

Αξιολόγηση Δομικής Επάρκειας Υποστυλώματος Ο/Σ υπό σεισμικά φορτία

Seismic assessment of a reinforced concrete column under
seismic loads

Μαρία ΜΠΑΣΔΕΚΗ¹, Αργυρώ ΔΡΑΚΑΚΑΚΗ², Χάρης
ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ³

*Λέξεις κλειδιά: Δομική επάρκεια, βλάβη διάβρωσης, καμπύλες υστέρησης.
Key Words: Seismic assessment, corrosion damage, hysteretic curves.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ως γνωστό, οι συνέπειες της διάβρωσης του σιδηροοπλισμού των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, συνιστούν παράγοντα υποβάθμισης της σεισμικής απόκρισης των δομών. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της σεισμικής μηχανικής δοκιμής δύο υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος, υπό σταθερό θλιπτικό φορτίο. Πριν τις μηχανικές δοκιμές, σε ένα εκ των υποστυλωμάτων επιβλήθηκε επιταχυμένη διάβρωση στο κατώτερο άκρο του (σε ύψος 60cm από τη βάση). Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάστηκαν, αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν οι καμπύλες υστέρησης των δύο υποστυλωμάτων (σε όρους αντοχής – μετακινήσεων – δαπανώμενης ενέργειας). Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο γεγονός ότι η βλάβη διάβρωσης κάθε μιας εκάστης ράβδου σιδηροοπλισμού, καταγράφηκε ανισοβαρής.

ABSTRACT:

As it is widely known, corrosion constitutes a major deterioration factor for structures which are located on coastal areas. Corrosion has a great impact on both durability and seismic performance of reinforced concrete structures. In the present study an effort was made to simulate the seismic mechanical test, under constant compressive loads of two identical reinforced concrete columns. Prior to the mechanical testing initiation, accelerated corrosion was applied to the protruding area (at a height of 60 cm from the base) of one of the two columns. At the end of the experimental procedure, the hysteresis curves of the two samples (in terms of strength-displacement – energy) were presented and analyzed. Analyzing the results, more attention was paid to the fact that the corrosion damage recorded on the steel bars examined, was lopsided.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρότι οι συνέπειες της βλάβης διάβρωσης του σιδηροοπλισμού των κατασκευών είναι γνωστή (πτώση των μηχανικών του χαρακτηριστικών και της συνάφειας), εν τούτοις η απόκριση της επιστημονικής κοινότητας στην εν λόγω θεματική υπήρξε

¹ Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ Πανεπιστημίου Πατρών, email: mbasdeki@upnet.gr

² Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ Πανεπιστημίου Πατρών, email: drakakaki@upatras.gr

³ Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: charrisa@upatras.gr

ιδιαίτερα καθυστερημένη και συνδέεται με τις καταγραφές φαινομένων γήρανσης υφισταμένων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο βαθμός της διάβρωσης του σιδηροοπλισμού και η συνεπακόλουθη μείωση της αντοχής του σε σεισμικά φορτία, τόσο του υλικού του χάλυβα όσο και ίδιου του δομικού στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος, επιβάλλει την αξιολόγηση της απομένουσας μηχανικής επάρκειας του και τον ορισμό κατάλληλων (συμβατών) τεχνικών αποκατάστασης ή και ενίσχυσης.

Παρόλα αυτά, οι πολιτικοί μηχανικοί φαίνεται να έχουν μια δικαιολογημένη δυσκολία αξιολόγησης της σεισμικής επάρκειας των υφιστάμενων κατασκευών. Και τούτο καθώς το φαινόμενο της γήρανσης των κατασκευών συνδέεται στενά με τη βλάβη διάβρωσης που είναι πολύπλοκο να αποτιμηθεί (στο ίδιο το υλικό κυρίως όμως στο δομικό στοιχείο του οπλισμένου σκυροδέματος). Αν και η βλάβη διάβρωσης λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών αποτελεί φαινόμενο που βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το χρόνο, εντούτοις, δεν έχει συμπεριληφθεί στις απαιτήσεις των κανονισμών (Ευρωκώδικα 2 (EC2) και Κανονισμό Επεμβάσεων). Επομένως, οι μηχανικοί που ασχολούνται με την αποκατάσταση των υφιστάμενων κατασκευών (προσεισμικά είτε μετασεισμικά), δεν διαθέτουν τα απαιτούμενα εργαλεία για την πρόβλεψη της απομένουσας αντοχής της κατασκευής μέσω καταστατικών νόμων.

Παρόλα αυτά, οι λόγοι της αδυναμίας (τουλάχιστον προς το παρόν) κωδικοποίησης της βλάβης διάβρωσης στους κανονισμούς, παραμένουν απολύτως δικαιολογημένοι. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι η βλάβη διάβρωσης του σιδηροοπλισμού των υποστυλωμάτων υφισταμένων κατασκευών, ποικίλει από πλευρά σε πλευρά και από ράβδο σε ράβδο κάθε δομικού στοιχείου. Συνεπώς εύλογα εισάγεται προς συζήτηση η πολυπλοκότητα ανάλυσης και ο προβληματισμός όσον αφορά στη σεισμική συμπεριφορά των δομικών αυτών στοιχείων.

Είναι γνωστό ότι η ανισοβαρής βλάβη διάβρωσης των σιδηροοπλισμών, συνδέεται με ανάλογη τοπική βλάβη της επικάλυψης(σκυροδέματος), γεγονός που προσδιορίζει εν τέλει και την ασθενέστερη περιοχή του εκάστοτε δομικού στοιχείου (π.χ υποστυλώματος). Η αύξηση δε της διαφοράς βλάβης διάβρωσης στις ράβδους σιδηροοπλισμού του ίδιου υποστυλώματος, συνδέεται στενά με την μηχανική του απόδοση κάτω από ισχυρά σεισμικά συμβάντα. Εν κατακλείδι, ο βαθμός διαφοροποίησης της μηχανικής απόδοσης κάθε πλευράς υποστυλώματος, γίνεται εντονότερος με το επίπεδο της διάβρωσης του σιδηροοπλισμού σε κάθε πλευρά του.

Πρόσφατη σχετική εργασία Guo A.X.et al (2015) αναφέρεται στην επίδραση της διάβρωσης στην πλαστική άρθρωση υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου είχαν επιβληθεί συνθήκες ισχυρού παράκτιου περιβάλλοντος που επέφεραν διαφορετικού βαθμού διάβρωση στον σιδηροοπλισμό. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, έδειξαν ότι η μηχανική υποβάθμιση στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης τους στη βάση των υποστυλωμάτων, είχε ως συνέπεια η πλευρική μετατόπιση (ανάπτυξη) των διαβρωμένων υποστυλωμάτων να αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που συνδέθηκε με την υποβαθμισμένη σεισμική τους συμπεριφορά.

Πολλές περιοχές του Ελλαδικού χώρου συνδυάζουν έντονη σεισμικότητα και θαλάσσιο περιβάλλον. Παράλληλα, σημαντικό τμήμα του κτιριακού αποθέματος συνιστούν κατασκευές με κοινά αρνητικά χαρακτηριστικά όπως: έλλειψη πρόβλεψης προδιαγραφών αναφορικά με την αντοχή των υλικών στις συνθήκες περιβαλλοντικής έκθεσης – επίπεδο έκθεσης τύπου XS1 κατά EN206 – χαμηλή ποιότητα σκυροδέματος, χρήση σκυροδέματος με μεγαλύτερη αναλογία νερού προς τσιμέντο, δομικά στοιχεία με μικρές επικαλύψεις του σιδηροοπλισμού. Εν κατακλείδι, οι κατασκευές εκείνης της περιόδου έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό τη σεισμική ευαισθησία, καθώς μελετήθηκαν κυρίως για τα κατακόρυφα φορτία και δευτερευόντως για τα οριζόντια, τα οποία στην πραγματικότητα δεν λάμβαναν υπόψη τον κίνδυνο έναντι σεισμού, σε αντίθεση με τη φιλοσοφία των πρόσφατων κανονισμών.

Με βάση τα ανωτέρω εκτεθέντα, στην παρούσα πειραματική μελέτη, αποτιμήθηκε η σεισμική απόδοση δύο υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε ένα εκ των οποίων προηγουμένως είχε επιβληθεί επιταχυνόμενη διάβρωση. Αναλύθηκαν οι καμπύλες υστέρησης τους, ο δείκτης πλαστιμότητας και ο ισοδύναμος δείκτης απόσβεσης με βάση τα ευρήματα της ανισοβαρούς βλάβης διάβρωσης του σιδηροοπλισμού του υποστυλώματος.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία, κατασκευάστηκαν δύο υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα και μελετήθηκε η απόκρισή τους υπό σεισμικά φορτία, πριν και μετά την επιβολή της διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, στο ελεύθερο άνω άκρο των υποστυλωμάτων επιβλήθηκαν επαναληπτικές φορτίσεις με σταθερά αυξητική οριζόντια μετατόπιση, υπό σταθερό αξονικό φορτίο 350 kN. Τα υποστυλώματα ήταν μορφής κατακόρυφου προβόλου ύψους 1,60m, τετραγωνικής διατομής 300mm x 300mm σκυροδέματος κατηγορίας C20/25 με 4 γωνιακές ράβδους Φ16 και συνδετήρες Φ8/250mm B500c, πάχους επικάλυψης 25mm.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αποτίμηση της μηχανικής αντοχής των υποστυλωμάτων πριν και μετά τη διάβρωση, η βάση του ενός υποστυλώματος (επί ύψους 60cm) υποβλήθηκε σε ηλεκτροδιάβρωση παρουσία διαλύματος 5% NaCl. Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απώλεια μάζας, με βάση τον Νόμο Faraday (1), σε κάθε εγκιβωτισμένη ράβδο επιβλήθηκε ένταση ρεύματος ίση προς 0.3A για μία χρονική διάρκεια 60 ημερών.

$$t = \frac{\lambda * \Delta m * n * C}{A * M} \quad (1)$$

όπου $1.20 \leq \lambda \leq 1.60$, Δm είναι η απώλεια μάζας, η σταθερά διάβρωσης n ίση προς 2, C είναι η σταθερά Faraday ίση προς 96.485c/mol, A συμβολίζει το ρεύμα και M είναι η μοριακή μάζα της ράβδου χάλυβα η οποία ισούται με 55.8mol.

Μετά τις μηχανικές δοκιμές, ακολούθησαν μετρήσεις της απώλειας μάζας των ράβδων οπλισμού, πριν και μετά την ολοκλήρωση της προκαθορισμένης έκθεσης σε διάβρωση. Το ποσοστό απώλειας μάζας Δm υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (2), σύμφωνα με τις μετρήσεις για την κάθε ράβδο στη βάση του διαβρωμένου υποστυλώματος.

