

# Η Επιρροή της Μορφολογίας των Ανοιγμάτων στη Σεισμική Ικανότητα Πλαισιωμάτων Παλαιών Κατασκευών

Δημήτριος Ι. Κακαλέτσης  
Χρήστος Γ. Καραγιάννης

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερευνάται πειραματικά η επιρροή των ισχυρών τοιχοποιιών πλήρωσης με ανοίγματα στη σεισμική συμπεριφορά πλαισίων ωπλισμένου σκυροδέματος που σχεδιάσθηκαν με ηθελημένα σχεδιαστικά σφάλματα ή ελλείψεις κατά τρόπον ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά παλαιών κατασκευών. Με βάση την παρατηρηθείσα συμπεριφορά, προτείνεται μία μέθοδος πλαστικής ανάλυσης για την αποτίμηση της συνολικής πλευρικής αντίστασης των τοιχοπληρωμένων πλαισίων καθώς και ένα συνεχές προσομοίωμα δύναμης-παραμόρφωσης για τη τοιχοποιία πλήρωσης με ανοίγματα. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η συμπεριφορά επτά μονώροφων ενός φατνώματος δοκιμίων πλαισίων κλίμακας 1:3 κάτω από κυκλική οριζόντια φόρτιση μέχρι στάθμη πλευρικής απόκλισης 40%. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν η μορφή και το μέγεθος του ανοίγματος και η αντοχή του τοίχου. Ο υπολογισμός της πλευρικής αντίστασης λαμβάνει υπόψη τους διάφορους τύπους μηχανισμών αλληλεπίδρασης πλαισίου-πλήρωσης που προέκυψαν από τις πειραματικές παρατηρήσεις. Ο νόμος της πειραματικής συμπεριφοράς των πληρώσεων αποκτάται με αφαίρεση του φορτίου του γυμνού πλαισίου για μια δεδομένη απόκλιση από την απόκριση του κάθε τοιχοπληρωμένου πλαισίου. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι τα ανοίγματα μειώνουν σημαντικά τη σεισμική ικανότητα των τοιχοπληρωμένων πλαισίων. Η χρήση, όμως, τοιχοποιίας πλήρωσης βελτιωμένης θλιπτικής αντοχής προκαλεί αύξηση στη σεισμική ικανότητα. Η μέθοδος πλαστικής ανάλυσης για τον υπολογισμό της αντίστασης των πλαισίων και το προσομοίωμα δύναμης – παραμόρφωσης για τη τοιχοποιία πλήρωσης με ανοίγματα ως διαγώνιας αντηρίδας που προτάθηκαν φαίνεται από τα αποτελέσματα ότι μπορούν να αποδώσουν ορθά τον πραγματικό μηχανισμό αστοχίας και την επιρροή των παραμέτρων των δοκιμίων. ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Τοιχοπληρώσεις, Ανοίγματα, Παλαιές Κατασκευές, Σεισμική Συμπεριφορά.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις κατηγορίες των τυπικών κατασκευών του Ελληνικού χώρου που διαμορφώθηκαν χρονολογικά από τις ανάγκες (κάλυψη αναγκών μαζικής αστικής δόμησης), την επιστημονική γνώση και τεχνολογία (διαθέσιμα μέσα-κανονισμοί υλικών και δράσεων-αντισεισμικός κανονισμός) και τις κυριαρχούσες κατασκευαστικές συνήθειες, είναι οι κατασκευές πριν τον Αντισεισμικό Κανονισμό του '59 ή και με τον Α.Κ. του '59 μέχρι και την δεκαετία του '60. Χαρακτηριστικός τύπος αυτής της περιόδου (δεκαετίες '30 έως και '60) σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη και σε άλλα αστικά κέντρα είναι η πολυκατοικία των 5-7 ορόφων με σχετικά εύκαμπτο σκελετό (δοκοί και υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα με ισχνές διατομές και έλλειψη τοιχωμάτων από οπλ. σκυρόδεμα). Επιπλέον χαρακτηριστικό αυτών των κατασκευών ήταν τα μικρά ανοίγματα δοκών και πλακών (3,0 - 4,0m) και η ύπαρξη πυκνής διάταξης σχετικά καλά δομημένης και ισχυρής, ιδιαίτερα στην περίμετρο, τοιχοποιίας από διάτρητους ή συμπαγείς οπτόπλινθους σε όλους τους ορόφους. Η συμπεριφορά αυτών των κατασκευών αποδείχθηκε γενικά ικανοποιητική σε σεισμούς μικρής διάρκειας, γιατί το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής δράσης απορροφάται από τις τοιχοποιίες, οι οποίες δεν λαμβάνονται μεν υπόψη σαν στοιχείο του φέροντος οργανισμού, συμβάλλουν ουσιαστικά όμως στην αύξηση της ακαμψίας του συστήματος και περιορίζουν τις παραμορφώσεις των στοιχείων του φέροντος οργανισμού (Dritsos, 2005, Kakaletsis & Karayannis, 2007, 2008, 2009). Επισημαίνεται βέβαια ότι η αντοχή των τοιχοποιιών αυτών είναι περιορισμένη, γρήγορα ρηγματώνονται και δεν συμβάλλουν μετά τη ρηγμάτωση και την αστοχία τους, η οποία συμβαίνει σε σχετικά μικρές παραμορφώσεις (Fardis & Panagiotakos, 1997, Fardis, 2009).

Εξ' άλλου, για τα κτίρια που σχεδιάστηκαν ως αντισεισμικά, η σκέψη με την οποία ο Ευρωκώδικας 8 (CEN 2004) βλέπει τις μη δομικές τοιχοποιίες πλήρωσης είναι ότι αυτές, κανονικά, συνιστούν μια δεύτερη γραμμή άμυνας και μια οικονομικά αποτελεσματική πηγή σημαντικής υπεραντοχής. Στις περιπτώσεις όμως που η συνεισφορά των τοιχοποιιών πλήρωσης στην πλευρική αντοχή και δυσκαμψία του κτιρίου είναι μεγάλη σχετικά με την αντοχή και την δυσκαμψία του γυμνού φέροντος δομικού συστήματος, οι πληρώσεις μπορεί να ανατρέψουν τον αντισεισμικό σχεδιασμό της κατασκευής και να υπονομεύσουν τις προσπάθειες του μελετητή και τον σκοπό των κανονισμών να ελέγξουν την ανελαστική απόκριση με ειδικές απαιτήσεις για ανελαστική παραμόρφωση σε όλη την έκταση της κατασκευής (Fardis 2009). Ειδικότερα, τοπικές επιρροές των πληρώσεων μπορεί να προκαλέσουν πρώιμη ψαθυρή αστοχία των μελών του πλαισίου, κυρίως των στύλων. Ο Ευρωκώδικας 8 (CEN 2004) δίδει εξειδικευμένες οδηγίες στον μελετητή ή ακόμη υποδεικνύει κανόνες υποχρεωτικής εφαρμογής ως προστασία εναντίον των τοπικών ή γενικών βλαπτικών επιρροών των τοιχοπληρώσεων χωρίς ρητά να λαμβάνονται υπόψη οι μεμονωμένοι τοίχοι πλήρωσης στο προσομοίωμα της σεισμικής ανάλυσης.

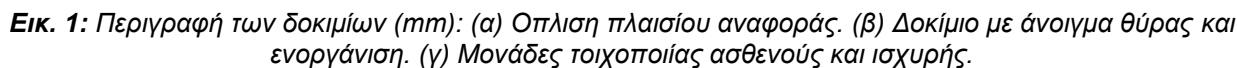
Επί του παρόντος τα πειραματικά δεδομένα πάνω στην αλληλεπίδραση τοιχοποιιών πλήρωσης με τα πλαίσια από σκυρόδεμα υπό πλευρική φόρτιση είναι πολύ περιορισμένα (CEB, 1996, Maghaddam & Dowling, 1987, Karayannis et al, 2005) και τα αναλυτικά προσομοιώματα των πληρώσεων δεν είναι ακόμη πλήρως ανεπτυγμένα (FEMA 356, 2000, Kakaletsis, 2009) και δεν έχει επιτευχθεί συμφωνία που να οδηγεί σε μια ενιαία προσέγγιση είτε για το σχεδιασμό είτε για την αποτίμηση της αντοχής και πλαστιμότητας. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν κατάλληλα αναλυτικά εργαλεία για την ελαστική και ανελαστική ανάλυση των πλαισίων ωπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοποιίες πλήρωσης και να επιβεβαιωθούν μέσω εργαστηριακών πειραμάτων. Οι τοίχοι πλήρωσης συνήθως προσομοιώνονται σαν διαγώνιες αντηρίδες που μπορούν να μεταφέρουν μόνο τη θλιπτική δύναμη μεταξύ των διαγωνίως απέναντι κόμβων. Είναι κρίσιμο να αναδειχθούν οι συνθήκες που απαιτούνται για να αναπτυχθεί μια θλιβόμενη αντηρίδα. Τα ανοίγματα, τα χάσματα της διεπιφάνειας και άλλες ασυνέχειες μπορεί να επηρεάσουν την ανάπτυξη της θλιβόμενης διαγωνίου σε πραγματικές κατασκευές.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται παρατηρήσεις και συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία και εμβάθυνση των αποτελεσμάτων πολυετούς και εκτεταμένου πειραματικού προγράμματος σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίων με τοιχοποιία πλήρη ή με ανοίγματα σε διάφορες θέσεις και διαφορετικών διαστάσεων.

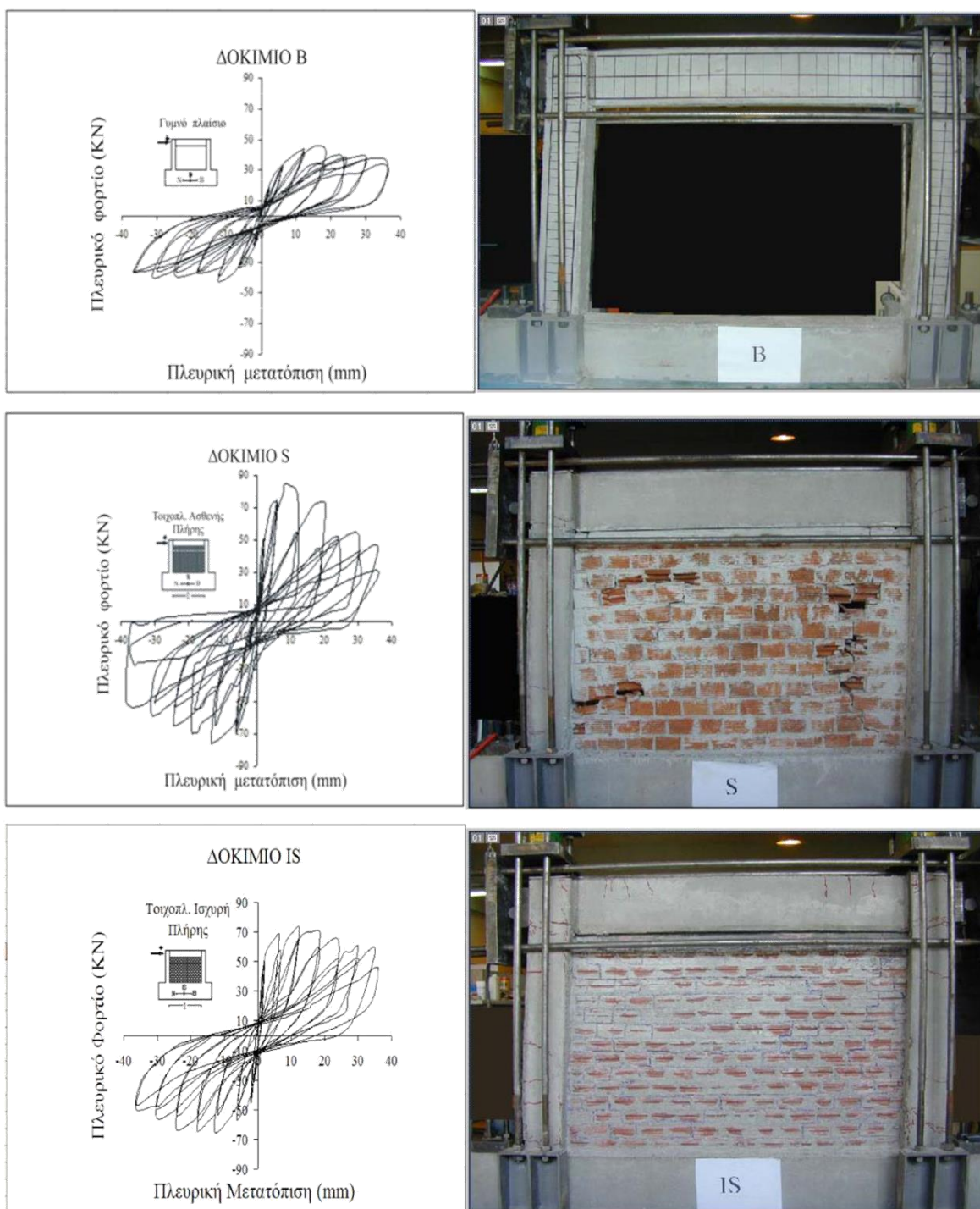
## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Το συνολικό πειραματικό πρόγραμμα συνίσταται από τη πειραματική διερεύνηση αποτελεσμάτων δεκαπέντε δοκιμών όπως φαίνονται στην εικόνα (1): Του γυμνού πλαισίου που ήταν το βασικό πλαίσιο αναφοράς (δοκίμιο B). Του πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου «ασθενούς» τοιχοποιίας (δοκίμιο S). Του πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου «ισχυρής» τοιχοποιίας (δοκίμιο IS). Έξη τοιχοπληρωμένων πλαισίων «ασθενούς» τοιχοποιίας που φέρουν τρία μεγέθη ανοιγμάτων παραθύρων και τρία μεγέθη ανοιγμάτων θυρών αντίστοιχα, στο κέντρο, πλάτους  $l_a/l = 0.25, 0.375, 0.5$ , όπου  $l_a$  το πλάτος του ανοίγματος και  $l = 1.20\text{m}$  το μήκος της πλήρωσης (δοκίμια WO2, WO3, WO4, DO2, DO3, DO4). Έξη τοιχοπληρωμένων πλαισίων «ασθενούς» τοιχοποιίας που φέρουν τρεις θέσεις ανοιγμάτων παραθύρων και τρεις θέσεις ανοιγμάτων θυρών αντίστοιχα σταθερού πλάτους  $l_a = 0.3\text{ m}$ :  $x/l = 0.167, x/l = 0.333, x/l = 0.5$ , όπου  $x$  η απόσταση του κέντρου του ανοίγματος από την αρχή της πλήρωσης και  $l = 1.20\text{m}$  το μήκος της πλήρωσης (δοκίμια WX1, WX2, WO2, DX1, DX2, DO2). Δύο τοιχοπληρωμένων πλαισίων «ισχυρής» τοιχοποιίας που φέρει κεντρικό άνοιγμα παραθύρου και θύρας αντίστοιχα, πλάτους  $l_a = 0.3\text{ m}$  (δοκίμια IWO2, IDO2). Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν μόνο στη σύγκριση των επτά αντίστοιχων δοκιμών ασθενούς και ισχυρής τοιχοποιίας.

Τα δοκίμια ήταν προσομοιώματα υπό κλίμακα 1/3 μονώροφου ενός φανώματος πλαισίου ωπλισμένου σκυροδέματος με λόγο όψεως  $l/h = 1.5$  και σχεδιάσθηκαν με αποκλίσεις από τις



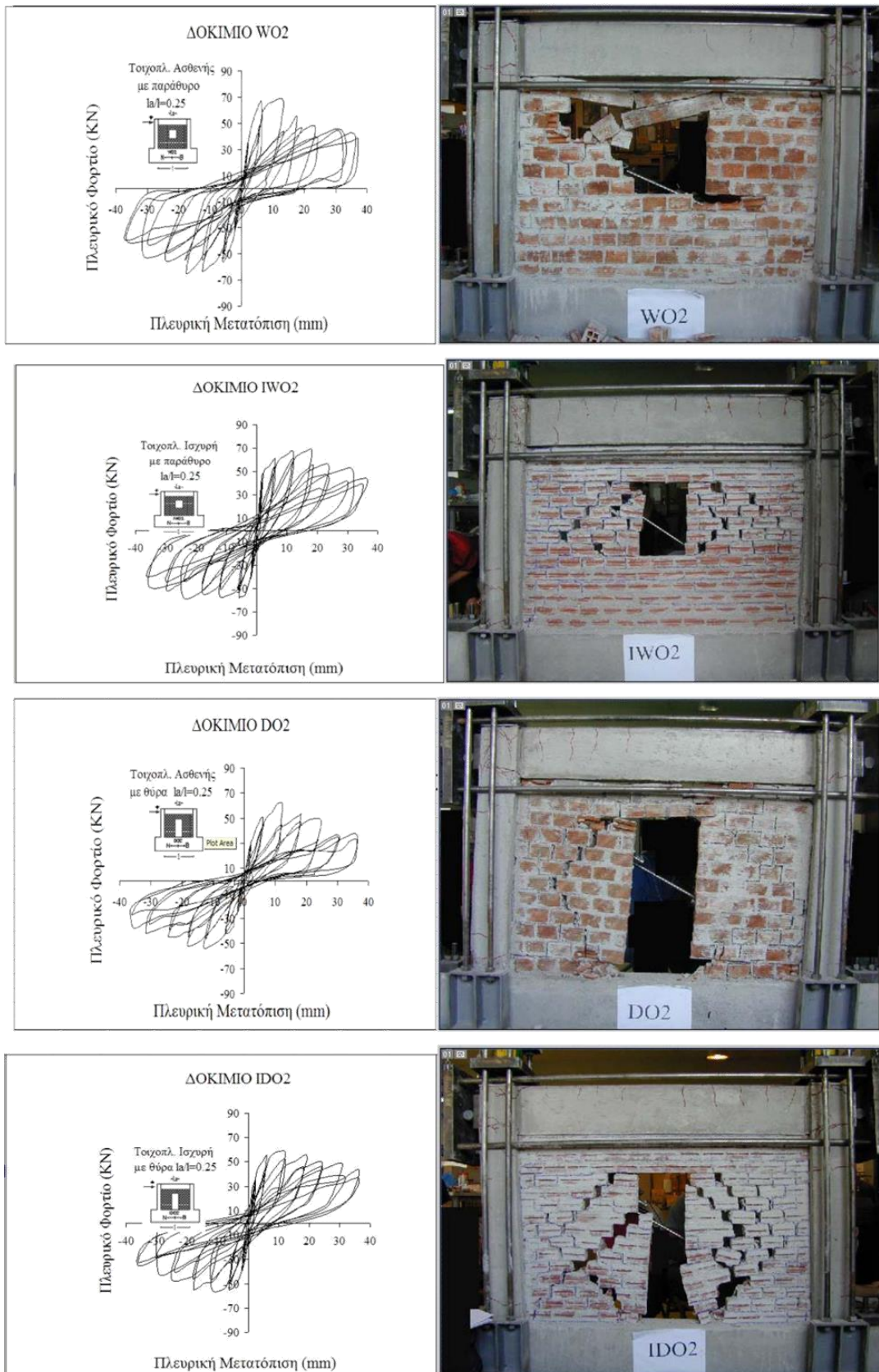
Η ανελαστική συμπεριφορά των τοιχοπληρωμένων πλαισίων μελετάται με εντός επιπέδου επιβολή κυκλικής παραμόρφωσης με έλεγχο μετατόπισης. Στην εικόνα (1) παρουσιάζεται ο τρόπος τοποθέτησης των οργάνων της δοκιμής. Τα δοκίμια υπέστησαν κυκλικές πλευρικές φορτίσεις συγχρόνως με κατακόρυφα φορτία που εφαρμόσθηκαν μόνο επί των στύλων με σταθερή τιμή με σκοπό τη προσομοίωση των κύριων επιρροών σεισμικών διεγέρσεων με σύγχρονη δράση φορτίων βαρύτητας στην πρωτότυπη κατασκευή. Οι κύκλοι άρχισαν από ένα εύρος πλαστιμότητας 0.8 που αντιστοιχούσε σε εύρος μετατόπισης  $\pm 2\text{mm}$  περίπου (η πλαστιμότητα 1 αντιστοιχούσε στη μετατόπιση διαρροής), ακολουθούμενοι διαδοχικά από στάθμες εύρους πλαστιμότητας 2, 4, 6, 8,



**Εικ. 2:** Υστερητικές Καμπύλες Φορτίου – Μετατόπισης και Εικόνες Αστοχίας των Δοκιμών Αναφοράς B, S, IS

10,12. Το μέγιστο εύρος μετατόπισης ήταν 36mm (γωνιακή παραμόρφωση 40‰). Συνολικά εφαρμόστηκαν σε κάθε δοκίμιο 7 στάθμες μετατόπισης από δυο κύκλους εκάστη. Στις εικόνες (2) και (3) παρουσιάζονται οι υστερητικοί βρόχοι απόκρισης φορτίου – μετατόπισης του πάνω κόμβου των δοκιμών και οι εικόνες αστοχίας των δοκιμών μετά το τέλος της φόρτισης. Η αποτίμηση της συμπεριφοράς των πλαισίων πραγματοποιήθηκε με βάση τις μορφές αστοχίας, αντοχή, δυσκαμψία, ικανότητα απόσβεσης ενέργειας που εξήχθησαν από τα σχήματα αυτά. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των υστερητικών χαρακτηριστικών της ασθενούς τοιχοπλήρωσης είναι σε μερικές περιπτώσεις υψηλότερες από τις αντίστοιχες της ισχυρής τοιχοπλήρωσης. Αυτό αποδίδεται στις μεγαλύτερες μονάδες της ασθενούς τοιχοποιίας.





**Εικ. 3:** Υστερητικές Καμπύλες Φορτίου – Μετατόπισης και Εικόνες Αστοχίας των Δοκιμών με ανοίγματα σε ασθενή και ισχυρή τοιχοποιία WO2, IWO2, DO2, IDO2.

**Πίν. 1. Σύγκριση των Υστερητικών Χαρακτηριστικών των Πειραματικών Δοκιμών**

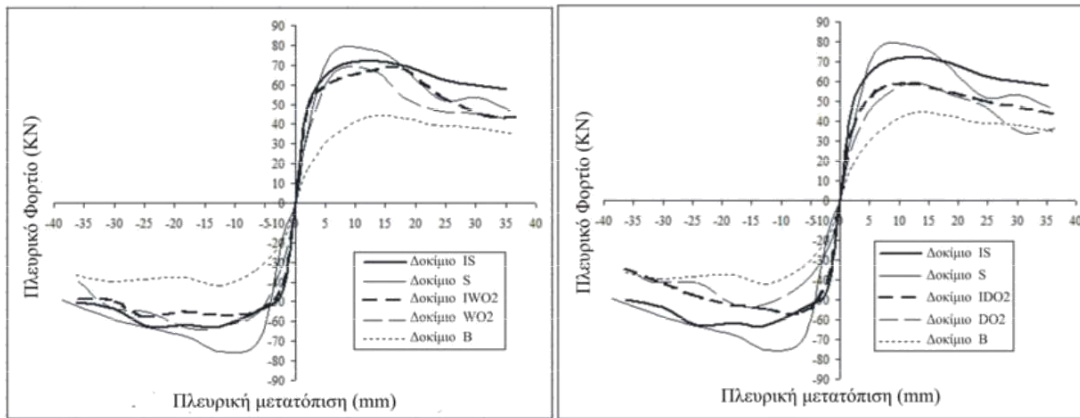
| Δοκ.        | Μορφολογία Δοκιμίου                         | $\nu$ | $\gamma_y$ (%) | $\gamma_u$ (%) | k    | $\nu_{lim}$ | $\mu_{0,85}$ | $\beta_{res}$ | $V_2/V_1$ (μ.ο.) | $W_2/W_1$ (μ. ο.) | $\Sigma W/\Sigma W_B$ |
|-------------|---------------------------------------------|-------|----------------|----------------|------|-------------|--------------|---------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| <b>B</b>    | Γυμνό Πλαίσιο                               | 1.00  | 3.44           | 15.50          | 1.00 | 0.54        | 3.97         | 1.00          | 0.90             | 0.70              | 1.00                  |
| <b>S</b>    | Πλήρης Ασθενής                              | 1.84  | 2.82           | 9.23           | 2.48 | 0.65        | 4.24         | 1.34          | 0.87             | 0.85              | 1.57                  |
| <b>IS</b>   | Πλήρης Ισχυρή                               | 1.65  | 3.10           | 13.69          | 2.62 | 0.84        | 6.31         | 1.68          | 0.87             | 0.70              | 1.42                  |
| <b>WO2</b>  | Πλήρης Ασθενής Πλήρης Παράθυρο $I_a/I=0,25$ | 1.50  | 3.87           | 11.11          | 1.74 | 0.76        | 3.89         | 1.19          | 0.85             | 0.72              | 1.43                  |
| <b>DO2</b>  | Πλήρης Ασθενής Πλήρης Θύρα $I_a/I=0,25$     | 1.39  | 2.76           | 12.02          | 1.57 | 0.53        | 3.20         | 1.06          | 0,87             | 0.69              | 1.02                  |
| <b>IWO2</b> | Πλήρης Ισχυρή Παράθυρο $I_a/I=0,25$         | 1.54  | 2.54           | 20.17          | 2.5  | 0.70        | 6.42         | 1.26          | 0.88             | 0.75              | 1.41                  |
| <b>IDO2</b> | Πλήρης Ισχυρή Πλήρης Θύρα $I_a/I=0,25$      | 1.33  | 3.24           | 13.2           | 1.73 | 0.71        | 6.77         | 1.27          | 0.86             | 0.70              | 1.28                  |

$\nu$ : Πλευρική αντοχή,  $\beta_{res}$ : Παραμένουσα αντοχή,  $\gamma_y$ : Όριο λειτουργικότητας,  $\gamma_u$ : Όριο αστοχίας, k: Αρχ. δυσκαμψία,  $\nu_{lim}$ :  $V_y/V_u$ ,  $\mu_{0,85}$ : Συντελεστής πλαστιμότητας, V: Μέγιστη δύναμη ανά κύκλο, W: Ενέργεια ανά κύκλο,  $\Sigma W$ : Συνολική αθροιστική ενέργεια, 1/2: 1ος/2ος κύκλος.

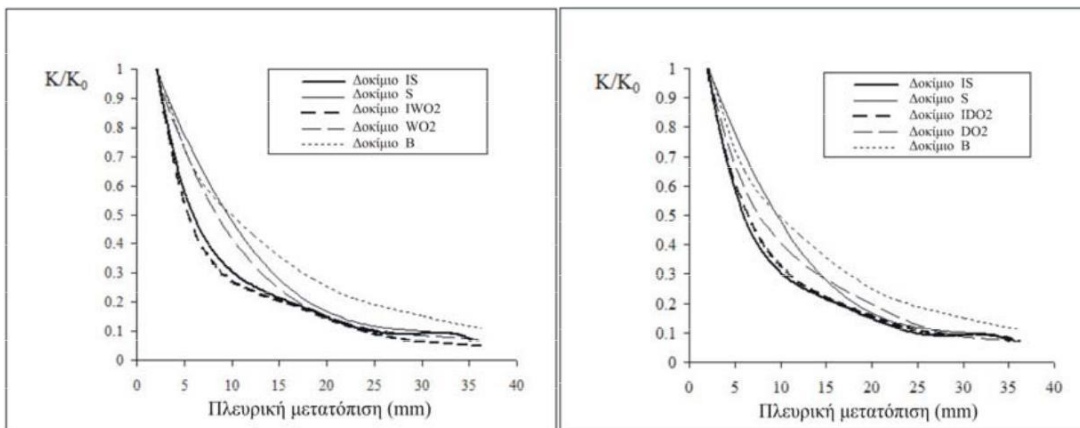
### 3. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από τον πίνακα (1) όπου συγκρίνονται τα κρίσιμα μεγέθη μπορεί να εξαχθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις: Η πλευρική αντίσταση ( $\nu$ ) σ' όλες τις περιπτώσεις των τοιχοπληρωμένων πλαισίων με ανοίγματα ήταν 1.33 έως 1.54 φορές εκείνης του αντίστοιχου γυμνού πλαισίου ενώ η πλευρική αντίσταση του πλαισίου με πλήρη τοιχοπλήρωση ήταν 1.84 φορές εκείνης του αντίστοιχου γυμνού πλαισίου. Η αντίσταση μειώνεται αναλόγως με τη μείωση της επιφάνειας του τοίχου που αντιστοιχεί στο άνοιγμα. Η παρουσία της τοιχοπλήρωσης με ανοίγματα αυξάνει αξιοσημείωτα σ' όλες τις περιπτώσεις την αρχική δυσκαμψία (k) του συστήματος κατά 1.57 έως 2.50 φορές εκείνης του γυμνού πλαισίου ενώ η πλήρης τοιχοπλήρωση αυξάνει τη δυσκαμψία κατά 2.62 φορές εκείνης του γυμνού πλαισίου. Η δυσκαμψία μειώνεται με μεγαλύτερο ποσοστό από εκείνο της μείωσης της επιφάνειας της διατομής του τοίχου λόγω των ανοιγμάτων. Η συνολική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ( $\Sigma W$ ) των τοιχοπληρωμένων πλαισίων με ανοίγματα ήταν 1.02 έως 1.43 φορές την ικανότητα του αντίστοιχου γυμνού πλαισίου και η αύξηση του μεγέθους του ανοίγματος μείωσε τις τιμές του λόγου απορρόφησης στις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν. Στα δοκίμια με ισχυρή τοιχοπλήρωση η επιρροή των ανοιγμάτων στην αντίσταση και ιδιαίτερα στη δυσκαμψία εμφανίζεται λιγότερο σημαντική, εμφανίζονται υψηλότερες τιμές του συντελεστή πλαστιμότητας, δεν επηρεάζονται ουσιαστικά οι τιμές της ανηγμένης απορρόφησης.

