

**Πλαίσια από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα υπό Ανακυκλιζόμενη
Φόρτιση Ενισχυμένα με Χιαστί Ελκυστήρες:
Πειραματική και Υπολογιστική Διερεύνηση**
RC frames strengthened by tension-ties under cyclic loading:
Experimental and computational investigation

Άγγελος ΛΙΩΛΙΟΣ¹ και Κωνσταντίνος ΧΑΛΙΟΡΗΣ²

*Λέξεις κλειδιά: Σεισμική ενίσχυση φορέων ΩΣ, μονόπλευρη συμπεριφορά
ελκυστήρων, διατμητική ανεπάρκεια.*

*Key words: Seismic strengthening of RC structures, unilateral behavior of
tension-ties, shear inadequacy*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η ανακυκλιζόμενη καταπόνηση ενός μονώροφου δίστυλου πλαισίου ΩΣ, ενισχυμένου με δυο ελκυστήρες σε χιαστί διάταξη, εξετάζεται πειραματικά και υπολογιστικά. Το πλαίσιο αυτό έχει διαμόρφωση διαστάσεων και οπλισμών που παραπέμπουν σε παλαιότερες κατασκευές ΩΣ, χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό και με τυπικά προβλήματα διατμητικού χαρακτήρα, όπως ανεπάρκεια εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων) και μικρό λόγο διατμήσεως στα δομικά του στοιχεία. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην λειτουργία των ελκυστήρων, οι οποίοι έχουν μονόπλευρη συμπεριφορά, δηλ. μπορούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικές καταπονήσεις, αλλά δεν παραλαμβάνουν θλιπτικές. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβαλλόμενης αξονικής δύναμης, ιδιαίτερα της εναλλασσόμενης, θλιπτικής ή εφελκυστικής, στην συμπεριφορά των δομικών στοιχείων, στα υποστυλώματα και στη δοκό δεν εφαρμόζονται πρόσθετα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας. Πρώτα παρουσιάζονται η πειραματική διαδικασία και τα σχετικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια γίνεται υπολογιστική προσομοίωση των πειραμάτων με τη χρήση του υπολογιστικού κώδικα Ruaumoko, ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Διαπιστώθηκε μια ικανοποιητική σύμπτωση των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ γυμνού και ενισχυμένου πλαισίου αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης σεισμικής ενίσχυσης με ελκυστήρες.

¹ Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη, email: aliolios@civil.duth.gr

² Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη, email: chaliori@civil.duth.gr

ABSTRACT : The cyclic response of a single-span one-storey reinforced concrete (RC) frame, strengthened by two diagonal tension-ties, is investigated experimentally and computationally. This frame has dimensions and reinforcements that refer to old RC structures, without seismic design and with typical shear problems, such as inadequate transverse reinforcement and a small shear rate in the RC elements (columns and beams). Particular emphasis is given to the unilateral behaviour of the tension-ties, which can undertake tensile stresses, but not the compression ones. In order to be investigated the effects of variable axial forces on the structural elements behavior, additional gravity loads are not applied on the columns and the beam. The experimental process and related results are presented first. Computational simulation of the experiments is then performed using Ruaumoko computing code, based on the finite element method. A good coincidence of computational with experimental results was found. Finally, the comparison of the results between bare and reinforced frames demonstrates the effectiveness of the proposed seismic strengthening with tension-ties.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές υφιστάμενες πλαισιωτές κατασκευές από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα (ΩΣ), σε περιοχές και χώρες όπως η Ελλάδα με έντονη σεισμική δραστηριότητα, έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί είτε χωρίς αντισεισμικό κανονισμό, είτε χρησιμοποιώντας διατάξεις παλαιών αντισεισμικών κανονισμών. Ως γνωστόν, οι περισσότερες από τις κατασκευές αυτές έχουν ανεπαρκή σεισμική ικανότητα και η συμπεριφορά του φορέα έναντι σεισμού παρουσιάζει τοπικά ή συνολικά προβλήματα ανεπάρκειας. Έτσι, συχνά προκύπτει η ανάγκη για ενίσχυση της σεισμικής απόκρισης υφιστάμενων πλαισιωτών φορέων ΩΣ σε τοπικό ή συνολικό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διάφορων γνωστών μεθόδων τοπικής ή/και συνολικής ενίσχυσης, όπως μανδύες από ΩΣ ή από ινωπλισμένα πολυμερή, νέα εμφανιζόμενα τοιχώματα, κλπ., (Δρίτσος, 2005), (Tsonos, 2007), (Karayannis et al., 2008), (Fardis 2009), (Penelis and Penelis, 2014), (Καραγιάννης, 2014).

Στις παραδοσιακές μεθόδους ενίσχυσης πλαισίων ΩΣ συγκαταλέγεται και η χρήση ισχυρών χαλύβδινων δομικών στοιχείων, που μπορούν να παραλαμβάνουν και θλιπτικές καταπονήσεις χωρίς λυγισμό (buckling restrained braces, BRD), σε χιαστί διάταξη ή αλλιώς “X-bracings”, (Hemant et al., 2009), (Antonopoulos and Anagnostopoulos, 2010). Η ενίσχυση αυτή είναι μια σχετικά απλή, ταχεία και αποδοτική μέθοδος. Εφαρμογές αυτής της τεχνικής έχουν ήδη εφαρμοσθεί, μεταξύ άλλων, και στην Ελλάδα με στόχο τη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς υφιστάμενων πολυώροφων κτιρίων τύπου pilotis με την ενίσχυση μόνο των πλαισίων του ισογείου, (Αντωνόπουλος κ.ά., 2008).

Εναλλακτική τεχνική της προαναφερόμενης μεθόδου ενίσχυσης πλαισίων ΩΣ είναι η εφαρμογή χαλύβδινων ελκυστήρων σε χιαστί διάταξη (Τέγος κ.ά. 2009). Στην περίπτωση, όμως, αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται αυστηρά υπόψη η μονόπλευρη συμπεριφορά των ελκυστήρων, δεδομένου ότι αυτοί ενεργοποιούνται και μπορούν να παραλάβουν μόνο εφελκυστικές καταπονήσεις, ενώ σε θλιπτικές καταπονήσεις αδρανοποιούνται λόγω λυγισμού. Έτσι, στην μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, υπεισέρχονται και ανισοτικές συνθήκες για την

μονόπλευρη συμπεριφορά των ελκυστήρων, γεγονός που αυξάνει την μη γραμμικότητα του προβλήματος, βλ. (Λιώλιος και Χαλιορής, 2015), (Liolios and Chalioris, 2015), (Mistakidis and Stavroulakis, 1998).

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται πρώτα τα πειραματικά αποτελέσματα από την ανακυκλιζόμενη καταπόνηση ενός μονώροφου δίστυλου πλαισίου ΩΣ, δηλ. με δύο υποστυλώματα και μία δοκό. Το πλαίσιο αυτό έχει διαμόρφωση διαστάσεων και οπλισμών που παραπέμπουν σε παλαιότερη κατασκευή ΩΣ, χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό και με τυπικά προβλήματα διατμητικού χαρακτήρα, όπως ανεπάρκεια εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων) για περίσφιξη (εγκιβωτισμό) και μικρό λόγο διατμήσεως στα υποστυλώματα και στην δοκό, δηλ. πρόκειται για πλαίσιο με τυπική καμπτο-διατμητική συμπεριφορά.

Κατόπιν παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση για ένα πανομοιότυπο πλαίσιο, το οποίο έχει εξ αρχής ενισχυθεί με ένα ζεύγος χιαστί ελκυστήρων. Τονίζεται ότι και στα δυο πειράματα δεν φορτίζονται τα υποστυλώματα και η δοκός με πρόσθετα κατακόρυφα φορτία βαρύτητας, σε αντίθεση με παρόμοια πειράματα που αφορούσαν πλαίσια καμπτικού τύπου (Massumi et al, 2013), (Κακαλέτσης, 2007), (Karalis et al, 2011). Ο στόχος είναι να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβαλλόμενης αξονικής δύναμης, θλιπτικής ή εφελκυστικής, στην υστερητική συμπεριφορά των πλαισίων και ιδιαίτερα στην διατμητική αντοχή των δομικών στοιχείων. Ως γνωστόν, η ανωτέρω εναλλαγή προσήμου των αξονικών δυνάμεων συνήθως εμφανίζεται σε δομικά στοιχεία για μονώροφα κτίρια ή/και κτίρια με πολύ λίγους ορόφους, καθώς και σε παισιωτά δίστυλα βάθρα γεφυρών, ιδιαίτερα κατά την κατακόρυφη σεισμική τους καταπόνηση εγγύς πεδίου (Carydis, 2004).

Στη συνέχεια, γίνεται μια αριθμητική προσομοίωση των δυο πειραμάτων με τη χρήση του υπολογιστικού κώδικα Ruaumoko, (Carr, 2008). Τέλος, συγκρίνονται τα πειραματικά με τα υπολογιστικά αποτελέσματα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της σεισμικής ενίσχυσης υφισταμένων ΚΩΣ με ελκυστήρες.

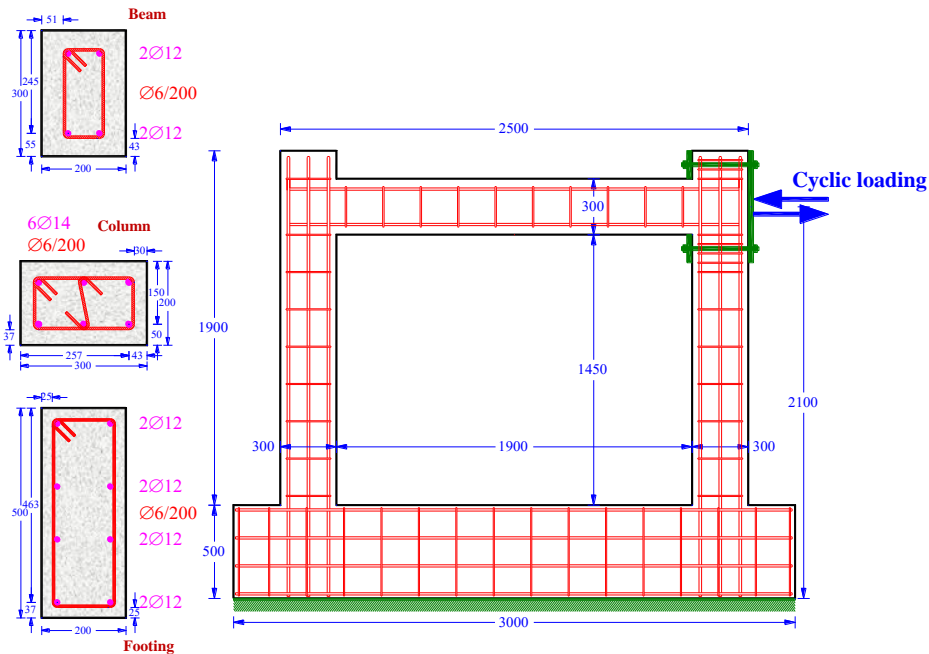
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η όλη πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στον ειδικό χώρο του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΔΠΘ που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή πειραμάτων μονότονης ή ανακυκλιζόμενης καταπόνησης (Καραμπίνης κ.ά., 2008). Για λεπτομέρειες της πειραματικής διερεύνησης, βλ. (Λιώλιος και Χαλιορής, 2016), (Liolios et al, 2017a).