$$\Delta m = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (2)$$

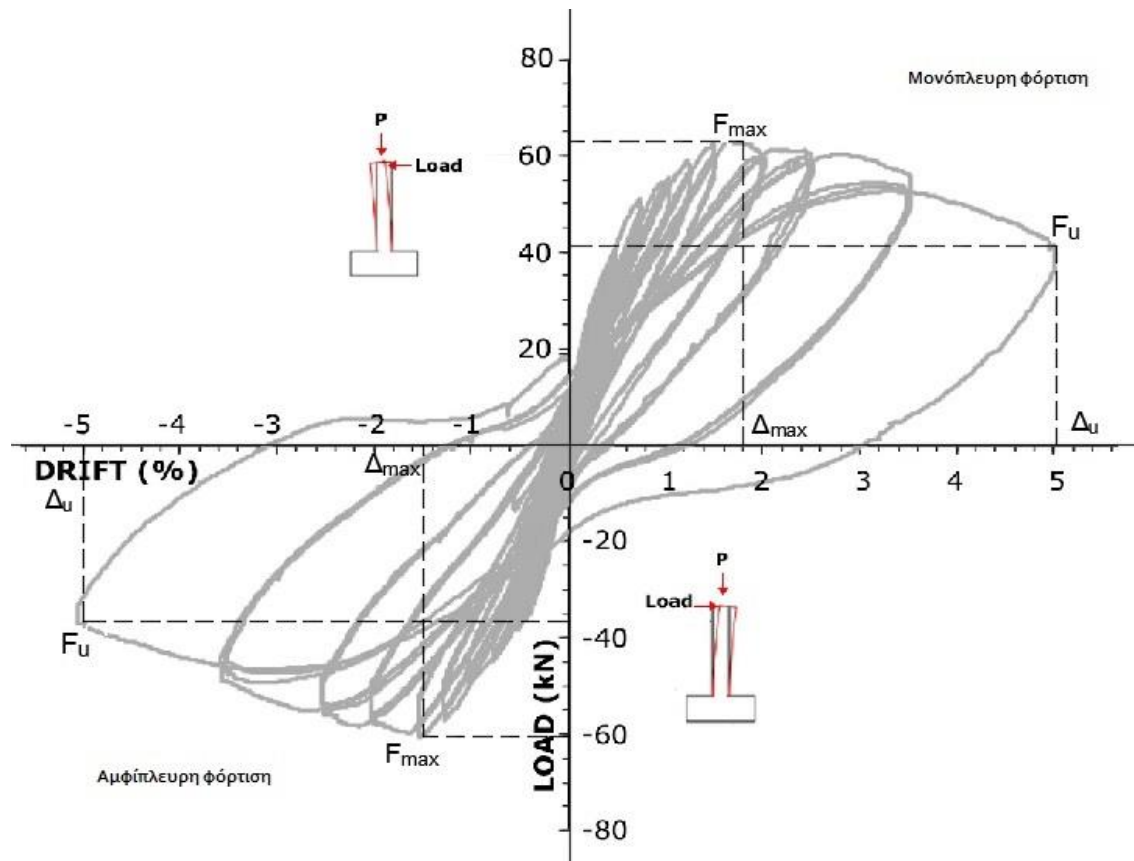
όπου Δm είναι η ποσοστιαία απώλεια μάζας και M_i , M_f είναι οι μάζες πριν και μετά τη διάβρωση. Παρότι οι συνέπειες της βλάβης διάβρωσης εκφρασμένες σε όρους απώλειας μάζας των ράβδων οπλισμού είχαν προκαθοριστεί (βάσει του Ν. Faraday) εν τούτοις κατέγραψαν ποσοστιαίες απώλειες μάζας μεταξύ των τιμών 14% έως και 21%, οι οποίες μεταφράζονται σε τοπική μείωση της διαμέτρου τους και πολλούς βελονισμούς.

Τα δύο υποστυλώματα (τόσο το υποστυλώμα αναφοράς όσο και το διαβρωμένο) υποβλήθηκαν σε μηχανικές δοκιμές με σταδιακά αυξανόμενες μετατοπίσεις (drifts), 3 επαναλήψεων έκαστη και ταυτόχρονη εφαρμογή σταθερού αξονικού φορτίου 350kN. Το εύρος και η ακολουθία μετακινήσεων (drifts) επιβλήθηκαν ως ακολούθως: 0,2%, 0,8%, 1%, 1,25%, 1,5%, 2%, 2,5%, 3,5% και 5%

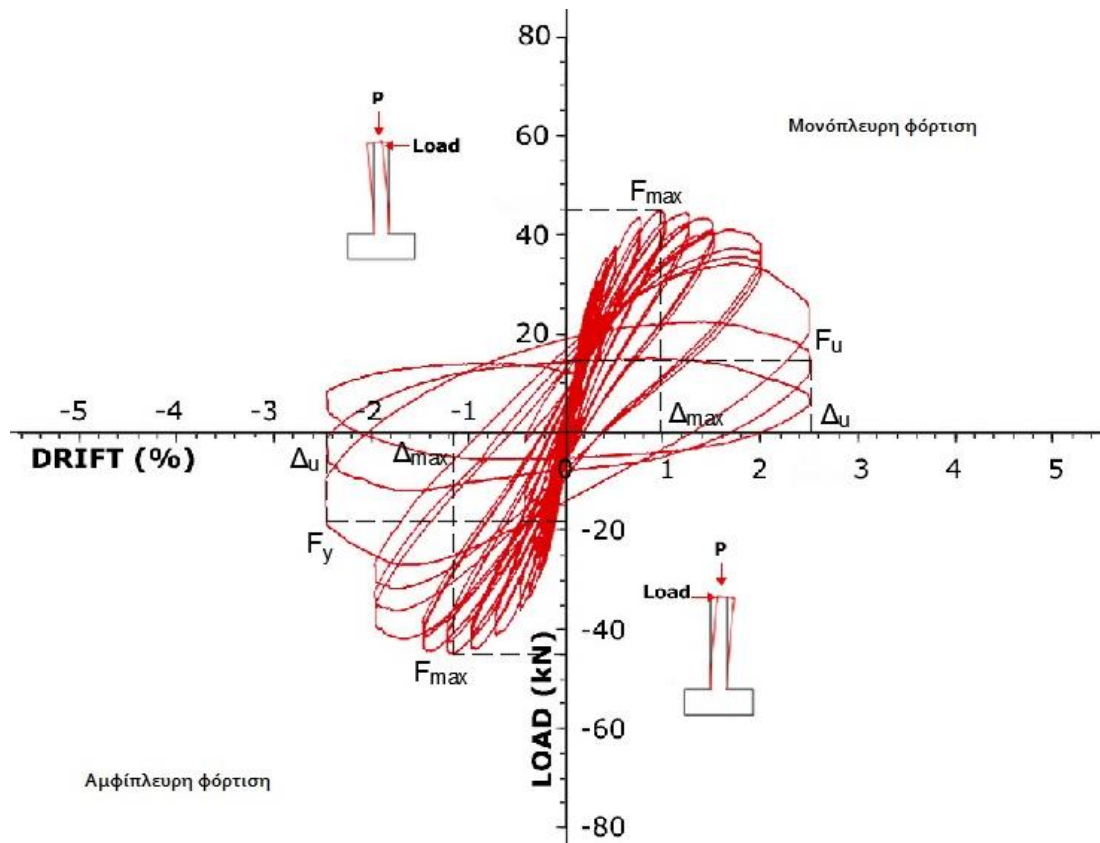
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Είναι γνωστό ότι, τόσο στα υποστυλώματα υφιστάμενων κατασκευών όσο και σε αντίστοιχα πειραματικά, όπου η υποβάθμιση προκαλείται με μεθόδους επιταχυνμένης διάβρωσης, σπανίως μετρήθηκε ισοδύναμη βλάβη στον σιδηροοπλισμό. Επομένως, όταν η αξιολόγηση της απόδοσης υφιστάμενων υποστυλωμάτων έναντι σεισμού προκύπτει με ανάλυση της δαπανώμενης ενέργειας υπολογίζοντας και τους δύο κλάδους φόρτισης (εφελκυσμένο και θλιβόμενο κλάδο), τότε η επάρκειά τους μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Είναι γεγονός εξάλλου, ότι η περιογή του υποστυλώματος με τη μεγαλύτερη βλάβη διάβρωσης χάλυβα, αναμένεται να αστοχήσει πρώτη. Λόγω λοιπόν της διαφορετικής μηχανικής απόκρισης σε εφελκυσμό και θλίψη του υποστυλώματος, σε πολλές αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες επάρκειας υποστυλωμάτων, καθιερώθηκε αποδεκτή επάρκεια υποστυλώματος, όταν δύναται να ανταποκριθεί σε φορτίσεις οριακής φόρτισης μέχρι το 85% του μέγιστου φορτίου.

