλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με τα προσομοιώματα τα οποία δεν διαθέτουν φθίνοντα κλάδο (FEMA και ΚΑΝ.ΕΠΕ.). (β) Η ύπαρξη ανοίγματος στην τοιχοπλήρωση προσομοιώνεται με χρήση πολλαπλών θλιπτήρων με σχετικά καλή προσέγγιση. (γ) Η προσομοίωση τοιχοπληρωσεων με ανοίγματα με τη χρήση ενός μόνο θλιπτήρα ως εναλλακτική λύση των πολλαπλών θλιπτήρων παρουσιάζει καλή σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα έχει όμως το μειονέκτημα να μην προσομοιώνεται οι τοπικές επιρροές η οποίες προσομοιώνονται με τη χρήση των πολλαπλών θλιπτήρων. (δ) Για την παραπάνω προσομοίωση προτείνονται στο κείμενο της εργασίας σχετικές προσεγγιστικές εκφράσεις η αξιοπιστία των οποίων απαιτεί περισσότερα πειραματικά δεδομένα για να γενικευθεί η ισχύει τους. (ε) Η προσομοίωση των τοιχοπληρωμένων πλαισίων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει καλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα, η προσομοίωση όμως έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Δρίτσος Η. Σ. (2007) “Ανασχεδιασμός υφισταμένων κατασκευών”, Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιου Πατρών, Πάτρα, [eclass.upatras.gr](http://eclass.upatras.gr)

Καραγιάννης Χ. και Κακαλέτσης Δ. (2006). “Πειραματική διερεύνηση τοιχοπληρωμένων πλαισίων με κεντρικά ανοίγματα, υπό κυκλική φόρτιση”, 15ο Ελληνικό Συνέδριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τόμος Β, σελ. 269-281.

Κακαλέτσης Δ. “Διερεύνηση της συμπεριφοράς ορθογωνίων τοιχοπληρωμένων πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος με ανοίγματα υπό μεγάλο εύρος οριζόντιες κυκλικές μετατοπίσεις” Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Χ. Καραγιάννη), Πολυτεχνικής Σχολής Δ.Π.Θ. τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ξάνθη (2007).

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (2005), “Κανονισμός Επεμβάσεων-Σχέδιο Κειμένου 3”, Αθήνα, [www.oasp.gr](http://www.oasp.gr)

FEMA 356, (2000). “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings” Washington D.C., Federal Emergency Management Agency, November.

Kakaletsis D.J and Karayannis C.G. (2007) “Experimental investigation of in filled r/c frames with eccentric openings”, Structural Engineering and Mechanics, an International Journal, vol. 26, No 3.

Kakaletsis D.J and Karayannis C.G. (2007) “Influence of Masonry Strength and Openings on in filled R/C Frames Under Cycling Loading”, Journal of Earthquake Engineering.

Klingner, R. E., & Bertero, V.V., (1976). “Infilled frames in earthquake resistant construction”. Report EERC 76-32, Earthquake Engineering Research Center, December.

Klingner, R. E., & Bertero, V.V., (1978). “Earthquake resistance of infilled frames”. Journal of the Structural Division, vol.104, n. ST6, pp. 973-989.

Mainstone, R. J., 1971. On the stiffness and strengths of infilled frames, Proceedings, Institution of Civil Engineers, Supplement IV, 57–90.

Mostafaei, H. and Kabeyasawa, T. (2005) Effect of Infill Masonry Walls on the Seismic Response of Reinforced Concrete Building Subjected to the 2003 Bam Earthquake Strong Motion: A Case Study of Bam Telephone Center. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan

Panagiotakos, T. B., & Fardis, M.N., (1994). “Proposed non-linear strut models for infill panels”. 1st Year Progress Report of HCM-PREC8, University of Patras.

Park and Paulay (1975) Reinforced Concrete Structures, J. Wiley & Sans, New York.

Prakash, V., Powell, G. H. and Campbell, S. (1993). “DRAIN-2DX Base program description and user guide. Report No. UCB/SEMM-93/7”. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA.