

Υποστρώματα ΩΣ Περισιγμένα με Σύνθετα Σχοινιά και Υφάσματα ΙΩΠ – Ικανότητα Ανακατανομής Σεισμικών Βλαβών

Θεόδωρος Χ. Ρουσάκης

*Επίκουρος Καθηγητής, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (Δ.Π.Θ), Ξάνθη. E-mail: trousak@civil.duth.gr*

Εισαγωγή

Η ανανηπτικότητα (resilience) 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. Σε ό, τι αφορά το δομημένο περιβάλλον (Bocchini and Frangopol 2012, 2013, Bruneau et al. 2003 μεταξύ άλλων), υπάρχει η ανάγκη για βελτιωμένη επιτελεστικότητα κατά τη διάρκεια και μετά από ένα συμβάν υψηλού κινδύνου που διακόπτει την ομαλή λειτουργία και χρήση του. Είναι σημαντικό να αναπτυχθούν ποσοτικές προσεγγίσεις ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα ανανηπτικότητας (αυτοαποκατάστασης) του δομημένου περιβάλλοντος στο επίπεδο των κατασκευών, των κρίσιμων συστημάτων υποδομών και ολόκληρων κοινοτήτων.

Πρόσφατα οι Biondini et al. (2015) παρουσίασαν μια πιθανοτική αναλυτική προσέγγιση για την αποτίμηση της σεισμικής ανανηπτικότητας (seismic resilience) κατασκευών σκυροδέματος εκτεθειμένων σε οξειδωση χαλύβδινου οπλισμού λόγω χλωριόντων. Συμπέραναν ότι οι χρονοεξαρτώμενες επιπτώσεις της οξειδωσης ενδέχεται να μειώσουν σημαντικά τη δυνατότητα λειτουργίας και την ανανηπτικότητα κατασκευών κατά το σεισμό. Η δυνατότητα λειτουργίας της κατασκευής συνδέεται με τη σεισμική της ικανότητα. Η προηγούμενη έρευνα αναδεικνύει την κρισιμότητα που έχει για το σεισμικό σχεδιασμό κατασκευών με ικανότητα ανάνηψης, η θεώρηση όλων των ενδεχόμενων κινδύνων για όλον το κύκλο ζωής τους. Επομένως, αντίστοιχες απαιτήσεις προκύπτουν και για την αποτελεσματική αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος (ΩΣ).

Σε άλλη μελέτη οι Echevarria et al. (2015) ανέδειξαν την βελτιωμένη ανανηπτικότητα κρίσιμων υποδομών γεφυρών όταν αντί των στύλων ΩΣ χρησιμοποιούνται στύλοι σκυροδέματος εγκιβωτισμένου σε σωλήνα σύνθετων υλικών (ινωπλισμένων πολυμερών – fiber reinforced polymers FRP), σε συντομία concrete-filled FRP tube (CFFT). Ερένησαν πειραματικά στύλους υπό φορτία έκρηξης, φωτιάς ή σεισμικής διέγερσης (πειραματική αποτίμηση πολλαπλών κινδύνων) διαφορετικού μεγέθους. Προέκυψε χαμηλότερη βλάβη στύλων, λιγότερος χρόνος αποκατάστασης και χαμηλότερο κόστος επισκευής για την περίπτωση των CFFT. Φυσικά, απαιτείται να ικανοποιούνται οι πολυεπίπεδες κοινωνικές ανάγκες και η κοινωνική δυνατότητα μέσω της ανάπτυξης στόχων επιτελεστικότητας βασισμένων στη διακινδύνευση (Bocchini et al. 2014, McAllister 2013). Οι Bocchini et al. (2014) πρότειναν μια προχωρημένη προσέγγιση αποτίμησης διακινδύνευσης ώστε να ενιαιοποιηθούν οι απαιτήσεις ανανηπτικότητας και αειφορίας (βιωσιμότητας). Πιο πρόσφατα, οι Dong and Frangopol (2015) εξέτασαν την ανανηπτικότητα οδογεφυρών υποβαλλόμενων σε κύριο σεισμό και μετασεισμούς. Θεώρησαν ότι οι αβεβαιότητες διαφόρων πλευρών αυξάνουν στις περιπτώσεις