Τα πειραματικά αποτελέσματα τόσο του υποστυλώματος αναφοράς όσο και του διαβρωμένου υποστυλώματος παρουσιάζονται στα **Σχήματα 1** και **2** αντίστοιχα. Αναλύοντας την μηχανική απόκριση των δύο υποστυλωμάτων προκύπτει ότι ήταν περίπου γραμμική μέχρι το $\text{drift}1\%$, αν και οι πρώτες μικρορηγματώσεις καταγράφηκαν μόλις από τα πρώτα drifts στις θέσεις που βρίσκονταν οι συνδετήρες. Αμφότερα τα υποστυλώματα κατέγραψαν διαφορετικές αποδόσεις μέγιστης αναλαμβανόμενης δύναμης στον εφελκυστικό κλάδο και στον θλιβόμενο κλάδο (όπως αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια). Η μηχανική απόδοση του διαβρωμένου υποστυλώματος εμφανίστηκε ιδιαίτερα απομειωμένη έναντι του υποστυλώματος αναφοράς, τόσο ως προς τη δυνατότητα παραμόρφωσής του όσο και σε όρους μέγιστου αναλαμβανόμενου φορτίου.



Σχήμα 1. Απόκριση του υποστυλώματος αναφοράς.



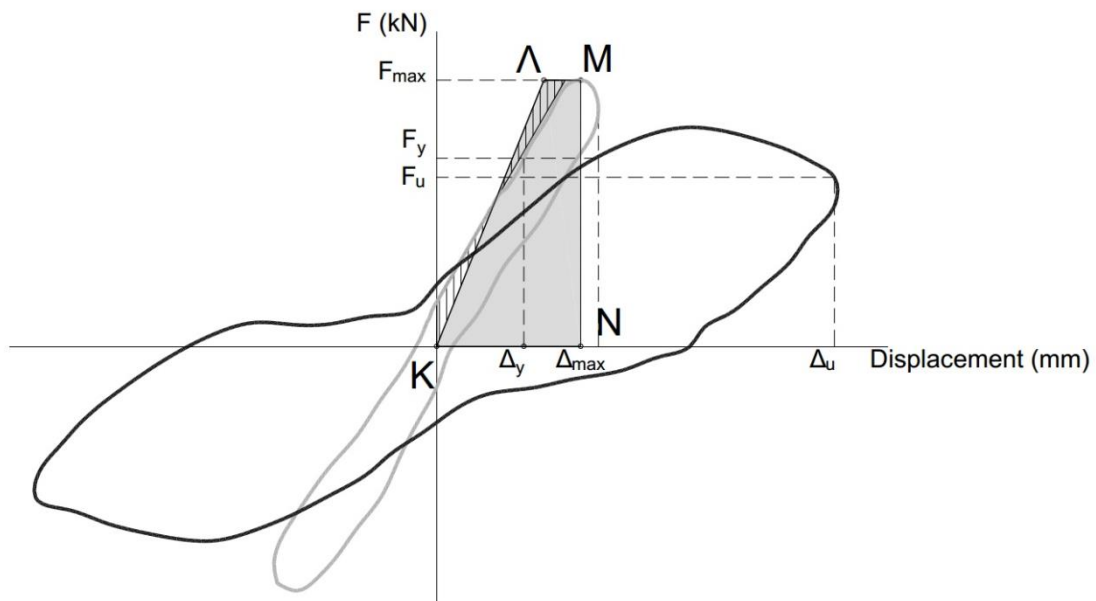
Σχήμα2. Απόκριση του διαβρωμένου υποστυλώματος.

Με βάση δε το γεγονός της διαφορετικής απόδοσης των δύο υποστυλωμάτων, τόσο στον εφελκόμενο όσο και στο θλιβόμενο κλάδο, εξετάστηκαν και μελετήθηκαν τα αποτελέσματα συμπεριφοράς τόσο των συνεχόμενων πλήρων καμπυλών υστέρησης (αμφίπλευρη φόρτιση) όσον και των μη πλήρων καμπυλών υστέρησης (μόνο στον εφελκυστικό κλάδο – στην αρχική μονόπλευρη φόρτιση). Μετά τη διάβρωση του υποστυλώματος και με αύξηση της επιβολής των οριζοντίων μετακινήσεων, τα δύο κριτήρια έδειξαν διαφοροποίηση, καθώς το κριτήριο της αμφίπλευρης αστοχίας φέρεται να υπερεκτιμά την δυνατότητα παραμόρφωσης του υποστυλώματος.