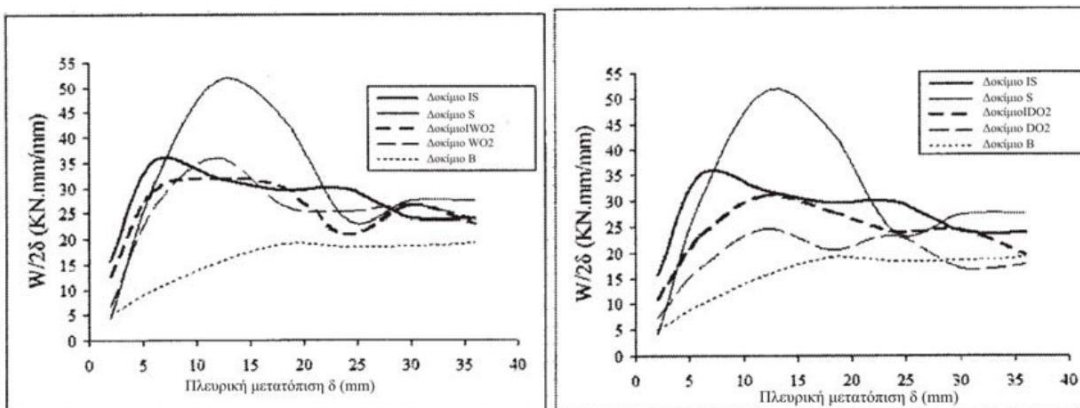
Από την εικόνα (4) όπου συγκρίνεται η μεταβολή των υστερητικών χαρακτηριστικών συναρτήσει των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων μπορεί να εξαχθεί ότι: Η αύξηση της αντοχής του συστήματος που οφείλεται στις πληρώσεις είναι πιο σημαντική στις περιοχές μικρών μετατοπίσεων από ότι σε περιοχές μεγαλύτερων μετατοπίσεων. Η απώλεια δυσκαμψίας είναι μεγαλύτερη μετά τη μέγιστη αντίσταση. Σε πολύ μεγάλες αποκλίσεις (από 18mm έως 36mm) η απώλεια δυσκαμψίας τείνει ασυμπτωτικά σ' αυτή του γυμνού πλαισίου διότι δεν παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία των στύλων.



Υστερητικές περιβάλλουσες φορτίου – μετατόπισης



Πτώση της ανηγμένης δυσκαμψίας



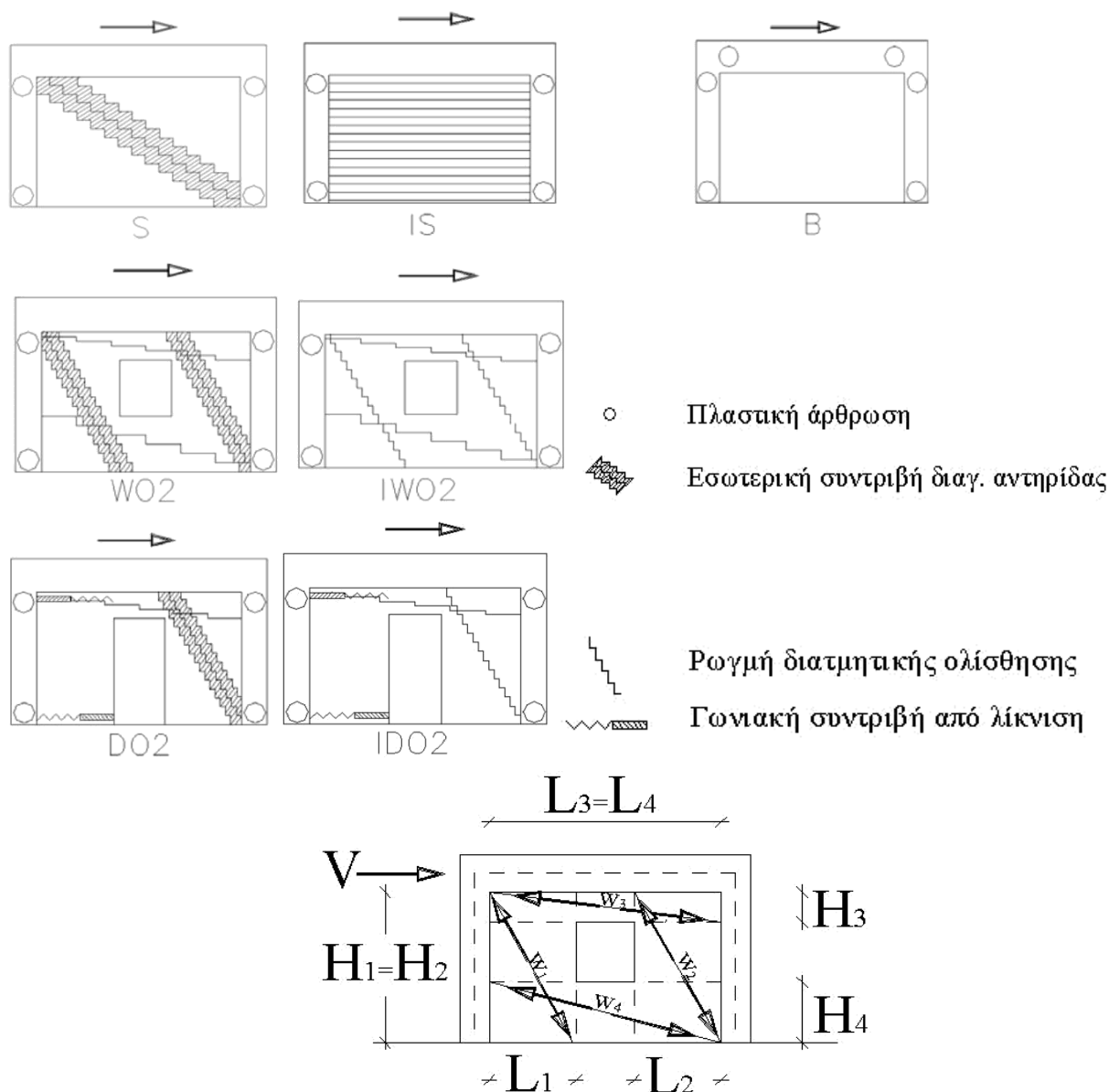
Ενέργεια που αποσβέσθηκε ανηγμένη στο εύρος μετατόπισης από -δ έως +δ κάθε κύκλου