Χαρακτηριστικά των δυο πλαισίων

Συνοπτικά, τα υπό εξέταση δοκίμια έχουν εξωτερικές διαστάσεις ανοίγματος 2.50 m και ύψους 1.90 m. Τα υποστυλώματα και η δοκός έχουν διαστάσεις διατομής 200 mm × 300 mm. Τα υποστυλώματα έχουν συμμετρικό διαμήκη οπλισμό 6Ø14 από νευροχάλυβα και εγκάρσιο οπλισμό (κοινοί κλειστοί συνδετήρες) Ø6/200 mm από λείο μαλακό χάλυβα. Η δοκός έχει συμμετρικό διαμήκη οπλισμό 4Ø12 από νευροχάλυβα και ομοίως συνδετήρες Ø6/200 mm. Οι οπλισμοί των πλαισίων φαίνονται αναλυτικά στο **Σχήμα 1**. Η μέση κυλινδρική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος την ημέρα της δοκιμής ήταν 30.8 MPa.

Σημειώνεται ότι ο λόγος διάτμησης των υποστυλωμάτων είναι μικρός και ίσος με $\alpha_s = M_{Ed}/(V_{Ed} h) = L_s/h = 0.8/0.30 = 2.67 (> 2)$. Επίσης ο λόγος καθαρού ύψους του υποστυλώματος προς τη μέγιστη διάστασή του είναι: $1.45/0.30 = 4.8 (> 3)$. Συνεπώς, τα υποστυλώματα θεωρούνται ως διατμητικά στοιχεία (Penelis and Kappos 1997), (Salonikios et al. 2000), (Penelis and Penelis, 2014).



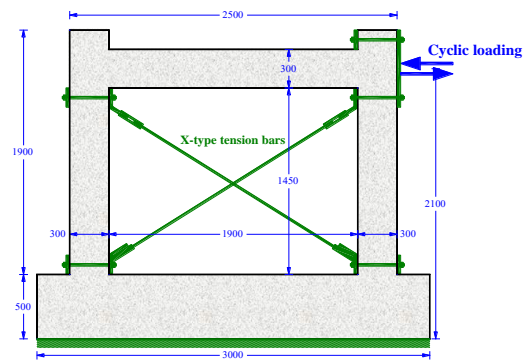
Σχήμα 1. Διαστάσεις και οπλισμοί πλαισίων

Το πρώτο πλαίσιο δοκιμάστηκε χωρίς να ενισχυθεί (γυμνό δοκίμιο ελέγχου). Το δεύτερο πλαίσιο ενισχύθηκε με δύο διαγώνια τοποθετημένες ράβδους - ελκυστήρες διαμέτρου $\varnothing 16$ υπό χιαστί διάταξη, όπως φαίνεται λεπτομερώς στο **Σχήμα 2**. Ο χάλυβας των ελκυστήρων είναι St 46. Οι χιαστί ράβδοι τοποθετήθηκαν πάνω στα πλαίσια με μεταλλικά κολάρια και με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν μόνο σε εφελκυσμό, ως ελκυστήρες. Το όριο αστοχίας σε ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) μετρήθηκε και είναι 1.118% για τον ανερχόμενο (από αριστερά προς δεξιά) ελκυστήρα, και 0.958% για τον κατερχόμενο (από αριστερά προς δεξιά) ελκυστήρα.

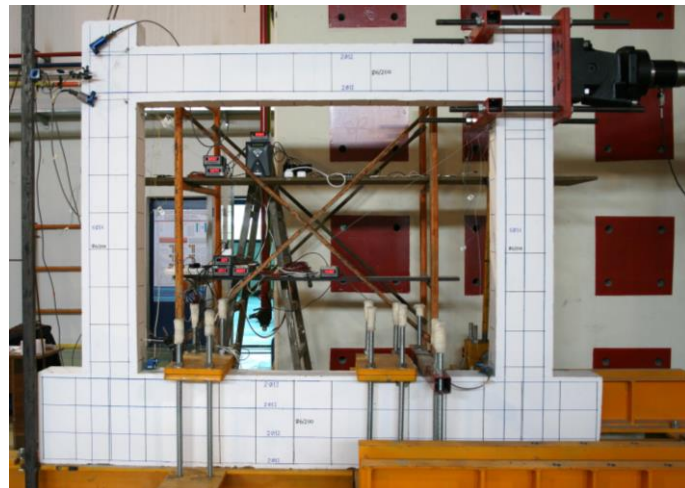
Πειραματική διάταξη και ιστορικό φόρτισης

