

# Σεισμική Ανανηπτικότητα Υποστυλωμάτων ΩΣ Ενισχυμένων με Καινοτόμες Υβριδικές Τεχνικές Seismic Resilience of Columns Strengthened With Innovative Hybrid Techniques

Θεόδωρος Χ. Ρουσάκης<sup>1</sup>

*Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα, ενίσχυση, σύνθετα υλικά, υβριδικό, ανανηπτικότητα*  
*Keywords: concrete, strengthening, composite materials, hybrid, resilience*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Διερευνώνται τα χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας υποστυλωμάτων με υβριδικές ενισχύσεις υφασμάτων και σχοινιών σύνθετων υλικών με στόχο την περαιτέρω αύξηση της σεισμικής ανανηπτικότητας εξαιτίας υπερκαταπονήσεων, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας στο χρόνο και της αειφορίας. Τα σχοινιά είναι από συνεχείς ίνες πολυπροπυλενίου ή βασάλτη, είναι επαναχρησιμοποιήσιμα, ανακυκλώσιμα και μη τοξικά. Επιπλέον, ο βασάλτης είναι φυσικό υλικό. Παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από υποστυλώματα ωπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης ενισχυμένων με υβριδικές τεχνικές που οδηγούν σε άρση της πρόωρης κατάρρευσης και σε σημαντική αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας χωρίς μείωση του αναλαμβανόμενου κατακόρυφου φορτίου. Η αστοχία επέρχεται από φαινόμενα γενικής αστάθειας σε επίπεδο δομικού στοιχείου. Παρουσιάζεται η προσέγγιση σχεδιασμού και ανασχεδιασμού Ελαστικής Ανακατανεμητικής Ομοιόμορφης Περίσφιγξης (ΕΛΑΝΟΠ) σε επίπεδο δομικού στοιχείου.

**ABSTRACT :** The paper deals with the resilience characteristics of columns with hybrid sheets and ropes made of composite materials in order to further upgrade their seismic resistant, durability and sustainability performance. The investigated ropes are made of continuous fibers of polypropylene or basalt and they are reusable, recyclable, non-toxic. Further, basalt is natural material. The study presents the experimental results of RC columns with inadequate reinforcement detailing, strengthened with hybrid techniques that prevent undesirable collapse and increase remarkably the energy dissipation capacity while preserving the axial load bearing capacity. The failure happens because of global member instability. The paper presents the design and redesign approach of Elastic Redistributable Uniform Confinement (ERUC) at structural member level.

<sup>1</sup> Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: [trousak@civil.duth.gr](mailto:trousak@civil.duth.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανανηπτικότητα (resilience ή ανατακτικότητα) είναι μια διεπιστημονική έννοια και ορίζεται ως «η ικανότητα να προετοιμαστεί και να σχεδιαστεί η απορρόφηση, απάντηση, ανάκαμψη από και πιο πετυχημένα η προσαρμογή σε δυσμενή συμβάντα» (NAC 2012). Καλύπτει διάφορους τομείς όπως την οικολογία, την επιστήμη των υλικών και τον περιορισμό των καταστροφών. Η παρούσα εργασία περιορίζεται σε δυσμενείς επιπτώσεις σε κατασκευές λόγω σεισμού και πιο συγκεκριμένα αναδεικνύει την ικανότητα σεισμικής ανανηπτικότητας υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ), ενισχυμένων με καινοτόμες υβριδικές τεχνικές με έμφαση στην αποφυγή πρόωρης κατάρρευσης και στην αειφορία. Η σεισμική ανανηπτικότητα σε επίπεδο δομικών στοιχείων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ανανηπτικότητα σε επίπεδο κατασκευών. Από πρόσφατα πειράματα που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών του ΔΠΘ προκύπτει ότι η εξωτερική περίσφιξη με συνεχή ωπλισμό από σχοινιά ινών σύνθετων υλικών (composite fiber ropes, FR ή ΣΣ), εφαρμοσμένη χωρίς τη χρήση ρητινών εμποτισμού ή επικόλλησης, αναβαθμίζει σημαντικά την θλιπτική αντοχή (πάνω από 6 φορές) και την πλαστιμότητα ανηγμένων παραμορφώσεων του άοπλου σκυροδέματος (πάνω από 15% ανηγμένη παραμόρφωση), (Rousakis 2014, Rousakis 2016). Η κατάλληλα σχεδιασμένη περίσφιξη με πολύκλινα ελαστικά σχοινιά (ακόμη και με ταινίες ινών από φυσικές πυράντοχες ίνες υψηλής ανθεκτικότητας στο χρόνο όπως του βασάλτη, Rousakis 2016) αποκαλύπτει το μοναδικό απόθεμα σεισμικής ανανηπτικότητας (seismic resilience) υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ) στην προσπάθεια να αποφευχθεί η καταστροφική πρόωρη κατάρρευση ανεπαρκών υφιστάμενων κατασκευών κατά τη διάρκεια μη αναμενόμενων υπερφορτίσεων. Η βλάβη των υποστυλωμάτων ΩΣ υποκείμενων σε αξονικό φορτίο (μονότονο ή επαναλαμβανόμενο) είναι ελεγχόμενη, ανακατανέμεται μέσα στο υποστύλωμα εμποδίζοντας τοπικές υπερκαταπονήσεις και οδηγεί στη βέλτιστη ικανότητα ολικής απορρόφησης ενέργειας και ακόμη και σε επαναύξηση ικανότητας σε αξονικό φορτίο μετά από πρόσκαιρη πτώση του (Rousakis 2014, Rousakis 2016). Από πειράματα σε δοκίμια κυκλικής διατομής προέκυψε ότι η ανακατανομή της βλάβης επιτυγχάνεται τόσο στο σκυρόδεμα όσο και σε ενδεχόμενη υφιστάμενη ενίσχυση με ινωπλισμένα πολυμερή FRP. Δηλαδή σε σύνθετα υλικά με ίνες εμποτισμένες με εποξειδικές ρητίνες (Rousakis 2014, Rousakis 2013) ή και εμπλουτισμένες με νανοσωλήνες άνθρακα (Rousakis et al. 2014). Από πειράματα σε υποστυλώματα ΩΣ με τετραγωνικές διατομές προέκυψε αντίστοιχη ανακατανομή βλάβης στο σκυρόδεμα, τόσο για χαλαρή περίσφιξη με FR (Rousakis & Tourtouras, 2014, Rousakis 2016) όσο και για προεντεταμένο FR (Rousakis & Tourtouras, 2014). Από τις πειραματικές παρατηρήσεις, προέκυψε μια καινοτόμος γενικευμένη προσέγγιση σχεδιασμού για την αναβάθμιση της εγγενούς ανανηπτικότητας (inherent resilience) δομικών στοιχείων όπου ο ασθενέστερος κρίκος υπόκειται σε τοπική βλάβη, εύαλωτη σε περαιτέρω συσσώρευση (επιδείνωση βλάβης) και σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια ανάλυσης κατακόρυφου φορτίου και τελικά σε κατάρρευση (Rousakis, 2018).

Παράλληλα, η μελέτη των Kwon et al. (2016) έδειξε ότι η ελαστική μη επικολημένη ταινία σύνθετου υλικού από Velcro (υψηλής παραμορφωσιμότητας), τοποθετούμενη ακόμη και σε πολύ χαμηλή ποσότητα, επιδεικνύει μοναδικά χαρακτηριστικά περίσφιγξης περιορίζοντας τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος επικάλυψης και καθυστερώντας την ανάπτυξη των βλαβών. Όλες οι παραπάνω μελέτες συνεισφέρουν στην αναβάθμιση της ανανηπτικότητας (resilience) υποστυλωμάτων ΩΣ μέσω ενίσχυσης με καινοτόμες τεχνικές που χρησιμοποιούν ακόμη και φυσικά ανακυκλώσιμα υλικά αποφεύγοντας τον εμποτισμό με εποξειδικές ρητίνες, σε ενισχύσεις όπου η συνάφεια με το περικλειόμενο υλικό δεν είναι κρίσιμη. Αυτές οι παράμετροι ενδέχεται να μειώνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της επέμβασης καθώς και το κόστος των τοποθετούμενων υλικών, συνεισφέροντας στην αειφορία της. Επιπλέον, αποτελούν εναλλακτικές τεχνικές επεμβάσεων είτε προσεισμικές είτε και μετασεισμικές επεμβάσεις άμεσης ενεργοποίησης (Rousakis 2018). Επομένως, μπορούν να αναβαθμίσουν την ανανηπτικότητα υφιστάμενων κρίσιμων υποστυλωμάτων ΩΣ η οποία αποτελεί αντικείμενο πρόσφατων εργασιών που διερευνούν είτε την αντικατάστασή τους σε νέες κατασκευές ή αποτελεσματικές προσεισμικές επεμβάσεις ή και την επιρροή των μετασεισμών (Biondini et al. 2015, Bocchini et al. 2014, Dong & Frangopol 2015, Echevarria et al. 2015, Fakharifar et al. 2015) ή την επιλεκτική επέμβαση σε κρίσιμα στοιχεία οδογεφυρών για την αύξηση της ανανηπτικότητας (ή ανατακτικότητας) νευραλγικών οδικών δικτύων (Sextos et al. 2017). Η αναβάθμιση της σεισμικής ανανηπτικότητας σε επίπεδο κοινωνίας είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς κατά τη διάρκεια των 30 καταστροφικότερων σεισμών - μόνο τα τελευταία 20 χρόνια - σκοτώθηκαν περισσότεροι από 900000 άνθρωποι και κατέρρευσαν ή υπέστησαν πάρα πολύ βαριές βλάβες πάνω από 3.1 εκατομμύρια κτίρια [10].

Η παρούσα έρευνα εστιάζει στην σεισμική ανανηπτικότητα υποστυλωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ) σε υφιστάμενες κατασκευές, με υβριδική ενίσχυση υφασμάτων ινωπλισμένου πολυμερούς (ΙΩΠ) από ίνες γυαλιού και σύνθετων σχοινιών, σε επαναλαμβανόμενο αξονικό φορτίο. Εξετάζεται η επιτελεστικότητα των υποστυλωμάτων να διατηρήσουν της ικανότητα ανάληψης αξονικού φορτίου. Οι Echevarria et al. (2015) μεταξύ άλλων, αναγνωρίζουν την σπουδαιότητα αυτού του ζητήματος καθώς για παράδειγμα, μετά από ισχυρό σεισμό μια γέφυρα οφείλει να είναι ακόμη σε λειτουργία ώστε να παρέχει διέλευση σε συνεργεία διάσωσης και οχήματα έκτακτης ανάγκης σε πληγείσες περιοχές. Η παρούσα μελέτη θεωρεί το ενισχυμένο υποστυλώμα ΩΣ ως ένα υποσύστημα με χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας, όντας κρίσιμο δομικό στοιχείο μιας κατασκευής. Επεκτείνεται η προηγούμενη πειραματική εργασία στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών του ΔΠΘ περιλαμβάνοντας υποστυλώματα τετραγωνικής διατομής με διαφορετική αντοχή άοπλου σκυροδέματος, ακτίνα καμπυλότητας και λεπτομέρεια υβριδικής ενίσχυσης με υφάσματα ινών γυαλιού (GFRP) και σχοινί πολυπροπυλενίου

(PPFR). Επιπλέον, χρησιμοποιείται κατάλληλο σχοινί ινών βασάλτη (BFR) σε υβριδική ενίσχυση με GFRP. Διερευνάται συγκριτικά η ανανηπτικότητα των υλικών και των διατομών των υποστυλωμάτων.

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Τα παρουσιαζόμενα πειράματα αφορούν 4 υποστυλώματα ΩΣ τετράγωνης διατομής με 150 mm πλευρά, ακτίνα καμυλότητας 17 mm και 750 mm ύψος. Κατασκευάστηκαν με έτοιμο σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 19 MPa. Τα υποστυλώματα ΩΣ περιελάμβαναν 4 διαμήκεις ράβδους διαμέτρου 8 mm και ποιότητας B500C (ονομαστική τάση διαρροής  $f_y = 500$  MPa). Επιπλέον, τοποθετήθηκαν λείοι εγκάρσιοι συνδετήρες με διάμετρο 5.5 mm και ποιότητα S220 (ονομαστική τάση διαρροής 220 MPa), σε απόσταση 100 mm μεταξύ τους, σε όλο το ύψος των υποστυλωμάτων. Επομένως, οι διαμήκεις οπλισμοί ήταν εξαιρετικά λυγηροί ( $s/\phi_L = 12.5$ ) ώστε να προσομοιώνουν ανεπαρκή υποστυλώματα παλαιού τύπου. Η εξωτερική περίσφιγξη περιελάμβανε επικολημένα υφάσματα ινών γυαλιού μιας διεύθυνσης (Sika, SikaWrap® -430 G/25) με μέτρο ελαστικότητας ινών 76 GPa και ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας 2.8%. Επιπλέον περιελάμβανε μη επικολημένο, μη εμποτισμένο σχοινί σύνθετου υλικού πολυπροπυλενίου (Z-twisted PPFR, Πλαστικά Θράκης ΑΕ, βλέπε Rousakis, 2013) καθώς και σχοινί ινών βασάλτη (braided BFR, Juan Gili S.L.).

Το υποστυλώμα RCGL1 είχε εσωτερικό χαλύβδινο οπλισμό και εξωτερική ενίσχυση με 1 στρώση (L1) υαλοϋφάσματος (G) εμποτισμένου και επικολημένου με εποξειδική ρητίνη. Το δοκίμιο RCGL1PPL4 ήταν υποστυλώμα ΩΣ με 1 στρώση επικολημένου υαλοϋφάσματος και 4 ολόσωμες στρώσεις (L4) μη επικολημένου PPFR. Το υποστυλώμα RCGL1PPL3PRE ήταν ΩΣ με 1 στρώση επικολημένου GFRP και 3 πλήρεις στρώσεις (L3) μη επικολημένου, προεντεταμένου PPFR. Στο παραπάνω υποστυλώμα περιτυλίχθηκε πρώτα μία ολόσωμη στρώση PPFR σπειροειδώς χειρωνακτικά. Στη συνέχεια προσαρμόστηκαν 12 χαλύβδινοι προεντατήρες γύρω από το υποστυλώμα και εφαρμόστηκαν άλλες 3 στρώσεις PPFR σπειροειδώς, χειρωνακτικά. Τελικά, ακολούθησε η προένταση σε διαφορετικές φάσεις σε κάθε προεντατήρα και οι 3 στρώσεις σχοινιού ανέπτυξαν πανομοιότυπη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση 1.92%. Στο υποστυλώμα RCGL1BL2 εφαρμόστηκε υβριδική ενίσχυση 1 στρώσης GFRP και 2 στρώσεων μη επικολημένου BFR (περισσότερες λεπτομέρειες για το RCGL1BL2 και το RCGL1 μπορούν να βρεθούν στην εργασία Rousakis et al. 2015).