(α)

(β)

**Εικ. 4:** Σύγκριση της μεταβολής των Υστερητικών Χαρακτηριστικών συναρτήσεων των επιβαλλόμενων Μετατοπίσεων: (α) Επιρροή της αντοχής τοίχου στο άνοιγμα παραθύρου. (β) Επιρροή της αντοχής τοίχου στο άνοιγμα θύρας.

Σ' όλες τις στάθμες αναστροφής της παραμόρφωσης, όλα τα τοιχοπληρωμένα πλαίσια με ανοίγματα απορρόφησαν πολύ περισσότερη ενέργεια, κανονικοποιημένη στη συνολική από κορυφή σε κορυφή μετατόπιση, από εκείνη του γυμνού πλαισίου, μολοντί μικρότερη από των πλαισίων με πλήρη τοιχοπλήρωση. Στα δοκίμια με ισχυρές πληρώσεις παρατηρήθηκαν αυξημένη απώλεια



Εικ. 5: Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμών.

δυσκαμψίας στις μικρές αποκλίσεις, και πτώση της κανονικοποιημένης ενέργειας απορρόφησης μ' ένα πιο ομαλό κλάδο.

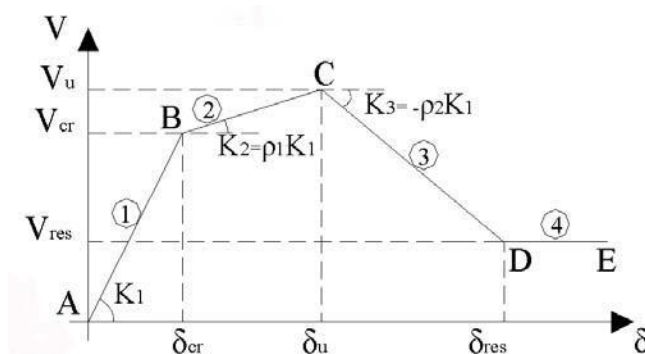
#### 4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Για να αποτιμηθεί η πλευρική αντίσταση ενός τοιχοπληρωμένου πλαισίου με ανοίγματα θεωρήθηκε ότι τα τμήματα του τοίχου που συνορεύουν με τα ανοίγματα φορτίζονται διαγώνια και μεταφέρουν τη συνολική τέμνουσα της πλήρωσης (FEMA 356, 2000), όπως στην εικόνα (5). Με βάση την ανάλυση της συμπεριφοράς των δοκιμών που προηγήθηκε και με βάση τους σημαντικούς τύπους βλάβης που παρατηρήθηκαν προκύπτουν οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας τοιχοπληρωμένου πλαισίου. Η μέθοδος (Kakaletsis & Karayannis, 2008: 213-217) χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση των δοκιμών που ελέγχθηκαν σ' αυτή τη μελέτη. Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων φαίνεται στον πίνακα (2).



**Πίν. 2: Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.**

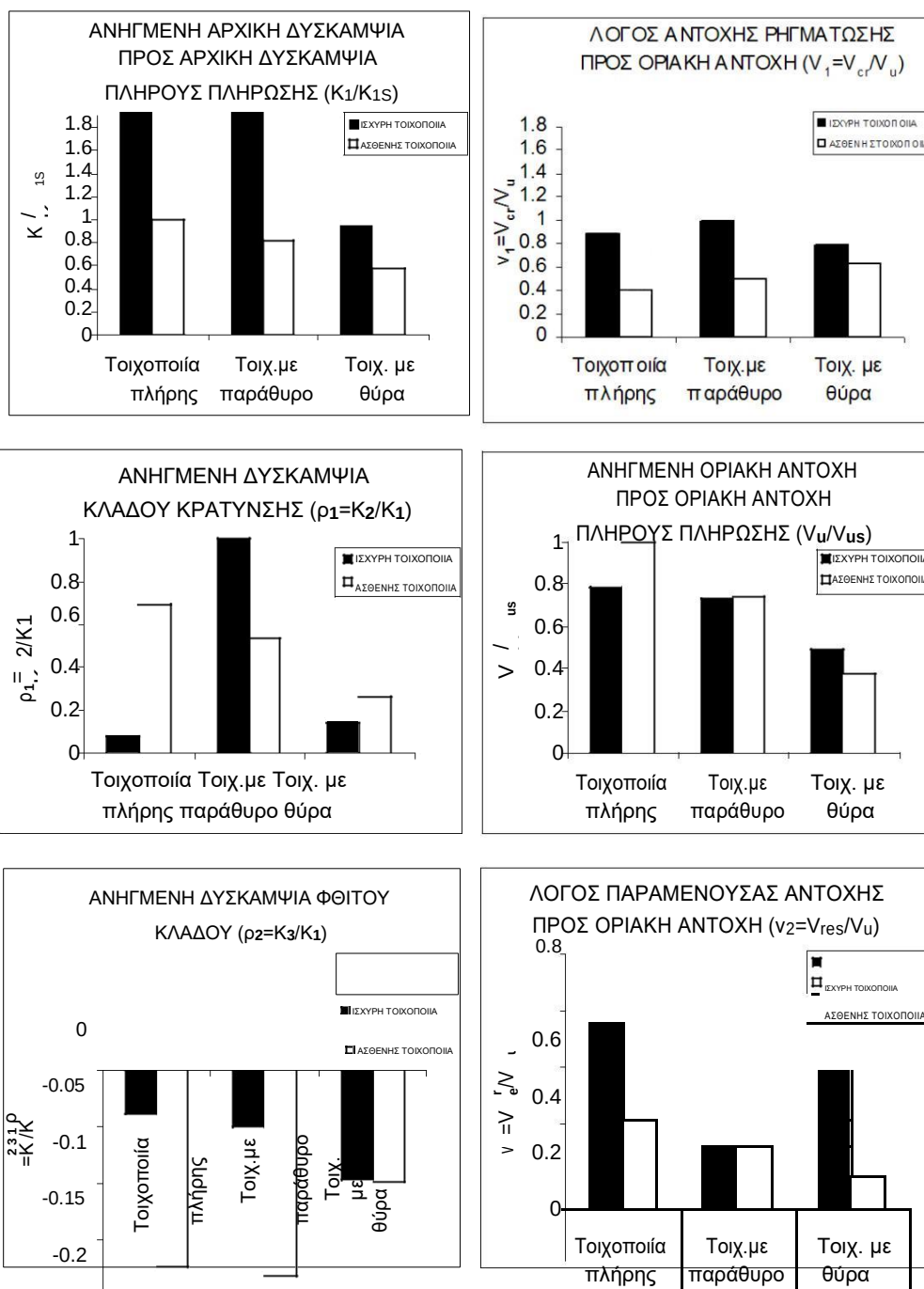
| ΔΟΚΙΜΙΟ     | Μορφολογία<br>Δοκιμίου                                     | Μηχαν.<br>Αστοχίας | Πλευρικές<br>Αντιστάσεις<br>Μηχαν.<br>Αστοχίας<br>$V_u$<br>(KN) | Ενεργός<br>Πλευρική<br>Αντίσταση<br>$V_{ua}$<br>(KN) | Σύγκριση<br>( $V_{ua}/V_u$ )<br>(%) |
|-------------|------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>B</b>    | Γυμνό πλαίσιο                                              | -                  | 40,28                                                           | 44,27                                                | +9                                  |
| <b>S</b>    | Τοιχοπλήρωση<br>ασθ.πλήρης                                 | 1                  | 92,07                                                           | 81,46                                                | -13                                 |
| <b>WO2</b>  | Τοιχοπλ.<br>ασθεν.<br>με άνοιγμα<br>παραθ.<br>$I_a/I=0,25$ | 3                  | 72,32                                                           | 66,56                                                | -8,7                                |
| <b>DO2</b>  | Τοιχοπλ.<br>ασθεν.<br>με άνοιγμ.<br>θύρας<br>$I_a/I=0,25$  | 5                  | 64,77                                                           | 61,56                                                | -5,2                                |
| <b>IS</b>   | Τοιχοπλήρωση<br>ισχυρή πλήρης                              | 2                  | 65,86                                                           | 72,92                                                | +9,7                                |
| <b>IWO2</b> | Τοιχοπλ.<br>ισχυρή<br>με άνοιγμα<br>παραθ.<br>$I_a/I=0,25$ | 4                  | 56,11                                                           | 68,13                                                | +17,6                               |
| <b>IDO2</b> | Τοιχοπλ.<br>ισχυρή<br>με άνοιγμα<br>θύρας<br>$I_a/I=0,25$  | 6                  | 60,62                                                           | 59,06                                                | -2,6                                |