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην φωτογραφία του **Σχήματος 3**. Το σύστημα φόρτισης είναι εξοπλισμένο με στατικά έμβολα δυναμικότητας έως 200 kN, με σερβοϋδραυλικό έμβολο (τύπου MTS 244.41) 500 kN και συνολικής διαδρομής 500 mm (± 250 mm). Το σερβοϋδραυλικό έμβολο συνδέεται με ξεχωριστή ενδιάμεση μονάδα υδραυλικού ελέγχου τύπου MTS HSM 293.11A01 ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του (Καραμπίνης κ.ά. 2008). Η μεταφορά του φορτίου εμβόλου κατά τη φάση εφελκυσμού στον φορτιζόμενο κόμβο γίνεται με συμμετρικό τρόπο ως προς την

δοκό, βλ. **Σχήμα 3.** Έτσι, παρότι μπορεί να αλλοιώνεται τοπικά η ένταση στις δυο περιοχές φόρτισης, στον φορτιζόμενο κόμβο επιβάλλεται συνολικά η προβλεπόμενη μετατόπιση.



Σχήμα 2. Διαστάσεις και λεπτομέρειες του ενισχυμένου πλαισίου

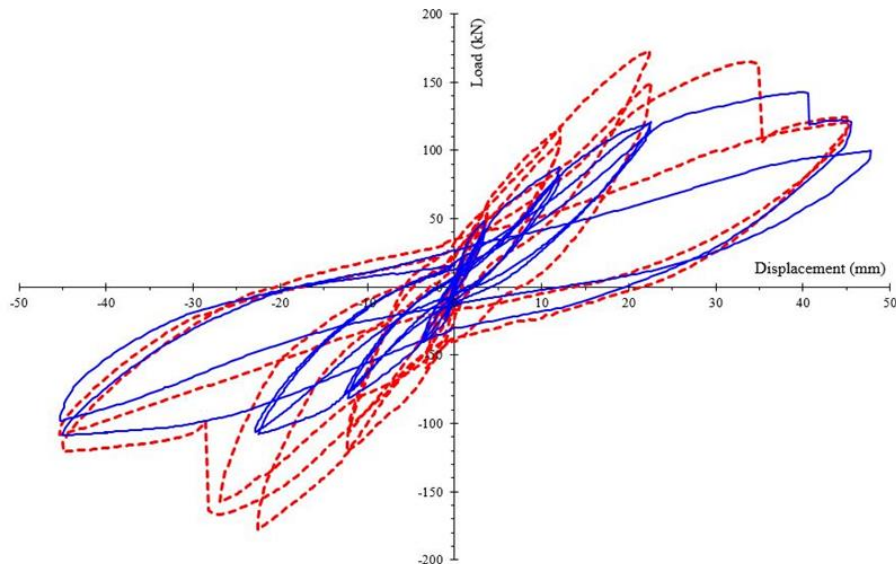


Σχήμα 3. Πειραματική διάταξη για τη δοκιμή των πλαισίων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Το ιστορικό φόρτισης που εφαρμόστηκε και στα δύο πλαίσια αποτελείται από πέντε διαφορετικά και συνεχώς αυξανόμενα βήματα φόρτισης στα ± 1.0 , ± 3.5 , ± 12.0 , ± 22.5 και ± 45.5 mm και από δύο ίσους κύκλους φόρτισης σε κάθε βήμα.

Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα αφενός του πρώτου πλαισίου (γυμνού, χωρίς ενίσχυση) και αφετέρου του δευτέρου πλαισίου (με ενίσχυση) παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5** υπό μορφή υστερητικού διαγράμματος επιβαλλόμενης δύναμης και μετατόπισης του άκρου της δοκού του πλαισίου. Σημειώνεται ότι για την διάγνωση των βλαβών και τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στην εργασία (Βουτετάκη κ.ά., 2018).



Σχήμα 5. Συγκριτικό υστερητικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης πλαισίου ενισχυμένου με ελκυστήρες (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές) προς το γυμνό πλαίσιο χωρίς ελκυστήρες (συνεχείς μπλέ γραμμές).

Η αύξηση του παραλαμβανομένου φορτίου λόγω της ενίσχυσης με ελκυστήρες φαίνεται στο **Σχήμα 5**, που δείχνει τη σύγκριση των υστερητικών αποκρίσεων των δυο εξεταζόμενων πλαισίων. Συγκρίνοντας τις μέγιστες τιμές παραλαμβανομένου φορτίου, συμπεραίνεται ότι αυτό έχει αυξηθεί από 141 kN σε 178 kN λόγω της ενίσχυσης με ελκυστήρες. Έτσι, έχει επιτευχθεί αύξηση του παραλαμβανομένου φορτίου κατά περίπου 26% λόγω της ενίσχυσης.

Στο **Σχήμα 6** φαίνεται σε φωτογραφία η αστοχία διατμητικού χαρακτήρα που παρουσίασε το πλαίσιο ελέγχου (χωρίς ενίσχυση) κατά τον πρώτο θετικό κύκλο του πέμπτου βήματος φόρτισης. Η αστοχία αυτή προκάλεσε αντίστοιχη μείωση της ικανότητας του πλαισίου να παραλάβει φορτίο, η οποία φαίνεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 5** (συνεχείς μπλέ γραμμές).

Ανάλογα, τα πειραματικά αποτελέσματα του δευτέρου πλαισίου (με ενίσχυση) παρουσιάζονται σε φωτογραφία στο **Σχήμα 7**, όπου φαίνονται αφενός η απουσία αστοχίας διατμητικού χαρακτήρα και αφετέρου οι σχηματισθείσες ρωγμές κατά την αστοχία.