ισχυρών μετασεισμών και θα έπρεπε οι μετασεισμοί να λαμβάνονται υπόψη στην αποτίμηση της σεισμικής επιτελεστικότητας των γεφυρών. Επομένως, προκύπτουν νέες προκλήσεις σχετικές με τον σεισμικό επανασχεδιασμό με χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας (resilience) και με τη χρήση προηγμένων υλικών σε αντικατάσταση ή μαζί με το χαλύβδινο οπλισμό στο σκυρόδεμα. Αυτές αφορούν επίσης την χρονο-εξαρτώμενη ανθεκτικότητα και τις επιπτώσεις πολλαπλών σεισμικών διεγέρσεων, στο πλαίσιο της αποτίμησης για όλον τον κύκλο ζωής τους. Οι διαφορετικές διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές για το σχεδιασμό νέων κατασκευών ή των τεχνικών αποκατάστασης για το σεισμικό ανασχεδιασμό υφιστάμενων κατασκευών και των δομικών τους στοιχείων, ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά την ανανηπτικότητα υποδομών ή και αυτήν σε επίπεδο κοινωνίας.

Η παρούσα μελέτη αναδεικνύει για πρώτη φορά ορισμένες δομικές πτυχές της συγκριτικής ποιοτικής και ποσοτικής αποτίμησης της εγγενούς ανανηπτικότητας (resilience) των υποστυλωμάτων ΩΣ σε υφιστάμενες κατασκευές ενισχυμένες με μη επικολλούμενα σύνθετα υλικά. Η έρευνα εστιάζει στην ικανότητα των υποστυλωμάτων να διατηρήσουν την αντοχή τους σε αξονικό φορτίο μέσω της ικανότητας ανακατανομής των αναπτυσσόμενων βλαβών. Η ικανότητα ανακατανομής βλαβών σε επίπεδο δομικών στοιχείων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ανανηπτικότητα (resilience) σε επίπεδο κατασκευών κλπ. Οι Echevarria et al. (2015), αναγνωρίζουν την κρισιμότητα του ζητήματος αυτού, όπως για παράδειγμα, μετά από ένα σεισμό μια γέφυρα μπορεί να είναι ακόμα σε χρήση για τη διέλευση διασωστών και οχημάτων έκτακτης ανάγκης προς συγκεκριμένες περιοχές που επλήγησαν. Αυτό, μπορεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ανανηπτικότητα σε επίπεδο κατασκευών και σε κοινωνικό επίπεδο. Ομοίως, κρίσιμες υποδομές ωπλισμένου σκυροδέματος όπως Νοσοκομεία, Πυροσβεστικοί Σταθμοί και Κέντρα Διοίκησης μπορεί να απαιτούν παρόμοια επίπεδα επιτελεστικότητας ως σύνολο, προκειμένου να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.

Στην παρούσα μελέτη το ενισχυμένο υποστυλώμα ΩΣ θεωρείται κυρίως ως υποσύστημα με ικανότητα ανακατανομής των βλαβών που αποτελεί κρίσιμο συστατικό της κατασκευής, η οποία ανήκει σε ένα δίκτυο υποδομών ζωτικής σημασίας για να εκπληρώσει τις απαιτήσεις ανανηπτικότητας. Επιπρόσθετα, εξετάζονται χαρακτηριστικά ικανότητας ανακατανομής των βλαβών σε επίπεδο υλικών και διατομών εντός του υποσυστήματος. Τέλος, συζητείται η ανανηπτικότητα υποστυλωμάτων με βλάβες μετά από ισχυρούς σεισμούς.

Δομική εγγενής ανανηπτικότητα

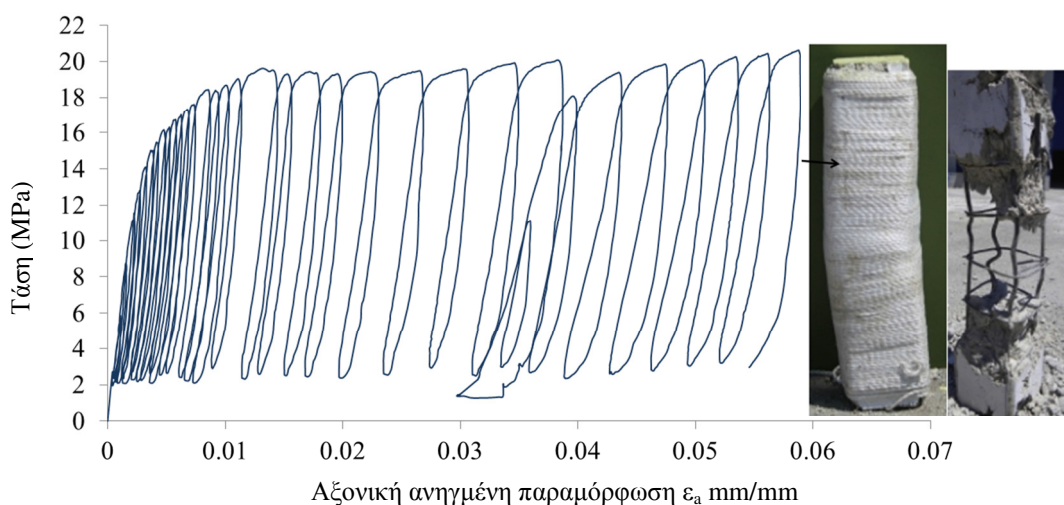
Στην παρούσα εργασία η ανανηπτικότητα σε επίπεδο ενισχυμένων υποστυλωμάτων ΩΣ, ερμηνεύεται ως η ικανότητα: να απορροφά, αντιστέκεται, να ανακάμπτει από και με μεγαλύτερη επιτυχία να προσαρμόζεται στις σεισμικές υπερκαταπονήσεις (σε όρους φορτίου ή μετακινήσεων ή ενέργειας) σε σχέση με οριακές καταστάσεις που απαιτούνται από το σχεδιασμό. Η μελέτη αυτή περιορίζεται στις περιπτώσεις υποστυλωμάτων επανασχεδιασμένων ώστε να ξεπεραστούν οι παραπάνω προκλήσεις με αυξημένη πλαστιμότητα μετακινήσεων, μέσω εξωτερικής περίσφιγξης του σκυροδέματος. Με επαρκή περίσφιγξη του σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή πλαστιμότητα ανηγμένων παραμορφώσεων ώστε να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη πλαστιμότητα σε επίπεδο διατομής και μέλους. Εναλλακτικά, κατά τον επανασχεδιασμό κατασκευών θα μπορούσε να εφαρμοστεί στρατηγική αύξησης της αντοχής, ή παθητικός έλεγχος ή σεισμική μόνωση. Η ικανοποιητική απομένουσα ικανότητα σε αξονικό φορτίο για υψηλά επίπεδα πλαστιμότητας μετακινήσεων απαιτεί την αποφυγή ψαθυρών τύπων αστοχίας ώστε να διασφαλιστεί η διαρροή του διαμήκους χάλυβα και η πλήρης

αξιοποίησή του κατά την κράτυνση και έως την εμφάνιση φαινομένων γενικής αστάθειας δομικού μέλους. Στις ανεπιθύμητες ψαθυρές αστοχίες περιλαμβάνονται: η διατμητική αστοχία σκυροδέματος, αστοχία σκυροδέματος σε θλίψη, πρόωρος λυγισμός ράβδων χάλυβα σε θλίψη και απώλεια επικάλυψης, σχετική ολίσθηση των ράβδων σε ενώσεις, αστοχία αγκύρωσης χαλύβδινων συνδετήρων και πρόωρη θραύση εξωτερικής ενίσχυσης FRP. Επομένως, κατά τον επανασχεδιασμό των στοιχείων ΩΣ εμποδίζεται η απότομη, ψαθυρή ρηγμάτωση του σκυροδέματος που οδηγεί σε σημαντική απώλεια φέρουσας ικανότητας. Επίσης, είναι σημαντικό να αποφευχθεί η αστοχία του μηχανισμού αντίστασης ώστε να επιτευχθεί αυξημένη πλαστιμότητα μετακινήσεων. Η διαρροή των χαλύβδινων ράβδων και η επαρκής περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι οι δύο βασικοί μηχανισμοί σε επίπεδο δομικού στοιχείου για την απορρόφηση της ενδεχόμενης πλεονάζουσας σεισμικής ενέργειας (πέραν αυτής που προβλέπεται από το σχεδιασμό) που εισάγεται στην κατασκευή. Στις περιπτώσεις που η περίσφιγξη υλοποιείται με χαλύβδινους συνδετήρες, μετά τη διαρροή του χάλυβα αναπτύσσονται απομένουσες (πλαστικές) ανηγμένες παραμορφώσεις ενώ η μετελαστική κλίση του διαγράμματος τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων του μειώνεται σημαντικά. Επομένως, η περιοριστική δράση του χάλυβα περίσφιγξης εξασθενεί. Για περαιτέρω φόρτιση, η ανάπτυξη βλάβης στη συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει υψηλότερο ρυθμό και ενδέχεται να οδηγήσει σε αστοχία μέλους καθώς το σκυρόδεμα αποδιοργανώνεται.