Λόγω της έντονης μη γραμμικότητας των πειραματικών καμπυλών υστέρησης, ο εντοπισμός του ορίου διαρροής παραμένει δυσδιάκριτος. Προς τούτο, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3) η οποία προτείνεται και από τους ερευνητές Y.F. Wu et al (2010) και Y.W. Zhou et al (2010), σύμφωνα με την οποία η εύρεση του ισοδύναμου ορίου διαρροής προκύπτει από τα ακρότατα του υστερητικού κύκλου που απεικονίζεται διγραμμικά. Στην παρούσα μελέτη τόσο το όριο διαρροής όσο και η αντίστοιχη μετατόπιση Δ_y του υποστυλώματος υπολογίζονται με βάση την (απλοποίηση) ενεργειακή ισοδυναμία υποεπιφανειών όπως δείχνεται στο **Σχήμα 3**, όπου ελαστικός κλάδος φόρτισης της διγραμμικής καμπύλης τέμνει την πραγματική καμπύλη απόδοσης.

$$\Delta_y = 2 * \left(\Delta_{max} - \frac{A}{F_{max}} \right) \quad (3)$$

Στη σχέση αυτή, οι παράγοντες F_{max} και Δ_{max} αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο και στην αντίστοιχη μετατόπιση του υποστυλώματος, και ο παράγοντας A ταυτίζεται με την επιφάνεια που περικλείεται από τα σημεία K, Λ, Μ και Ν του **Σχήματος 3**.



Σχήμα 3. Μέθοδος διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης ικανότητας (Η σκουρόχρωμη καμπύλη υστέρησης αφορά στο drift που παρουσιάστηκε η μέγιστη μετακίνηση Δ_u και η ανοιχτόχρωμη καμπύλη αφορά στο drift που παρουσιάστηκε η μέγιστη δύναμη F_{max}).

Όπως είναι γνωστό, το μέγεθος της βλάβης που πρόκειται να υποστεί μία κατασκευή στο σεισμό, εξαρτάται από την ικανότητα παραμόρφωσής της στην πλαστική περιοχή και εξαρτάται από το μέτρο της μέγιστης ανελαστικής μετατόπισης Δ_{max} (Σχ. 3) που θα αναπτυχθεί σε σχέση με τη μετατόπιση διαρροής Δ_y . Ποσοτικά όμως αυτό, μετράται με το δείκτη πλαστιμότητας μ , που αποτελεί σημαντικό δείκτη ποσοτικοποίησης της σεισμικής απόδοσης της κατασκευής, ορίζεται δε από την εξίσωση (4):

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (4)$$

Στην εξίσωση (4), Δ_{max} είναι η μέγιστη μετακίνηση της κατασκευής και Δ_y η αντίστοιχη μετακίνηση διαρροής που προκύπτει από το διγραμμικό διάγραμμα συμπεριφοράς. Στην πραγματικότητα όμως, τα φέροντα στοιχεία μιας κατασκευής δεν καταπονούνται όλα με τον ίδιο τρόπο. Συνεπώς, η πλαστιμότητα που αναπτύσσεται ξεχωριστά σε κάθε δομικό στοιχείο είναι η τοπική πλαστιμότητα με βάση την οποία αναλύεται η σεισμική του απόδοση και ορίζεται ως ο λόγος Δ_u / Δ_y , όπου Δ_u η μέγιστη σχετική μετακίνηση της κορυφής του υποστυλώματος ως προς τη βάση του και Δ_y η αντίστοιχη μετατόπιση διαρροής, αντίστοιχα.

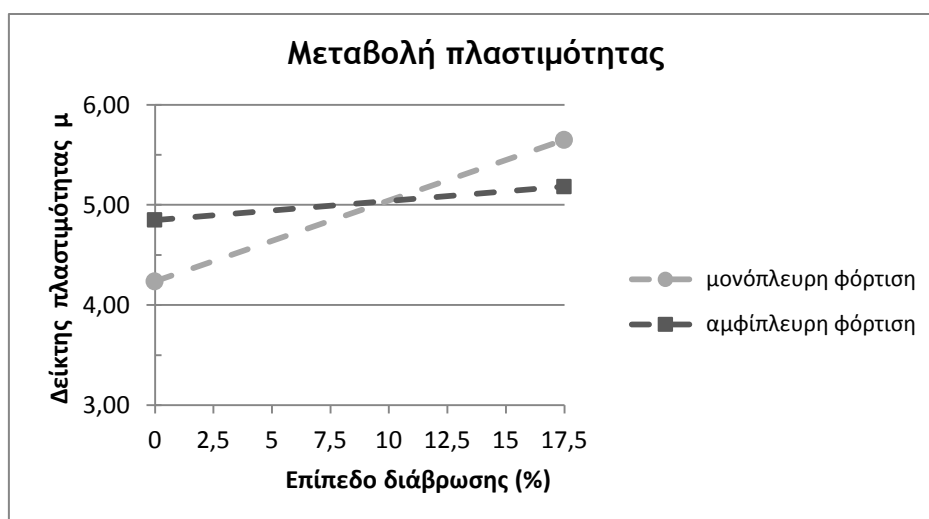
Τα αποτελέσματα της απόκρισης των δύο υποστυλωμάτων συνοψίζονται στον **Πίνακα 1**. Σε όρους δυνάμεων στο υποστύλωμα αναφοράς, η μέγιστη αναλαμβανόμενη μειώθηκε από 66,00kN σε 46,00kN, ποσοστό μείωσης 30,00% στον εφελκυστικό κλάδο μεμονωμένα (για μονόπλευρη φόρτιση). Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στον θλιβόμενο κλάδο (αμφίπλευρη φόρτιση), όπου η μέγιστη τιμή από 62,00kN μειώθηκε σε 47,00kN που αντιστοιχεί σε ποσοστό μείωσης της τάξης του 24,20%. Με την επιβολή διάβρωσης στο υποστύλωμα παρατηρήθηκε μείωση της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης, από 28,48mm σε 15,22mm στους εφελκυστικούς κλάδους (στη μονόπλευρη φόρτιση), που αντιστοιχεί σε ποσοστό μείωσης 46,50% και από 23,99mm σε 18,68mm στους θλιβόμενους κλάδους (στην αμφίπλευρη

φόρτιση) ποσοστιαίας μείωσης 22,10%. Από τα αποτελέσματα αυτά, διαπιστώνεται ότι το ποσοστό μείωσης των επιδόσεων με βάση τους θλιβόμενους κλάδους (στις αμφίπλευρες φορτίσεις) είναι υποδιπλάσιο του αντίστοιχου ποσοστού μείωσης με βάση τις επιδόσεις στους εφελκυσμένους κλάδους (στις μονόπλευρες φορτίσεις).