Σχήμα 6. Διατμητική μορφή αστοχίας του πλαισίου ελέγχου (γυμνού, χωρίς ενίσχυση).



Σχήμα 7. Το ενισχυμένο πλαίσιο μετά την αστοχία των ελκυστήρων.

Ειδικότερα, στο **Σχήμα 5** (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές) φαίνονται οι μειώσεις του παραλαμβανομένου φορτίου λόγω αστοχίας των ελκυστήρων. Συγκεκριμένα, η πρώτη μείωση εμφανίζεται στον πρώτο θετικό κύκλο του πέμπτου βήματος φόρτισης, όταν η μετατόπιση είναι περίπου 35 mm, εξαιτίας της αστοχίας του ανερχόμενου (από αριστερά προς δεξιά) ελκυστήρα. Αμέσως μετά ακολουθεί η δεύτερη μείωση, η οποία επιτυγχάνεται σε μετατόπιση ίση με περίπου 30 mm του προσεχούς πρώτου αρνητικού κύκλου του πέμπτου βήματος φόρτισης λόγω της αστοχίας του κατερχόμενου (από αριστερά προς δεξιά) ελκυστήρα. Πάντως, η φωτογραφία ρωγμών του ενισχυμένου πλαισίου που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 7** δείχνει ότι έχει αποφευχθεί η κρίσιμη διατμητική αστοχία του αριστερά υποστυλώματος, ενώ έχουν σχηματιστεί δύο διακριτές

περιοχές με πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα της δοκού, και οι δύο κόμβοι του πλαισίου παρέμειναν σε άθικτη και πρακτικά ελαστική κατάσταση. Η ενίσχυση, λοιπόν, με ελκυστήρες βελτίωσε την πλαστική συμπεριφορά του πλαισίου. Επειδή η δοκός διαθέτει διαμήκη οπλισμό 4Φ12 ενώ τα υποστυλώματα έχουν περισσότερο διαμήκη οπλισμό, 6Φ14, οι καμπτικές πλαστικές αρθρώσεις εμφανίστηκαν στα άκρα της δοκού, και όχι του υποστυλώματος. Σημειώνεται ότι τόσο η δοκός, όσο και τα υποστυλώματα, έχουν ίδιες διαστάσεις διατομής (200mm x300mm).

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Για την πειραματική διερεύνηση που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, έγινε μια αριθμητική προσομοίωση με εφαρμογή του υπολογιστικού κώδικα Ruaumoko (Carr 2008). Ο κώδικας βασίζεται στις γνωστές αριθμητικές μεθόδους της μη-γραμμικής Στατικής και Δυναμικής Ανάλυσης των Κατασκευών. Εφαρμόζεται διπλή διακριτοποίηση, αφενός στον χώρο με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και αφετέρου στον χρόνο με άμεση μέθοδο χρονικής ολοκλήρωσης. Λόγω οικονομίας χώρου, εδώ γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της υπολογιστικής διερεύνησης, για λεπτομέρειες βλ. (Liolios and Chalioris, 2017b).

Στην παρούσα υπολογιστική διερεύνηση χρησιμοποιούνται τα πεπερασμένα στοιχεία δοκού-υποστυλώματος για πλαίσια ΩΣ του κώδικα Ruaumoko, τα οποία έχουν συγκεντρωμένη την μη-γραμμικότητα στα δυο άκρα με την μορφή πλαστικών αρθρώσεων (Carr, 2008). Για την προσομοίωση των ελκυστήρων χρησιμοποιούνται ράβδοι-ελατήρια με τον διγραμμικό κανόνα υστερητικής χαλάρωσης (bilinear with slackness hysteresis). Σημειώνεται ότι δεν προτιμήθηκε η χρήση λεπτομερειακών μικροστοιχείων, που εφαρμόστηκαν σε άλλες εργασίες προσομοίωσης πειραμάτων για δίστυλα μονώροφα πλαίσια, π.χ. (Massumi et al, 2013), (Karalis et al, 2011). Αυτό έγινε σύμφωνα και με την ανάλυση από τον καθηγητή Μ. Φαρδή στις εργασίες (Φαρδής, 2008), (Fardis, 2009), (Fardis, 2010) σχετικά με την πρακτική χρησιμότητα των συνήθων πεπερασμένων (μακρο)στοιχείων για αναλύσεις πραγματικών πολυωρόφων κτιρίων ΩΣ. Σχετικά με την διατμητική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων, την επίδραση της αξονικής δύναμης N στην διατμητική αντοχή και τον έλεγχο για καμπτική ή διατμητική αστοχία, βλ. (Liolios and Chalioris, 2017b), όπου χρησιμοποιείται και σχετική ανάλυση από (Makarios, 2013). Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με (KAN.ΕΠΕ, 2012), βλ. (Makarios, 2013), η διαθέσιμη ανακυκλιζόμενη διατμητική αντοχή δίνεται από τον τύπο

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot \left[\frac{(h-x)\lambda_1}{2L_s} + (1-0.05\lambda_2) \cdot \left[0.16\lambda_3(1-0.16\lambda_4) A_c \sqrt{f_{cm}/CF + V_w} \right] \right]. \quad (1)$$

όπου: $\lambda_1 = \min(N, 0.55A_c f_{cm}/CF)$; $\lambda_2 = \min\left(5, \mu_{\Delta}^p\right)$; $\lambda_3 = \max(0.5, 100\rho_{tot})$;