Επιρροές της περίσφιγξης με σύνθετο σχοινί στη δομική ανανηπτικότητα υποστυλωμάτων ΩΣ

Στα προαναφερόμενα μπορεί να συνεισφέρει η ενίσχυση των υποστυλωμάτων ΩΣ με σχοινιά σύνθετων υλικών χωρίς τη χρήση ρητινών επικόλλησης ή εμποτισμού. Η επαρκής περίσφιγξη με σύνθετα σχοινιά μπορεί να εξασφαλίσει τη μέγιστη αξιοποίηση της ικανότητας του σκυροδέματος σε θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση, καθώς επιτρέπει την ανακατανομή των ανηγμένων πλευρικών παραμορφώσεων σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του υποστυλώματος κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Οι παραπάνω μεταβαλλόμενες απαιτήσεις εξαρτώνται από τις διαστάσεις της επικάλυψης του σκυροδέματος, την αντοχή και τη ρηγμάτωσή του καθώς και από την απόκριση του περισφιγμένου πυρήνα σκυροδέματος (πλευρική διόγκωση). Επιπλέον, εξαρτώνται από την έναρξη της διαρροής και το πλατώ κράτυνσης του χαλύβδινου συνδετήρα, από την ευαισθησία των διαμήκων ράβδων σε λυγισμό καθώς και από το σχήμα της διατομής και τη λεπτομέρεια των οπλισμών μέσα στη διατομή. Όλες οι παραπάνω παράμετροι έχουν μεταβαλλόμενες επιρροές κατά τη διάρκεια φόρτισης. Η επίτευξη ανακατανομής των ανηγμένων πλευρικών παραμορφώσεων προκαλεί ανακατανομημένη βλάβη και επομένως εκτεταμένη και ομοιόμορφη ρηγμάτωση του σκυροδέματος (Rousakis 2013, Rousakis 2014, Rousakis et al. 2014, Rousakis and Tourtouras 2014) για μονότονη ή κυκλική θλιπτική φόρτιση. Το παραπάνω μοναδικό χαρακτηριστικό σε επίπεδο διατομής μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της ανανηπτικότητας (resilience) υποστυλωμάτων υπό αξονικό φορτίο. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται το υποστυλώμα ΩΣ 500PPL4 με τετραγωνική διατομή από την μελέτη Rousakis and Tourtouras (2014), περιτυλιγμένο με σύνθετο σχοινί πολυπροπυλενίου (PPFR) καθώς και η καμπύλη τάσεων – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεών του. Το υποστυλώμα παρουσιάζει εκτεταμένο γενικό λυγισμό σε επίπεδο στοιχείου, πολλαπλούς τοπικούς λυγισμούς χαλύβδινων διαμήκων ράβδων, πολλαπλές τοπικές διογκώσεις του πυρήνα σκυροδέματος σε διαφορετικά σημεία και άθικτο το σχοινί σύνθετου υλικού. Ταυτόχρονα, το υποστυλώμα διατηρεί την ικανότητα σε αυξανόμενο αναλαμβανόμενο αξονικό φορτίο (βλέπε σχήμα 1) για θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις περίπου 0.06 ενώ το πείραμα διακόπηκε πρόωρα για λόγους ασφαλείας. Επομένως, το απόθεμα εγγενούς δομικής ανανηπτικότητας του πυρήνα σκυροδέματος έναντι αξονικών φορτίων –

εάν αποτιμηθεί σε όρους πλαστιμότητας αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων – και του υποστυλώματος ως σύνολο είναι ακόμη υψηλότερο. Η ικανότητα ανακατανομής της πλευρικής ανηγμένης παραμόρφωσης του εύκαμπτου, μη επικολημένου ελαστικού υλικού περίσφιγξης οδηγεί στη βέλτιστη ανακατανομή βλαβών σε επίπεδο υλικού. Έτσι μετά τη διακοπή της δοκιμής διαπιστώνονται οι παρακάτω βλάβες: ο πυρήνας σκυροδέματος είναι διογκωμένος σε πολλές διαφορετικές περιοχές κατά μήκος του υποστυλώματος και διαφορετικές χαλύβδινες ράβδοι παρουσιάζουν πολλαπλό λυγισμό μεταξύ διαφορετικών συνδετήρων (σχήμα 1). Αυτού του είδους η περίσφιγξη περιορίζει την ανάπτυξη περαιτέρω (ακραίας) βλάβης σε περιοχές αρχικής έναρξης της καθώς επιστρατεύει απομένουσες μη βλαμμένες περιοχές μέσω της ανακατανομής και επομένως αξιοποιεί μεγαλύτερο ποσοστό των υφιστάμενων χρησιμοποιούμενων υλικών στο υποστύλωμα.