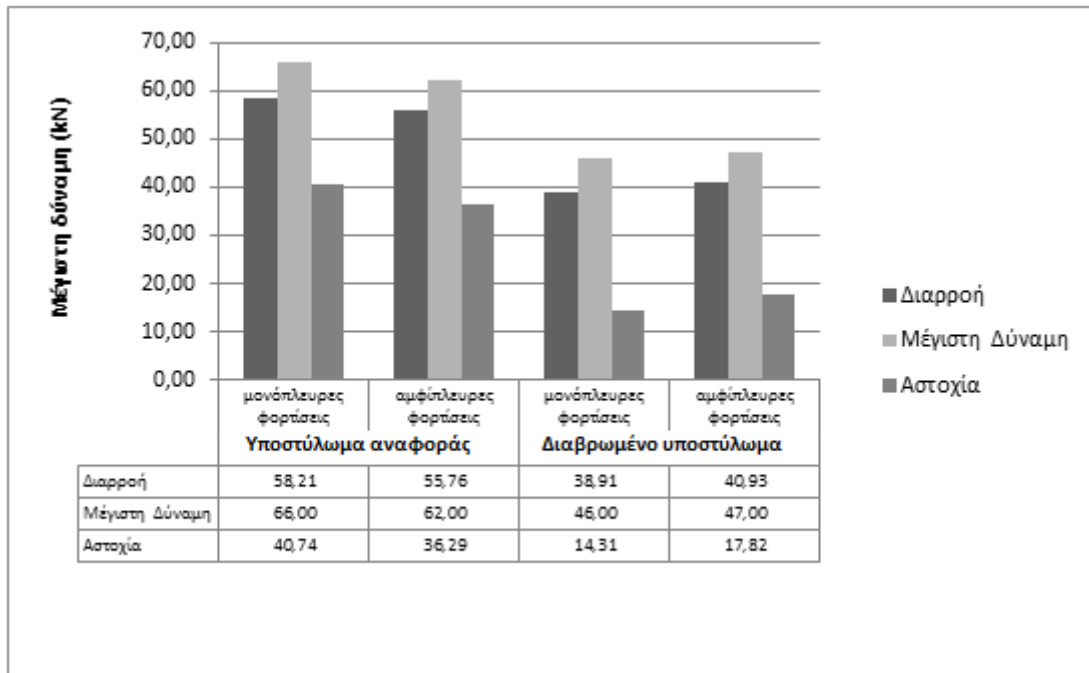
Πίνακας 1. Στοιχεία σεισμικής απόκρισης των δύο υποστυλωμάτων.

	κριτήριο αστοχίας	F_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	F_u (kN)	Δ_u (mm)	F_y (mm)	Δ_y (mm)	M
Υποστύλωμα αναφοράς	μονόπλευρες φορτίσεις	66,00	28,48	40,74	80,00	58,21	18,88	4,24
	αμφίπλευρες φορτίσεις	62,00	23,99	36,29	79,80	55,76	16,46	4,85
Διαβρωμένο υποστύλωμα	μονόπλευρες φορτίσεις	46,00	15,22	14,31	40,00	40,93	7,08	5,65
	αμφίπλευρες φορτίσεις	47,00	18,68	17,82	39,23	38,91	7,57	5,18

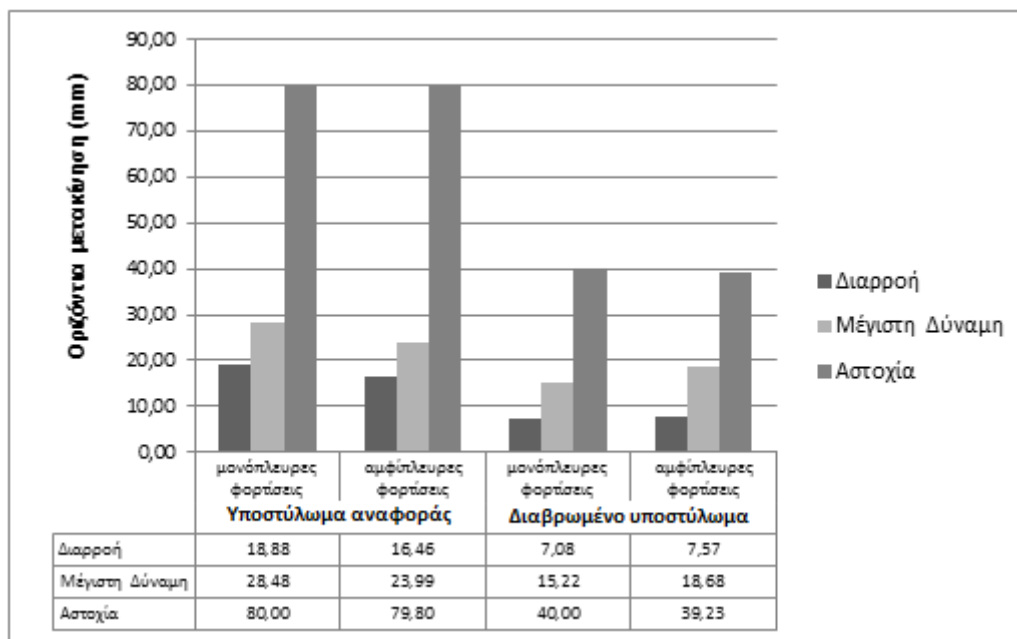
Στο υποστύλωμα αναφοράς, ο δείκτης πλαστιμότητας (Δ_u / Δ_y) που υπολογίζεται με βάση το κριτήριο αστοχίας υπό αμφίπλευρη φόρτιση είναι μεγαλύτερος από το δείκτη που προκύπτει με βάση το κριτήριο αστοχίας υπό μονόπλευρη φόρτιση. Η αντίθετη συμπεριφορά του διαβρωμένου υποστυλώματος, φανερώνει ότι η ανισοκατανομή της βλάβης διάβρωσης στο σιδηροοπλισμό περιπλέκει την αξιόπιστη πρόβλεψη συμπεριφοράς (**Σχήμα 4**). Η σεισμική απόκριση των δύο υποστυλωμάτων σε όρους μέγιστης αναλαμβανόμενης δύναμης για μονόπλευρες και αμφίπλευρες φορτίσεις παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5**. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6** παρουσιάζονται ιστογράμματα της σεισμικής απόκρισης των δύο υποστυλωμάτων σε όρους μέγιστης μετακίνησης (στη διαρροή, στη μέγιστη δύναμη και στην αστοχία) για μονόπλευρες και αμφίπλευρες φορτίσεις.