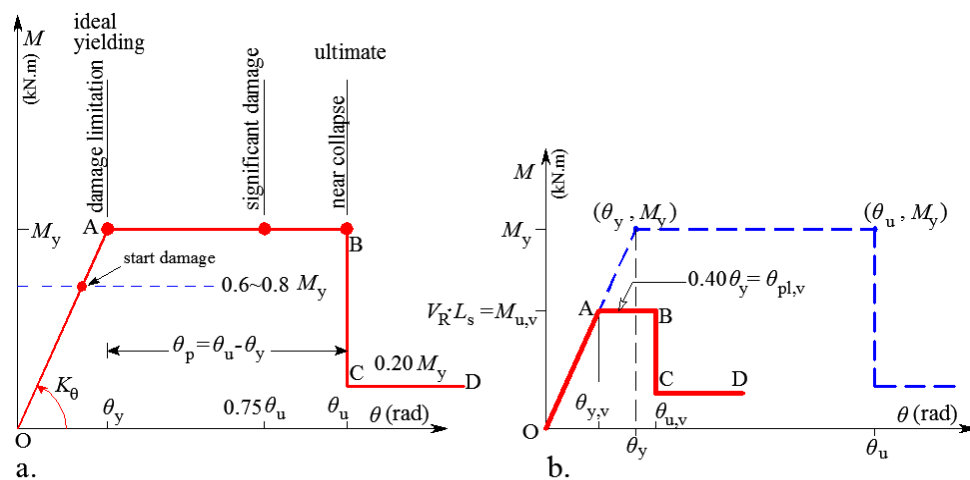
$\lambda_4 = \min(5, a_s)$. Για την επεξήγηση των συμβολισμών βλ. (KAN.ΕΠΕ, 2012), (Makarios, 2013). Η αξονική δύναμη N , σε [MN], είναι θετική όταν είναι θλιπτική και συνυπολογίζεται η επιρροή της, αλλά λαμβάνεται με μηδενική τιμή όταν είναι εφελκυστική. Στην υπολογιστική διερεύνηση των δυο πλαισίων, και λόγω της απουσίας

προσθέτων κατακορύφων φορτίων βαρύτητας στα δυο υποστυλώματα και στη δοκό, οι αξονικές δυνάμεις εμφάνισαν εναλλασσόμενο πρόσημο και είχαν εύρος τιμών της τάξης (-118 kN) με (+50 kN).

Αφετέρου, για τον υπολογισμό της ενεργούς δυσκαμψίας κατά (KAN.ΕΠΕ, 2012):

$$E_c I_{\text{eff}} = \frac{M_y \cdot L_s}{3 \cdot \theta_y} \quad (2)$$

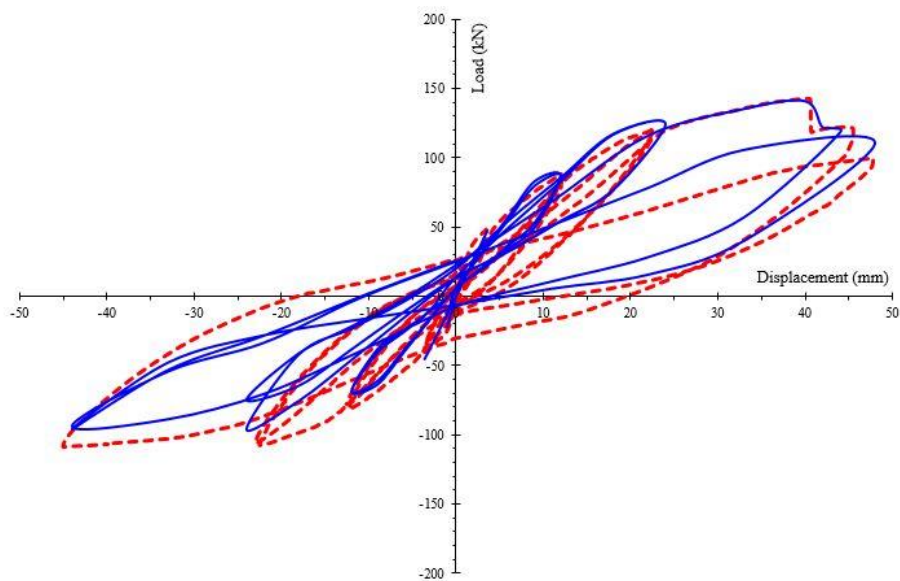
και ανάλογα με το εάν η καμπτική αστοχία προηγείται της διατμητικής ή όχι, γίνεται χρήση του **Σχήματος 8**.