Σχ. 1 Υποστύλωμα ΩΣ 500PPL4 περισιφιγμένο με σύνθετο σχοινί PPF.

Παρόμοια είναι η συμπεριφορά του ίδιου δοκιμίου όταν μετά την αρχική φόρτισή του επισκευάστηκε με μη συρρικνούμενο τσιμεντοκονίαμα, περιτυλίχθηκε με 6 στρώσεις ταινίας βασάλτη και 4 στρώσεις σχοινού PPF (δοκίμιο RCrepBFTL9PPL4R) και υποβλήθηκε στο ίδιο ιστορικό φόρτισης (βλέπε Rousakis 2016). Η καμπύλη σ - ϵ του επισκευασμένου υποστυλώματος είναι ελαφρώς βελτιωμένη σε σχέση με το αρχικό και διακόπτεται πρόωρα σε αξονική ανηγμένη παραμόρφωση 0.052.

Από την άλλη πλευρά, σε περιπτώσεις υποστυλωμάτων ΩΣ περισιφιγμένων με εσωτερικούς χαλύβδινους συνδετήρες ή με εξωτερικό μανδύα σύνθετων υλικών (FRP) ή με εσωτερικό χάλυβα και εξωτερικό FRP, είτε δεν είναι δυνατή η ανακατανομή των βλαβών είτε είναι μηδαμινή. Υπό ισχυρό αξονικό φορτίο, οι ρωγμές του σκυροδέματος διευρύνονται περαιτέρω και οξύνεται η ανομοιομορφία των βλαβών. Οι παραπάνω ανεπανόρθωτες ανομοιομορφίες οξύνονται περαιτέρω μετά τη διαρροή των χαλύβδινων συνδετήρων ή την έναρξη της θραύσης των ινών του μανδύα FRP. Τότε, η βλάβη συσσωρεύεται τοπικά και οδηγεί σε γενική αστοχία του υποστυλώματος. Ωστόσο, η χρήση πρόσθετης εξωτερικής περιτύλιξης με σύνθετο σχοινί μπορεί να προσδώσει χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας και σε αυτές τις περιπτώσεις (βλέπε τις μελέτες Rousakis 2013, Rousakis et al. 2014, Rousakis and Tourtouras 2014, Rousakis 2016).

Σε όρους αξονικού φορτίου – αξονικής παραμόρφωσης, η προσωρινή πτώση του φορτίου του υποστυλώματος σκυροδέματος περισιφιγμένου με σύνθετο σχοινί αποτελεί χαρακτηριστικό προηγμένης ανανηπτικότητας. Ακόμη και σε περιπτώσεις χαμηλής περίσφιγξης με σχοινί