Σχήμα 4. Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη πλαστιμότητας των δύο υποστυλωμάτων σε σχέση με τα δύο κριτήρια αστοχίας.



Σχήμα 5. Ιστογράμματα της σεισμικής απόκρισης των δύο υποστυλωμάτων σε όρους μέγιστης αναλαμβανόμενης δύναμης για μονόπλευρες και αμφίπλευρες φορτίσεις.



Σχήμα 6. Ιστογράμματα της σεισμικής απόκρισης των δύο υποστυλωμάτων σε όρους μέγιστης μετακίνησης για μονόπλευρες και αμφίπλευρες φορτίσεις.

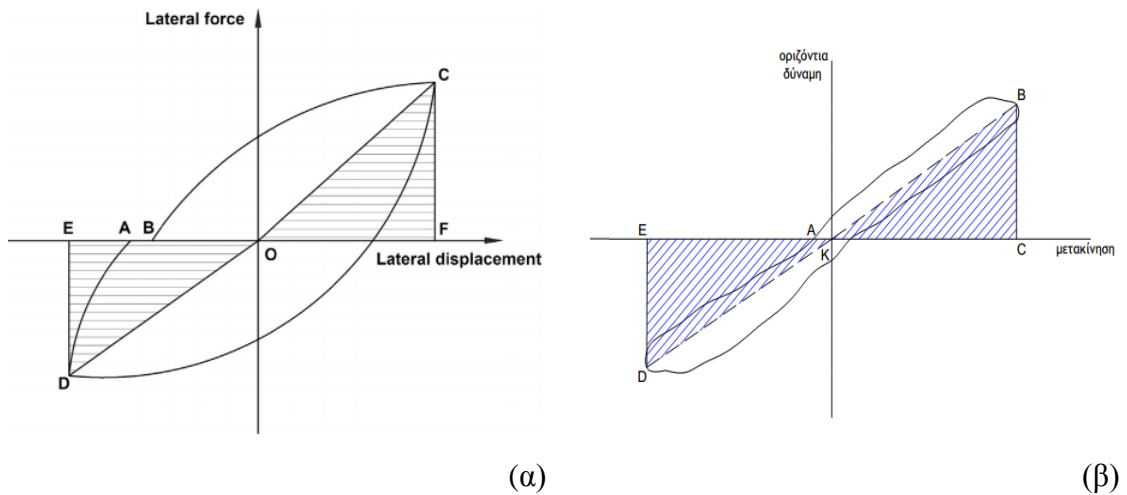
Σημαντική παράμετρος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της σεισμικής απόκρισης αποτελεί και ο δείκτης απόσβεσης. Προκειμένου να μελετηθεί, η απόσβεση της σεισμικής ενέργειας, πραγματοποιήθηκε μέτρηση έκαστης επιφάνειας υστέρησης, όπως αυτή απεικονίζεται στο **Σχήμα 7**. Ο ισοδύναμος δείκτης απόσβεσης ορίστηκε από την εξίσωση (5) :

$$\text{ισοδύναμος δείκτης απόσβεσης } J_{\text{hys}} = \frac{0.50 * U_{\text{ABCD}}}{\pi(U_{\text{KBCK}} + U_{\text{KDEK}})} \quad (5)$$

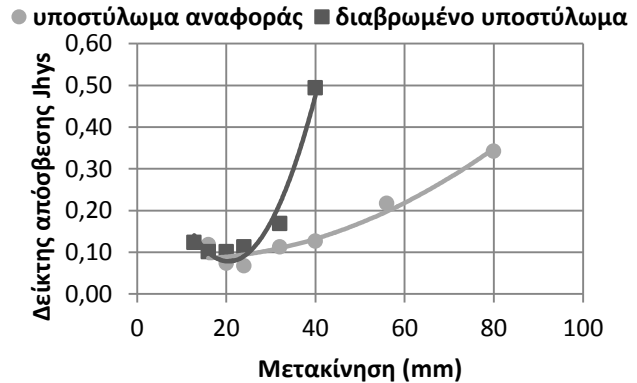
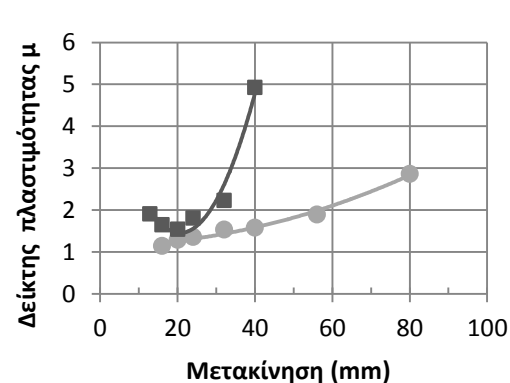
Στην εξίσωση (5), ο παράγοντας U_{ABCD} είναι η συνολική ενέργεια, και U_{KBCK} , U_{KDEK} οι ελαστικές ενέργειες σε εφελκυσμό και θλίψη, λαμβάνοντας υπόψη και την ασύμμετρη συμπεριφορά των κύκλων υστέρησης. Στο **Σχήμα 7α** απεικονίζεται η συνολική ενέργεια και οι ελαστικές ενέργειες ενός τυπικού υστερητικού κύκλου φόρτισης. Στο **Σχήμα 7β** δείχνεται μεμονωμένη καμπύλη υστέρησης από το πείραμα για drift 2%.