Στο σχήμα 1α παρουσιάζεται η ενοργάνωση των υποστυλωμάτων. Όλα τα

υποστυλώματα υποβλήθηκαν σε πυκνούς κύκλους θλιπτικής φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης με σταδιακά αυξανόμενη αξονική παραμόρφωση.



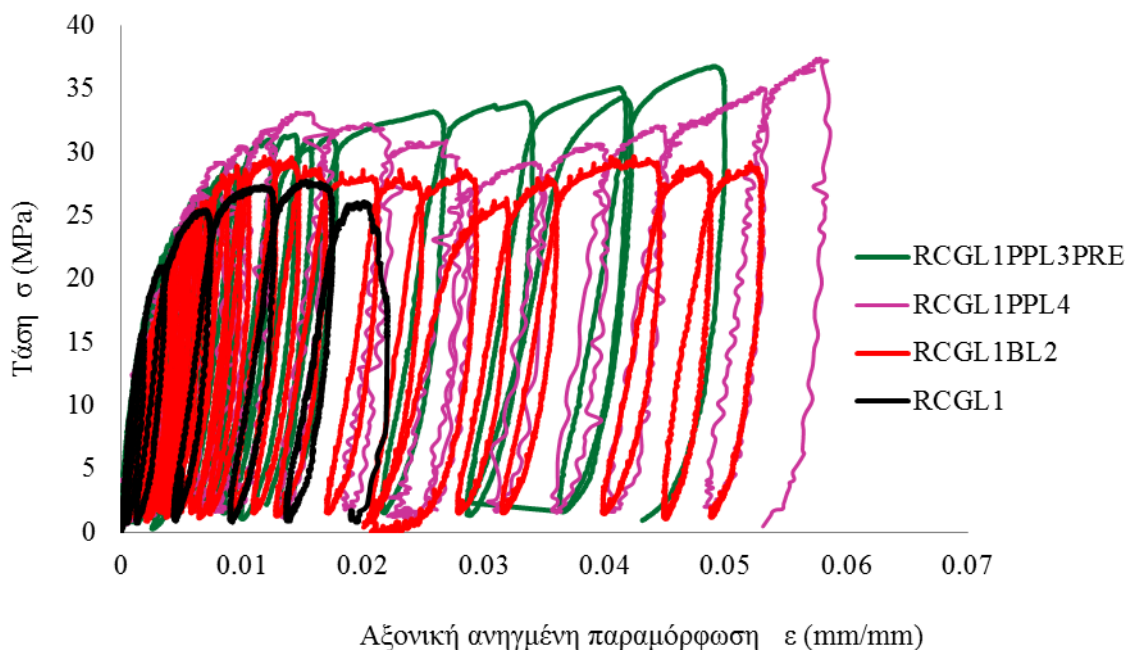
**Σχήμα 1.** Πειραματική διάταξη για το RCGL1PPL4 (α). Το υποστύλωμα μετά το τέλος του πειράματος και την απομάκρυνση του PPFR (β).

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το υποστύλωμα RCGL1 παρουσίασε θραύση του GFRP, ακολουθούμενη από πλήρη απώλεια του αναλαμβανόμενου αξονικού φορτίου και κατάρρευση. Όλα τα υποστυλώματα που περιτυλίχθηκαν με ινοπλισμό μορφής σχοινού παρουσίασαν αξιοσημείωτη αξονική βράχυνση ενώ διατηρούσαν το αξονικό θλιπτικό φορτίο. Σε κανένα υποστύλωμα δεν αστόχησαν τα σχοινιά PPFR ή BFR παρά την πολλαπλή χρήση τους. Οι προαναφερόμενες δοκιμές διακόπηκαν πρόωρα για λόγους ασφαλείας ώστε να αποφευχθεί ο εκτεταμένος γενικός λυγισμός των υποστυλωμάτων (βλέπε Σχήμα 1β), είτε για περίσφιγξη με υπερυψηλής παραμόρφωσης αστοχία PPFR είτε με BFR. Μετά την απομάκρυνση των εξωτερικών ενισχύσεων διαπιστώθηκε εκτεταμένη αποδιοργάνωση του πυρήνα σκυροδέματος καθώς και λυγισμός των χαλύβδινων διαμήκων ράβδων. Το υποστύλωμα με προεντεταμένο PPFR παρουσίασε λιγότερη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στις περιοχές εφαρμογής της προέντασης.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι καμπύλες αξονικών τάσεων – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων όλων των υποστυλωμάτων. Το υποστύλωμα RCGL1 παρουσίασε ένα μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο και στη συνέχεια σύντομη