**Εικ. 6:** Ο νόμος της πειραματικής συμπεριφοράς των πληρώσεων για μονοτονική φόρτιση

## 5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΟΙΓΜΑ

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια βήμα προς βήμα ανάλυση της απόκρισης δύναμης–μετατόπισης ή δυναμική ανάλυση χρονικής εξέλιξης μεγάλων κτιρίων με τοιχοπληρωμένα πλαίσια, προτείνεται ένα συνεχές προσομοίωμα δύναμης–παραμόρφωσης για τη τοχοποιία πλήρωσης με ανοίγματα. Η καθαρή απόκριση της πλήρωσης προσεγγίζεται με αφαίρεση του φορτίου του γυμνού πλαισίου για μια δεδομένη απόκλιση από την απόκριση του κάθε τοιχοπληρωμένου πλαισίου. Ο νόμος της πειραματικής συμπεριφοράς των πληρώσεων για τη περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης περιγράφεται με την τετραμερή καμπύλη της εικόνας (6). Οι παράμετροι ελέγχου του προσομοιώματος αυτού είναι:



**Εικ. 7:** Μεταβολή των παραμέτρων ελέγχου του προσομοιώματος ως προς την αντοχή της τοιχοποιίας

$K_1/K_{1S}$ , (Ανηγμένη αρχική δυσκαμψία ως προς αρχική δυσκαμψία πλήρους πλήρωσης),  $v_1 = V_{cr}/V_u$ , (Λόγος αντοχής ρηγμάτωσης προς οριακή αντοχή),  $\rho_1 = K_2/K_1$ , (Ανηγμένη δυσκαμψία κλάδου κράτυνσης),  $v_u/V_{us}$ , (Ανηγμένη οριακή αντοχή ως προς οριακή αντοχή πλήρους πλήρωσης),  $\rho_2 = K_3/K_1$ , (Ανηγμένη δυσκαμψία φθιτού κλάδου),  $v_2 = V_{res}/V_u$ , (Λόγος παραμένουσας αντοχής προς οριακή αντοχή). Στην εικόνα (7) παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμέτρων ελέγχου των χαρακτηριστικών μεγεθών του προσομοιώματος συναρτήσει της αντοχής της τοιχοπλήρωσης. Για την εφαρμογή του προσομοιώματος απαιτείται, σαν βάση, η γνώση της αρχικής δυσκαμψίας  $K_1$  και της οριακής αντοχής  $V_u$  της πλήρους τοιχοπλήρωσης.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το πειραματικό πρόγραμμα και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι δυνατόν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων, ακόμα και με ανοίγματα, μπορεί να βελτιώσει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των πλαισίων ως προς την αντοχή, δυσκαμψία, και απόσβεση ενέργειας. Το ποσοστό όμως της ενέργειας που απορροφάται με ανελαστική συμπεριφορά μειώνεται με την αύξηση της μετατόπισης αφού οι τοιχοπληρώσεις και όχι τα πλαίσια έχουν ένα άνω όριο στην απορρόφηση ενέργειας το οποίο εξαντλείται σε χαμηλές μετατοπίσεις.

Η χρησιμοποίηση πλήρωσης βελτιωμένης θλιπτικής αντοχής αλλά ίδιας περίπου διατμητικής αντοχής αμβλύνει την επιρροή των ανοιγμάτων και αυξάνει τη σεισμική ικανότητα. Η μέθοδος πλαστικής ανάλυσης με χρήση πολλαπλών αντηρίδων που προτάθηκε σ' αυτή τη μελέτη είναι ικανή να συλλάβει τους ενεργούς μηχανισμούς αστοχίας στις περισσότερες των περιπτώσεων και άρα μπορεί να εκτιμήσει την πλευρική αντίσταση ενός τοιχοπληρωμένου πλαισίου με ανοίγματα. Το συνεχές προσομοίωμα δύναμης-παραμόρφωσης για τη τοχοποιία πλήρωσης με ανοίγματα ως διαγώνιας αντηρίδας που προτάθηκε μπορεί να αποδώσει ορθά τον πραγματικό μηχανισμό αστοχίας και την επιρροή των παραμέτρων της γεωμετρίας των δοκιμών και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια βήμα προς βήμα ανάλυση της απόκρισης δύναμης-μετατόπισης ή δυναμική ανάλυση χρονικής εξέλιξης μεγάλων κτιρίων με τοιχοπληρωμένα πλαίσια. Αναδεικνύεται ο ενεργητικός ρόλος που μπορεί να παίξουν οι τοιχοπληρώσεις σε παλαιότερα κτίρια την ώρα του σεισμού, προσθέτοντας σημαντική αντοχή, δυσκαμψία και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (υστερητική απόσβεση), μέχρι το σημείο, βέβαια, που θα αρχίσουν να αποδιοργανώνονται. Όταν όμως θα έχουν αποδιοργανωθεί και η συμβολή τους στην αντίσταση του κτιρίου θα τείνει να μηδενισθεί, συγχρόνως και το ισχυρό τμήμα της δόνησης θα έχει περάσει, αφού η διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης των Ελληνικών σεισμών είναι γενικά μικρή. Ο ανωτέρω ενεργητικός ρόλος σπανίως λαμβάνεται υπόψη από τις μεθόδους στις οποίες συνήθως βασίζονται οι μελέτες τρωτότητας. Αυτό θα πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη και ειδικότερα στην περίπτωση περιμετρικών πλαισίων καθόσον οι διαχωριστικοί τοίχοι παλαιότερων κατασκευών είναι, κατά γενική ομολογία, αισθητά υψηλότερης αντοχής από αυτούς των σύγχρονων κατασκευών. Η αξία των συμπερασμάτων από την παρούσα εργασία αυξάνεται ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη και το προσφάτως δημοσιοποιηθέν συμπέρασμα μελέτης του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος ότι το 50% των κτιρίων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα πανελλαδικά που έχουν κατασκευαστεί πριν το 1985 σύμφωνα με τις κατά καιρούς ισχύουσες προδιαγραφές, είναι εν δυνάμει τρωτό σε μελλοντικό ισχυρό σεισμό, γιατί δεν πληροί τις νέες προδιαγραφές.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τη Διοίκηση του ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας για την οικονομική κάλυψη της πειραματικής εργασίας μέσω του τακτικού προϋπολογισμού του Ιδρύματος και της Επιτροπής Ερευνών του.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