Το **Σχήμα 8β** δείχνει τον ισοδύναμο δείκτη απόσβεσης του υποστύλωματος πριν και μετά το κριτήριο αστοχίας, υπό μονόπλευρη φόρτιση. Θεωρώντας ουσιαστική έναρξη μετρήσεων της δαπανώμενης ενέργειας μετά το 0,8% drift ή 16mm σε όρους μετακινήσεων, μπορεί να προκύπτει ότι η διάβρωση, προκαλεί σημαντική μείωση της δυνατότητας του διαβρωμένου υποστύλωματος να απορροφήσει σεισμική ενέργεια.

Σε κάθε επίπεδο φόρτισης, η απόσβεση της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας καθώς και η συνολική ικανότητα απορρόφησης της, λόγω της διάβρωσης υποβαθμίστηκαν ιδιαίτερα. Από τα διαγράμματα των **Σχημάτων 8α** και **8β** προκύπτει ότι μεταξύ του δείκτη πλαστιμότητας (μ) και του ισοδύναμου δείκτη απόσβεσης (J_{hys}) παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά.



Σχήμα 7. Καμπύλες υστέρησης (α) Τυπική καμπύλη υστέρησης (β) Καμπύλη υστέρησης από τα πειραματικά αποτελέσματα για drift 2%.



(α) (β)

Σχήμα8. Συσχέτιση του δείκτη πλαστιμότητας (α) και ισοδύναμου δείκτη απόσβεσης (β) με την μετακίνηση του ελεύθερου άκρου του υποστυλώματος αναφοράς και του διαβρωμένου υποστυλώματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης και τη διάρκεια ζωής του διαβρωμένου υποστυλώματος (ΟΣ), πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη απ' όπου προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η επιβολή βλάβης διάβρωσης στο υποστυλώμα αναφοράς, είχε ως αποτέλεσμα την δραματική μείωση των ενεργειακών του αποθεμάτων. Η σεισμική απόδοση του διαβρωμένου υποστυλώματος απομειώθηκε σημαντικά, παρότι η πλαστιμότητα του φαινομενικά παρουσιάστηκε αυξημένη.
- Η ανισοβαρής βλάβη διάβρωσης του σιδηροοπλισμού είχε ως συνέπεια σημαντική διαφοροποίηση στη σεισμική απόκριση του υποστυλώματος από τις θετικής και αρνητικής φοράς φορτίσεις του, γεγονός που οδήγησε στην εξέταση δύο διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας.
- Με αύξηση (της φόρτισης) των οριζοντίων μετακινήσεων του ελεύθερου άκρου του διαβρωμένου υποστυλώματος, τα κριτήρια αστοχίας (στον εφελκόμενο ή στον θλιβόμενο κλάδο) παρουσίασαν αξιοπρόσεκτη διαφορά και ειδικότερα το κριτήριο της αστοχίας με βάση την αμφίπλευρη φόρτιση (θλιβόμενο κλάδο), υπερεκτίμησε την δυνατότητα παραμόρφωσης του υποστυλώματος.
- Συγκρίνοντας τη μεταβολή των δεικτών πλαστιμότητας και ισοδύναμης απόσβεσης, προκύπτει ότι καταγράφουν αντίστοιχη συμπεριφορά.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ) 2000, 2001

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ), 2^η Αναθεώρηση, 2017

Apostolopoulos, C.A., Demis S., Papadakis, V.G., Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – mechanical performance and pit depth analysis. Constr. Build.Mater. 2013;38:139–46

Apostolopoulos, C.A., Kappatos, V., Tensile properties of corroded embedded steel bats B500c in concrete, International Journal of Structural Integrity 2013; 4 No2 275-294.

Chou C.C. and Hsu, C.P., Hysteretic model development and seismic response of unbounded post-tensioned precast CFT segmental bridge columns, Earthquake Engng.Struct.Dyn. 2008; 37:919–934

Drakakaki,A., Apostolopoulos, C.A., Mechanical performance of a reinforced concrete column under seismic loads, before and after the corrosion influence, 1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, 2016, Chania, Greece

Fernandez, I., Bairàn, J.M., Marí, A.R., Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and (σ - ϵ) behavior, Jour. Constr. Build.Mater. 2015; 101 772-783

Guo, A.X., Li, H.T., Ba, X., Guan, X.C., Li, H., Experimental investigation on the cyclic performance of reinforced concrete piers with chloride-induced corrosion in marine environment, Engineering Structures 2015, 105, 1–11

Kashani, M.M, Crewe, A.J., Alexander, N.A, Structural capacity assessment of corroded RC bridge piers, Bridge Engineering 2017; 170 issue BE1 28-41.

Papadopoulos, M.D., Apostolopoulos, C.A., Zervaki, A.D., Haidemenopoulos, G.N., Corrosion of exposed rebars, associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion tests, Jour. Constr. Build Mater 2011; 25 3367-3374.

Tapan, M., Aboutaha, R.S., Strength evaluation of deteriorated RC bridge columns. J Bridge Eng 2008;13(3):226–36

Wu, Y.F., Zhou, Y.W., He, X.Q., Performance-Based design of Compression-Yielding FRP-Reinforced Concrete Beams. Composite Structures, 2010, 93(1): 113-123

Zhou, Y.W., Wu, Y.F., Teng, J.G. and Leung, A.Y.T. ,Parametric space for the optimal design of compression-yielding FRP-reinforced concrete beams. Materials and Structures.2010, 43(1-2): 81-97.