ψευδοπλαστική συμπεριφορά ακολουθούμενη από φθίνουσα συμπεριφορά τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων, έως την θραύση του μανδύα GFRP. Μία στρώση ενίσχυσης GFRP δεν ήταν αρκετά επαρκής ώστε να περιορίσει αποτελεσματικά τη διόγκωση του πυρήνα σκυροδέματος, τη ρηγματώση και τον πρόωρο λυγισμό των διαμήκων ράβδων ώστε να παρέχει στο υποστύλωμα κρατυνόμενη συμπεριφορά ολοένα αυξανόμενου αναλαμβανόμενου φορτίου. Σε περιπτώσεις που η περίσφιγξη υλοποιείται με χαλύβδινους συνδετήρες, μετά τη διαρροή του χάλυβα αναπτύσσονται παραμένουσες (πλαστικές) ανηγμένες παραμορφώσεις και χαμηλότερο μεταελαστικό εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας. Επομένως, η περιοριστική δράση του χάλυβα εξασθενεί. Η ανανηπτικότητα του υποστύλωματος RCGL1 μηδενίστηκε για θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση μεγαλύτερη από 2.12% καθώς το υποστύλωμα κατέρρευσε (σχήμα 2 και σχήμα 3).



**Σχήμα 2.** Διαγράμματα αξονικών τάσεων – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων όλων των υποστυλωμάτων

Από την άλλη, όλα τα υποστύλωματα με υβριδική ενίσχυση GFRP-FR έφθασαν αξονικές ανηγμένες παραμορφώσεις υψηλότερες από 5% χωρίς θραύση του ινοπλισμού σχοινιού. Όλα τα υποστύλωματα με υβριδική περίσφιγξη GFRP και PFRF ή GFRP και BFR διατήρησαν την ακεραιότητα του ρηγματωμένου πυρήνα σκυροδέματος μετά τη θραύση του GFRP. Στο παραπάνω σημείο, παρουσιάστηκε προσωρινή, αμελητέα και ελεγχόμενη πτώση φορτίου,