CEN, (2004). *European Standard EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: Comite Europeen de Normalisation. Comite Euro - International du Beton, (1996). *Reinforced Concrete Infilled frames (Chapter 5). RC Frames under Earthquake Loading – State of the art report*, 231-284, London: Thomas Telford. Dritsos, S.E. (2005). Seismic Retrofit of Buildings. A Greek Perspective. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 38, No(3), 165-181.

Fardis Michael, N. (2009). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings, based on EN-Eurocode 8, Series: Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering*, Vol. 8, 369, Springer.

Fardis, M. N. & Panagiotakos, T. B. (1997). Seismic design and response of bare and masonry-infilled reinforced concrete buildings. Part II: Infilled structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(3), 475-503. FEMA 356, (2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Chapter 7: Masonry*, Washington, DC, pp. 7.23-7.29.

Kakaletsis, D. (2009). Analytical modelling of masonry infills with openings. *Structural Engineering and Mechanics, an International Journal*, 31(4), 423-437.

Kakaletsis, D.J. & Karayannis, C.G. (2007). Experimental investigation of infilled R/C frames with eccentric openings. *Structural Engineering and Mechanics, an International Journal*, 26(3), 231-250.

Kakaletsis, D.J. & Karayannis, C.G. (2008). Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. *Journal of Earthquake Engineering*. 12(2), 197-221.

Kakaletsis, D.J. & Karayannis, C.G. (2009). Experimental investigation of infilled R/C frames with concentric openings. *ACI Structural Journal*. 106(2), 132-141.

Karayannis, C.G., Kakaletsis, D.J. & Favvata, M.J. (2005). Behavior of bare and masonry infilled R/C frames under cyclic loading. Experiments and analysis. *Proceedings of the Fifth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures (ERES V)*, 429-438, Skiathos.

Maghaddam, H.A. & Dowling, P.J. (1987). *The State of the Art in Infilled Frames*. ESEE Research Report 87-2, 231-284.3, Civil Engineering Department, Imperial College, London.

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο **Δημήτριος Ι. Κακαλέτσης** είναι Καθηγητής, με γνωστικό αντικείμενο την «Σεισμική Συμπεριφορά και Αποκατάσταση Τοιχοπληρωμένων Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος», στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ και Μηχανικών Τοπογραφίας & Γεωπληροφορικής ΤΕ του ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας με έδρα τις Σέρρες. Υπήρξε Πρόεδρος του Τμήματος για το χρονικό διάστημα 2010-2014 και είναι υπεύθυνος του Εργαστηρίου Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος. Είναι Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π, με Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης .Π.Θ. στα «Νέα Υλικά και Τεχνολογίες στο Σχεδιασμό Έργων από Σκυρόδεμα» και Διδακτορικό Δίπλωμα .Π.Θ. στη «Διερεύνηση της συμπεριφοράς έναντι σεισμικών δράσεων πλαισίων ωπλισμένου σκυροδέματος με και χωρίς τοιχοποιίες». Έχει δημοσιευμένο επιστημονικό-ερευνητικό έργο, σε Διεθνή Περιοδικά και στα Πρακτικά Ελληνικών και Διεθνών Συνεδρίων, με 20 εργασίες και ανακοινώσεις σε θέματα Σεισμικής Συμπεριφοράς και Αποκατάστασης Κατασκευών με, άνω των 100, αναφορές από άλλους διεθνείς ερευνητές. Διατέλεσε κριτής άρθρων σε έξι (6) διεθνή περιοδικά αναγνωρισμένου κύρους και είναι μέλος της Επιτροπής Εκδόσεως διεθνούς περιοδικού (BENTHAM Science Publishers).

Ο **Χρήστος Γ. Καραγιάννης** είναι Πρόεδρος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΔΠΘ. Έχει σπουδάσει Πολιτικός Μηχανικός στο ΕΜΠ από όπου έλαβε το Χρυσobέργειο Βραβείο του έτους 1981. Διδάκτωρ του ΔΠΘ το 1984. Επισκέπτης καθηγητής στο Imperial College 1992-3. Είναι Καθηγητής από το 2000, του Τμ. Πολιτικών Μηχανικών του ΔΠΘ στις Κατασκευές Ωπλισμένου Σκυροδέματος και ειδικότερα στον αντισεισμικό σχεδιασμό, τις επισκευές και τη ανελαστική σεισμική συμπεριφορά. Υπήρξε διευθυντής των Εργαστηρίων Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Δομικών Υλικών, Μεταλλικών Κατασκευών. Υπεύθυνος το 1998 για την ίδρυση του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος στα «Νέα Υλικά και Τεχνολογίες στο Σχεδιασμό Έργων από Σκυρόδεμα» και διευθυντής του Προγράμματος από το 1998-2009, το οποίο λειτουργεί επιτυχώς έως σήμερα. Έχει εκλεγεί 3 φορές Πρόεδρος Του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ από το 1998 - σήμερα. Έχει επιβλέψει 4 Διδακτορικές Διατριβές εκ των οποίων οι 3 κάτοχοι κατέχουν Πανεπιστημιακές θέσεις. Κριτής άρθρων σε πολλά διεθνή περιοδικά και Συνέδρια αναγνωρισμένου κύρους. Είναι συγγραφέας 4 Πανεπιστημιακών βιβλίων. Είναι συγγραφέας ή συν-συγγραφέας 150 και πλέον επιστημονικών ερευνητικών εργασιών, πειραματικών και αναλυτικών, σε διεθνή περιοδικά υψηλού κύρους και Συνέδρια σε θέματα Αντισεισμικού Σχεδιασμού Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Σεισμικής Συμπεριφοράς Κατασκευών, Κόμβων Δοκών-Υποστυλωμάτων, Στρέψης Στοιχείων Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Προεντεταμένου Σκυροδέματος. Οι αναφορές στις εργασίες αυτές υπερβαίνουν τις 600. Ειδικότερα αναφέρεται ότι στο Scopus παρουσιάζονται περίπου 50 εργασίες του Χρ. Καραγιάννη, έχει h-factor 14 και 430 συνολικά αναφορές.