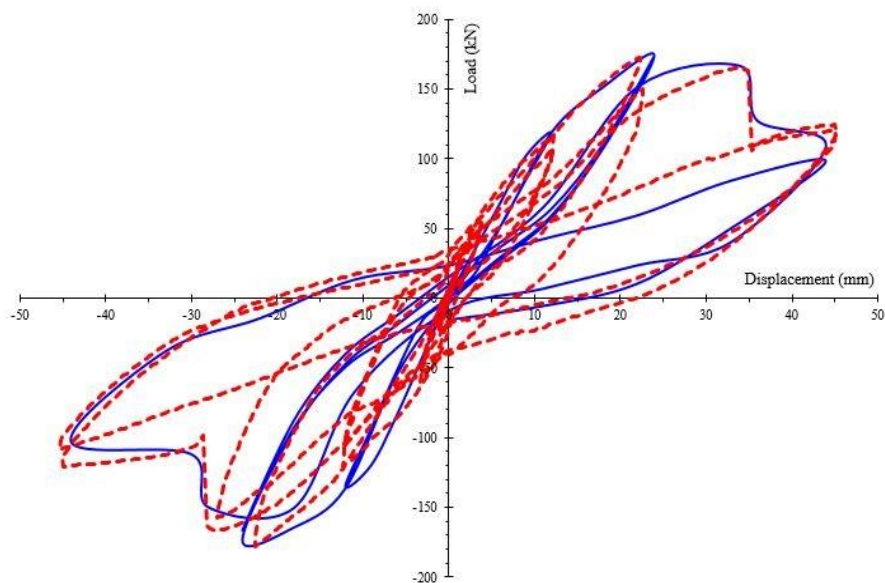
Σχήμα 8. Διάγραμμα Ροπών-Στροφών Χορδής (a) για καμπτική αστοχία, και (b) για διατμητική αστοχία, (Makarinos, 2013).

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στα **Σχήματα 9** και **10** συγκρίνονται τα πειραματικά με τα υπολογιστικά αποτελέσματα για το γυμνό και το ενισχυμένο πλαίσιο, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται μια πολύ ικανοποιητική σύμπτωση τους, πράγμα που τεκμηριώνει την αξιοπιστία της προτεινόμενης υπολογιστικής διαδικασίας με χρήση του υπολογιστικού κώδικα Ruaumoko (Carr 2008). Επιπλέον, η αύξηση του παραλαμβανομένου φορτίου από 141 kN στο γυμνό σε 178 kN στο ενισχυμένο πλαίσιο αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της σεισμικής ενίσχυσης υφισταμένων ΚΩΣ με ελκυστήρες.



Σχήμα 9. Γυμνό πλαίσιο (χωρίς ελκυστήρες): Σύγκριση του υπολογιστικού (συνεχείς μπλέ γραμμές) υστερητικού διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης με το αντίστοιχο πειραματικό (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές).



Σχήμα 10. Ενισχυμένο πλαίσιο (με ελκυστήρες): Σύγκριση του υπολογιστικού (συνεχείς μπλέ γραμμές) υστερητικού διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης με το αντίστοιχο πειραματικό (διακεκομμένες κόκκινες γραμμές).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η πειραματική και η υπολογιστική διερεύνηση που παρουσιάστηκαν απέδειξαν ότι η ενίσχυση πλαισιωτών κατασκευών ΩΣ με ελκυστήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά και στην περίπτωση υφιστάμενων παλαιών κατασκευών με προβλήματα διατμητικής συμπεριφοράς. Επιπλέον, η ικανοποιητική σύμπτωση των υπολογιστικών με τα πειραματικά αποτελέσματα τεκμηριώνει την αξιοπιστία της προτεινόμενης υπολογιστικής διαδικασίας και επιτρέπει την πρακτική της αξιοποίησης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αντωνόπουλος, Θ., Αναγνωστόπουλος, Σ. και Τσίρλης, Φ. (2008), “Αποτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς Παλαιών Κτιρίων με Pilotis και Δυνατότητες Απλών Ενισχύσεων”, *Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*, ΤΕΕ, ΕΤΑΜ, ΕΜΠ, Αθήνα, Άρθρο 2061.

Βουτετάκη, Μ.-Σ.Ε., Χαλιωτής, Κ.Ε., Καραγιάννης, Χ.Γ. & Προβιδάκης, Κ.Π., “Ένα νέο ασύρματο σύστημα ελέγχου δομικής ακεραιότητας και βλαβών στοιχείων ΩΣ έναντι σεισμικών δράσεων”, *Πρακτικά 18ου Συνεδρίου Σκυροδέματος*, Αθήνα (2018).

Δρίτσος, Σ. (2005), “Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”, 3η έκδοση, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

ΕΑΚ 2000 - *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός*, Εκδ. ΣΙΔΕΝΟΡ, εποπτεία ΣΠΙΜΕ και ΟΑΣΠ, Αθήνα.

ΕΚΩΣ 2000 - *Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος*, Εκδ. ΣΙΔΕΝΟΡ, εποπτεία ΣΠΙΜΕ και ΟΑΣΠ, Αθήνα.

Κακαλέτσης, Δ. (2007), *Διερεύνηση της συμπεριφοράς ορθογωνικών τοιχοπληρωμένων πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος με ανοίγματα υπο μεγάλου εύρους οριζόντιες κυκλικές μετατοπίσεις*. Διδακτορική Διατριβή, Τμ. Πολ. Μηχ. Δ.Π.Θ., Ξάνθη.

ΚΑΝ.ΕΠΕ (2012-14). Κανονισμός Επεμβάσεων. Ο.Α.Σ.Π., Αθήνα.

Καραγιάννης, Χ.Γ. (2014), “Σχεδιασμός - Συμπεριφορά Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα έναντι Σεισμού”, Εκδ. Σοφία, Θεσσαλονίκη.

Καραμπίνης, Α., Ρουσάκης Θ. και Λάππα, Μ. (2008), “Δ.Π.Θ., Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομικών Κατασκευών, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος”, *Τεχνικά Χρονικά*, Τόμος 28, Τεύχος II-III.