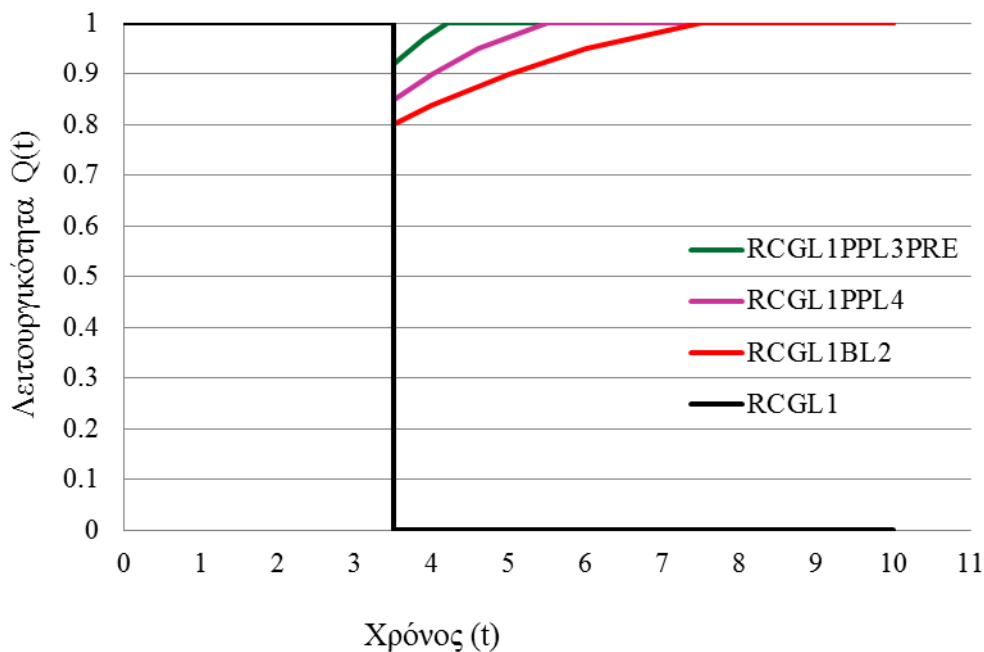
ακολουθούμενη στη συνέχεια από αύξηση του αναλαμβανόμενου φορτίου των υποστυλωμάτων RCGL1PPL4 και RCGL1BL2. Το υποστύλωμα RCGL1PPL3PRE δεν παρουσίασε προσωρινή πτώση φορτίου. Όλα τα υποστυλώματα παρουσίασαν καθολικό λυγισμό, πολλαπλό τοπικό λυγισμό ράβδων, πολλαπλή τοπική διόγκωση του πυρήνα σκυροδέματος, πολλαπλή θραύση του μανδύα GFRP και άθικτο το σύνθετο σχοινί ενώ διατήρησαν την ικανότητα ανάληψης αξονικού φορτίου έως την πρόωρη διακοπή της δοκιμής (βλέπε σχήμα 2). Επομένως, οι τοπικές υπερκαταπονήσεις ήταν ιδιαίτερα σημαντικές και μεταβαλλόμενες σε σύγκριση με τα κυλινδρικά υποστυλώματα με υβριδικές ενισχύσεις των εργασιών Rousakis (2013), Rousakis et al. (2014) καθώς η διατομή είναι τετραγωνική και περιλαμβάνεται εσωτερικός χαλύβδινος οπλισμός. Ωστόσο, η επαρκής περίσφιγξη με FR μπορεί να διασφαλίσει τη μέγιστη αξιοποίηση της δυνατότητας του σκυροδέματος να υποστεί υψηλές αξονικές ανηγμένες παραμορφώσεις, καθώς επιτρέπει την ανακατανομή των πλευρικών ανηγμένων παραμορφώσεων ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του υποστυλώματος κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Αυτό το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε επίπεδο διατομής, συνεισφέρει στην αυξημένη ανανηπτικότητα των υποστυλωμάτων με υβριδική ενίσχυση που υπόκεινται σε αξονικό φορτίο. Αντίστοιχες αναφορές σε φαινόμενα ανακατανομής βλαβών ή/και εξαιρετικής ανταπόκρισης οπλισμών εξωτερικής ενίσχυσης σε τοπικές υπερκαταπονήσεις εντοπίζονται σε μελέτες εξωτερικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων άοπλου σκυροδέματος (Saleem et al. 2018) ή υποστυλωμάτων ΩΣ (Zhang et al. 2017) με ύφασμα ινωπλισμένου πολυμερούς με ίνες υπερυψηλής παραμόρφωσης αστοχίας από PET, εμποτισμένες με εποξειδική ρητίνη.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Η τεχνική της εξωτερικής υβριδικής ενίσχυσης με FRP και FR αποτελεί μια σημαντική εναλλακτική στον αντισεισμικό ανασχεδιασμό καθώς μπορεί να οδηγήσει εύκολα σε θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις σκυροδέματος στην αστοχία πολύ υψηλότερες των ανώτατων τιμών που απαιτούνται πρακτικά για τις περισσότερες περιπτώσεις περισφιγμένων υποστυλωμάτων (ανηγμένες θλιπτικές παραμορφώσεις σκυροδέματος μεγαλύτερες από 0.03 θεωρούνται πρακτικά μη αναγκαίες για τις περισσότερες περιπτώσεις). Επομένως, ο ανασχεδιασμός δεν εξαρτάται πλέον από αυτό το μέγεθος και υπερβαίνονται οι περιορισμοί ακριβούς πρόβλεψής του για τον καθορισμό της αστοχίας καθώς αυτή πλέον οφείλεται σε φαινόμενα δευτέρας τάξης (γενική αστάθεια, λυγισμός). Παράλληλα, η ανανηπτικότητα των υποστυλωμάτων αναβαθμίζεται σημαντικά. Η ανανηπτικότητα του υποστυλώματος για ανηγμένη παραμόρφωση έως και 0.05 είναι πλήρης για περιπτώσεις υβριδικής περίσφιγξης (βλέπε σχήμα 3 σε όρους

λειτουργικότητας). Δηλαδή η κατάρρευση λόγω ανεπαρκούς ικανότητας σε αξονικό φορτίο πρακτικά αποτρέπεται.

Συμπεραίνεται ότι η νέα προσέγγιση σχεδιασμού (Rousakis 2018), μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη κυκλικές διατομές υποστυλωμάτων ΩΣ ήδη ενισχυμένες με FRP, στοχεύοντας σε αναβαθμισμένη εγγενή ανανηπτικότητα παρόμοιων δομικών υποσυστημάτων μέσω της εφαρμογής FR. Υποσυστήματα με ασθενή κρίκο ευάλωτο σε μοιραία συσσώρευση βλάβης (σκυρόδεμα ή FRP) μπορούν να επιτύχουν αυξημένη εγγενή ανανηπτικότητα μέσω της ομοιόμορφης ανακατανομής των βλαβών μέσα στη μάζα του πυρήνα ανάληψης του φορτίου



**Σχήμα 3.** Διαγράμματα λειτουργικότητας μέσα στο χρόνο ανάλογα με το βαθμό βλάβης στο επίπεδο θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων 2.5%, μετά από σεισμικό συμβάν

(ασθενής κρίκος) χρησιμοποιώντας κατάλληλη εξωτερική περίσφιγξη. Η περίσφιγξη απαιτείται να είναι ελαστική ώστε να μην συσσωρεύει βλάβη και παράλληλα υψηλής παραμόρφωσης αστοχίας και εύκαμπτη (χαμηλή ευαισθησία σε βλάβη, δρα ως φράχτης βλάβης). Επιπλέον, δεν πρέπει να είναι επικολημένη ώστε να αναπτύσσει μόνο τριβή με τον πυρήνα σκυροδέματος ή τον μανδύα FRP και να ανακατανέμει την ανηγμένη παραμόρφωση γύρω από και μέσα στον πυρήνα. Σε αυτήν την περίπτωση, η συνολική μάζα του πυρήνα υπό την περιοριστική δράση περίσφιγξης καθώς και η ενέργεια που απορροφάται αναμένεται να είναι η μέγιστη. Παράλληλα η δράση περίσφιγξης είναι ολοένα αυξανόμενη για υψηλότερη αξονική θλίψη του πυρήνα, θέτοντάς τον υπό



υψηλότερη πολυαξονική θλίψη. Η κατάλληλη δράση περίσφιγξης μπορεί να διατηρήσει τον εγκάρσιο περιορισμό, ο οποίος διαθέτει ευαισθησία στην αναπτυσσόμενη βλάβη στο πυρήνα. Έτσι, ακόμη και εάν το κύριο φέρων υλικό του σκυροδέματος ή ο εσωτερικός χάλυβας ή ο μανδύας FRP, υποστεί τοπική έναρξη βλάβης (υποκείμενη σε ενδεχόμενη περαιτέρω συσσώρευση) η προτεινόμενη περίσφιγξη, μέσω ανακατανομής και ανάπτυξης τριβής, αντιδρά με τρόπο που διαχέει τη βλάβη στο σκυροδέμα και το καθιστά πάλι πιο ομοιόμορφο και πιο ομοιογενές στην απόκρισή του. Επιπλέον, επιστρατεύει περαιτέρω τον μανδύα FRP αναπτύσσοντας πολλαπλή θραύση. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά επιτρέπουν σημαντικά αναβαθμισμένη ικανότητα ανάληψης αξονικού φορτίου, η οποία είναι κρίσιμη για την αποφυγή καταστροφικής πρόωρης κατάρρευσης. Πρόκειται για την προσέγγιση σχεδιασμού Ελαστικής Ανακατανομητικής Ομοιόμορφης Περίσφιγξης (ΕΛΑΝΟΠ).

Επιπλέον παρατηρείται ότι προκύπτουν πρόσθετα οφέλη λόγω της υβριδικής ενίσχυσης καθώς ο μανδύας FRP συνεχίζει να συνεισφέρει στον εγκάρσιο περιορισμό του πυρήνα σκυροδέματος παρά την αρχική του θραύση (η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε κατάρρευση).

Η τεχνική εξωτερικής εγκάρσιας ενίσχυσης (ή και εσωτερικής όπλισης σε νέα στοιχεία πριν τη σκυροδέτηση ή και διέλευσης διαμέσου του πυρήνα του στοιχείου σκυροδέματος) με ινοπλισμό σε μορφή σχοινιού, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα που προκύπτουν κυρίως από την αποφυγή χρήσης ρητινών εμποτισμού και συγκόλλησης αξιοποιώντας έτσι πλήρως τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών χωρίς τους περιορισμούς και ζητήματα τοξικότητας από τη χρήση ρητίνης (μεταξύ άλλων, πλήρως ανακυκλώσιμα υλικά, εύκολο να επαναχρησιμοποιηθούν, φυσικά υλικά με αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες-βασάλτης). Η αποφυγή χρήσης ρητίνης αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος υλικών και επιπλέον η ενεργοποίηση είναι άμεση μετά την εφαρμογή (χωρίς χρόνο σκλήρυνσης της ρητίνης). Η καινοτόμος τεχνική ενίσχυσης - λαμβάνοντας υπόψη και την ευκολία προέκτασης των ινών - αποτελεί σημαντική εναλλακτική ειδικά για απαιτητικές ενισχύσεις όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μανδύες FRP (μεγάλες διαστάσεις υποστυλωμάτων που απαιτούν διαμπερείς τμήσεις εγκάρσιου οπλισμού ενίσχυσης, μικρές ακτίνες καμπυλότητας ακμών λόγω μικρής επικάλυψης σκυροδέματος, διατομές ορθογωνικές ή Γ, απαιτήσεις πυροπροστασίας, περιβαλλοντικές συνθήκες εχθρικές για τη σκλήρυνση ρητινών, άμεση ενίσχυση κτιρίων μετά από σεισμικές βλάβες για προσωρινή υποστύλωσή τους έναντι κατάρρευσης, αποφυγή αύξησης δυσκαμψίας στοιχείων, διατμητικές ενισχύσεις δοκών και κόμβων κλπ) και επιπλέον η καταφυγή σε μανδύες σκυροδέματος ή άλλες τεχνικές καθιστά την επέμβαση απαγορευτική.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλονται στην Ζάρρας Α.Ε., στην Πλαστικά Θράκης Α.Ε., στην Juan Gili S.L και στη Sika Hellas ABEE για την χορηγία του σκυροδέματος, του σχοινοῦ πολυπροπυλενίου, του σχοινοῦ βασάλτη και των υαλοϋφασμάτων-εποξειδικών ρητινών αντίστοιχα. Στους προπτυχιακούς φοιτητές Αρβανίτη Λ., Μουρελάτο Γ., Κουκουρίκο Σ. και Τζιμουλίδη Ε. οφείλονται ευχαριστίες για τη βοήθειά τους στην κατασκευή των δοκιμίων (στα πλαίσια της διπλωματικής τους εργασίας). Παρομοίως, στους προαναφερόμενους φοιτητές και στους Τσέπη Β., Γκιουλέα Μ., Αρχοντάκη Ε., Παναγιωτάκη Γ. και Κωστόπουλο Α. οφείλονται ευχαριστίες για τη βοήθεια στη διεξαγωγή κάποιων από τα παραπάνω πειράματα (επίσης βλέπε Rousakis et al. 2015). Τέλος ευχαριστίες οφείλονται στο προσωπικό του εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών του ΔΠΘ.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Biondini F, Camnasio E, Titi A. “Seismic resilience of concrete structures under corrosion.” *Earthq Engng Struct Dyn* (2015);44:2445–66.