Λιόλιος, Αγγ. και Χαλιωτής, Κ. (2015), “Βιομηχανικά Κτίρια από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα Ενισχυμένα με Ελκυστήρες: Μια Αριθμητική Αποτίμηση της Απόκρισης για Σεισμικές Ακολουθίες”. Μοροπούλου Α. (εκδ.), *Πρακτικά Επιστημονικού Συνεδρίου στην Επιστημονική Υποστήριξη στη Λήψη Αποφάσεων για Αειφόρα και Συμβατά Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης και Προστασίας της Πολιτιστικής Κληρονομιάς*, Πρόγραμμα «ΘΑΛΗΣ-ΑΕΙΣ», ΕΜΠ, Αθήνα, σελ. 244-257.

Λιόλιος, Αγγ. και Χαλιωτής, Κ. (2016), «Δοκιμή Πλαισίου από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα υπό Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση - Ενίσχυση με Χιαστί Ελκυστήρες». *Πρακτικά ΕΠΕΣ, Πανελλ. Συν. Σκυροδέματος «Κατασκευές από Σκυρόδεμα»*, Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμ. 2016.

Πανατζοπούλου, Σ. (2001). “Εισαγωγή στον Σχεδιασμό Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα έναντι Οριακών Καταστάσεων”, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.

Τέγος, Ι., Λιάκος, Γ., Τέγου, Σ., Ρουπακιάς, Γ. και Στυλιανίδης, Κ. (2009), “Μία Εναλλακτική Πρόταση Αντισεισμικής Ενίσχυσης Υφιστάμενων Οικοδομών Ο/Σ μέσω Ελκυστήρων”, *Πρακτικά 16ου Πανελληνίου Συνεδρίου Σκυροδέματος*, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος.

- Φαρδής, Μ. (2008), Πρακτική μη-Γραμμική Προσομοίωση και Ανάλυση Σεισμικής Απόκρισης Κτιρίων Οπλισμένου Σκυροδέματος, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα.
- Carr, A.J. (2008), "RUAUMOKO - Inelastic Dynamic Analysis Program", Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Carydis, P. (2004). "The effect of the vertical earthquake motion in near field". 8th Intern. Conf. on Structures Under Shock and Impact, SUSI VIII, N. Jones & C.A.Brebbia (Editors), WIT Press, 267-282.
- Fardis, M.N. (2009), "Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings - Based on EN-Eurocode 8". Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Vol. 8, Springer, Netherlands.
- Fardis M.N. (2010), "Modelling of concrete buildings for practical nonlinear seismic response analysis", Architecture, Civil Engineering, Environment Journal, Silesian University of Technology, 3(1), 31-46.
- Karalis, A. A., Georgiadi-Stefanidi, K. A., Salonikios, T. N., Stylianidis, K. C., & Mistakidis, E. S. (2011). *Experimental and numerical study of the behaviour of high dissipation metallic devices for the strengthening of existing structures*. In: M. Papadrakakis et al, (eds.), *Proceedings of COMPDYN 2011, ECCOMAS: Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, 26–28 May 2011.
- Karayannis, C.G. and Chalioris, C.E. (2008), "Strengthening and Rehabilitation of RC Beam-Column Joints using Carbon-FRP Jacketing and Epoxy Resin Injection", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 5, pp.769-790.
- Liolios, A. and Chalioris, C. (2015), "Reinforced Concrete Frames Strengthened by Cable Elements under Multiple Earthquakes: A Computational Approach Simulating Experimental Results", *Proceedings of 8th GRACM International Congress on Computational Mechanics*, Volos, pp. 12-15.
- Liolios A., Eftymiopoulos P., Mergoupis T., Rizavas V. and Chalioris C. E. (2017a). *Reinforced concrete frames strengthened by tension-tie elements under cyclic loading: Experimental investigation*. In: Papadrakakis, M. et al (eds.), *Proceedings of COMPDYN 2017: Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, paper C18197.
- Liolios A. and Chalioris C. (2017b). "Reinforced concrete frames strengthened by cable elements under cyclic loading: A computational approach simulating experimental results". In: Papadrakakis, M. et al (eds.). *Proceedings of COMPDYN 2017: Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, paper C18195.
- Makarios T. (2013), "Modelling of characteristics of inelastic members of reinforced concrete structures in seismic nonlinear analysis", Ch. 1, pp. 1-41, In: G. Padovani and M. Occhino (Editors): *Focus on Nonlinear Analysis Research*, Nova Publishers, New York.
- Massumi, A. and Absalan, M. (2013). *Interaction between bracing system and moment resisting frame in braced RC frames*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(2), 260-268.
- Mistakidis, E.S. and Stavroulakis, G.E., (1998). "Nonconvex Optimization in Mechanics. Smooth and Nonsmooth Algorithms", *Heuristic and Engineering Applications*. Kluwer, London.
- Penelis, G.G. and Kappos, A.J. (1997), "Earthquake-Resistant Concrete Structures", E&FN Spon (Chapman & Hall), London.
- Penelis, G.G. and Penelis, Greg., (2014). "Concrete Buildings in Seismic Regions", CRC Press, Taylor & Francis Ltd.
- Salonikios, T.N., Kappos, A.J., Tegos, I.A. and Penelis, G.G. (2000), "Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls: Failure Modes, Strength and Deformation Analysis, and Design Implications", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 1, pp. 132-142.
- Tsonos, A.-D.G. (2007), "Cyclic Load Behavior of RC Beam-Column Subassemblages of Modern Structures", *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 4, pp. 468-478.