Bocchini PM, Frangopol DM, Ummenhofer T, Zinke T. “Resilience and sustainability of civil Infrastructure: toward a unified approach.” *J Infrastructure Syst* (2014);20(2):1–16. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000177](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000177).

Dong Y, Frangopol DM. “Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties.” *Eng Struct* (2015);83:198–208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.050>.

Echevarria A, Zaghi AE, Christenson R, Accorsi M. “CFFT bridge columns for multihazard resilience.” *J Struct Eng* (2015):C4015002. <http://dx.doi.org/10.1061/>

Fakharifar M, Chen G, Sneed L, Dalvand A. “Seismic performance of post-mainshock FRP/steel repaired RC bridge columns subjected to aftershocks.” *Compos Part B Eng* (2015);72:183–98.

Kwon M, Seo H, Kim J. “Seismic performance of RC-column wrapped with Velcro.” *Struct Eng Mech Int'l J* (2016);58(2).

NAC. “Disaster resilience, a national imperative.” Washington D.C.: The National Academies Press; (2012) [www.nap.edu](http://www.nap.edu).

Rousakis, T. “Hybrid Confinement of Concrete by FRP Sheets and Fiber Ropes Under Cyclic Axial Compressive Loading.” *ASCE, J. Compos. Constr.*, 17(5), (2013), 732–743.

Rousakis, T. “Elastic Fiber Ropes of Ultrahigh-Extension Capacity in

Strengthening of Concrete Through Confinement.” *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(1), (2014), 34–44.

Rousakis T.C., Kouravelou K.B., Karachalios T.K. “Effects of Carbon Nanotube Enrichment of Epoxy Resins on Hybrid FRP - FR Confinement of Concrete.” Elsevier, *Journal of Composites Part B: Engineering*. Volume 57, February (2014), Pages 210-218.

Rousakis T.C., Tourtouras I.S. “RC Columns of Square Section – Passive and Active Confinement with Composite Ropes.” Elsevier, *Journal of Composites Part B: Engineering*. Volume 58, March (2014), pages 573-581.

Rousakis T.C. “Reusable and recyclable nonbonded composite tapes and ropes for concrete columns confinement.” Elsevier, *Journal of Composites Part B: Engineering* (2016), doi: 10.1016/j.compositesb.2016.08.003.

Rousakis T.C., Saridaki M.E., Mavrothalassitou S.A., Hui D. “Utilization of hybrid approach towards advanced database of concrete beams strengthened in shear with FRPs”, *Composites Part B: Engineering*, Volume 85, February (2016), Pages 315-335, ISSN 1359-8368.

Rousakis, T.C. “Inherent seismic resilience of RC columns externally confined with nonbonded composite ropes.” *Composites Part B: Engineering* Volume 135, 15 February (2018), Pages 142-148.

Rousakis T., Panagiotakis G., Kostopoulos A., Archontaki E. “Experimental Testing of Prismatic Concrete Columns Confined by FRP and Composite Fiber Ropes.” ICCE-23, 12-18 July (2015), Chengdu, China, editor David Hui.

Saleem, S., Pimanmas, A., & Rattanapitikon, W. “Lateral response of PET FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 159, (2018), 390–407. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.116>

Sextos, A., Kilanitis, I., Kappos, A., Pitsiava, M., Sergiadis, G., Margaritis, V., Theodoulidis N., Mylonakis G., Panetsos P., Kyriakou K. “SEISMIC RESILIENCE ASSESSMENT OF THE WESTERN MACEDONIA HIGHWAY NETWORK IN GREECE.” *COMPdyn 2017, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computat. Methods in Struct. Dynamics and Earthq. Engin.*, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.), Rhodes, Greece, 15–17 June 2017.

USGS. “U.S. Geological Survey: Earthquakes with 1,000 or More Deaths 1900-2014.” [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world\\_deaths.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world_deaths.php), (2014); Last Accessed September 18, 2016.

Zhang, D., Zhao, Y., Jin, W., Ueda, T., & Nakai, H. “Shear strengthening of corroded reinforced concrete columns using pet fiber based composites”. *Engineering Structures*, 153, (2017), 757–765. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.030>