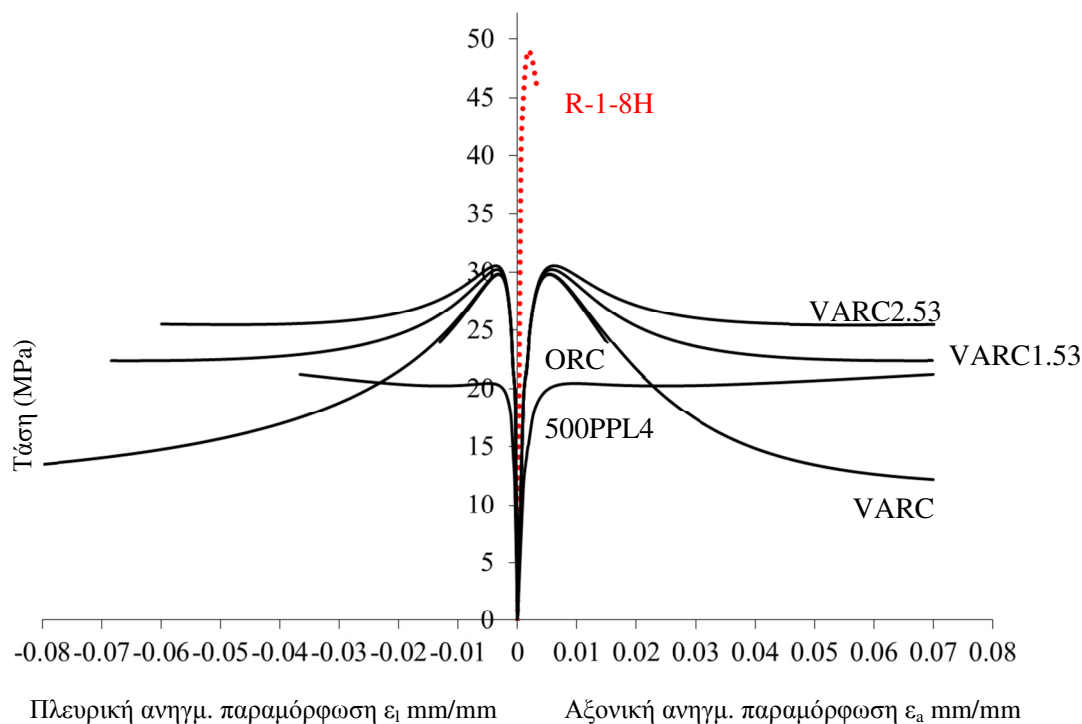
(ανεπαρκής), το υποστύλωμα ενδέχεται να υποστεί σημαντική πτώση φορτίου, ακολουθούμενη από ανάκτηση αξονικού φορτίου μέχρι και πολύ υψηλά επίπεδα (βλέπε για παράδειγμα το υποστύλωμα 20tPPL3R1 από την εργασία Rousakis 2013). Επιπλέον, σε περιπτώσεις θραυσμένων πολύκλωνων σχοινιών από ίνες βίνυλον (vinylon fiber ropes, VFR), η αστοχία κλώνο – κλώνο και η τριβή μεταξύ VFR και σκυροδέματος παρέχει αξιοσημείωτη επαναφορά φορτίου μεταξύ διαδοχικών κύκλων φόρτισης. Το υποστύλωμα VinL1v2R2 (Rousakis 2013) διατήρησε την ακεραιότητά του μετά τη θραύση ενός από τους τρεις κλώνους VFR και έφθασε στην επόμενη επαναφόρτιση το 95% του μέγιστου αναλαμβανόμενου φορτίου. Σε περιπτώσεις υποστυλωμάτων ΩΣ, η προσωρινή πτώση φορτίου είναι ακόμη μικρότερη από την αντίστοιχη υποστυλωμάτων σκυροδέματος περιτυλιγμένων με σύνθετα σχοινιά. Η ανανηπτικότητα οφείλεται στην παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος, στην ανακατανομή ανηγμένων παραμορφώσεων στο σχοινί και στην υψηλή παραμορφωσιμότητα του σχοινιού χωρίς αστοχία. Η πολύ χαμηλή ευαισθησία του σύνθετου σχοινιού σε ενδεχόμενες βλάβες λόγω της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και η θραύση κλώνο – κλώνο του σχοινιού VFR χαμηλότερης παραμορφωσιμότητας είναι επιπρόσθετα χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται σε δοκίμια σκυροδέματος περισφιγμένα με vinylon ή πολυπροπυλένιο ή ταινίες βασάλτη ή ταινίες υπερυψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλενίου (UHMWPE, Endumax) υποβαλλόμενα σε μονότονη ή επαναλαμβανόμενη φόρτιση – αποφόρτιση – επαναφόρτιση (Rousakis 2016). Η μέγιστη αξιοποίηση του δυναμικού του υποστυλώματος επέρχεται με την απόκριση «ελατηρίου» του φέροντος σκυροδέματος σε πολύ υψηλά επίπεδα ανηγμένων παραμορφώσεων. Αυτή η κατάσταση δηλώνει τη σημαντική υποβάθμιση της «συνοχής» του πυρήνα (Rousakis 2014). Σε αυτό το στάδιο, η εκτεταμένη ρηγμάτωση οδηγεί σε μέγιστη ομοιομορφία στην απόκριση. Η απόκριση «ελατηρίου» είναι τυπική για υποστυλώματα σκυροδέματος σε μονότονο ή κυκλικό θλιπτικό φορτίο.

Οι Kwon et al. (2016) χρησιμοποιούν περιτύλιξη με σύνθετη ταινία ώστε να αναβαθμίσουν την πλαστιμότητα πλευρικών μετακινήσεων δίστυλων πλαισίων ΩΣ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα πλαίσια έχουν ανεπαρκείς, αραιούς χαλύβδινους συνδετήρες, χαμηλή διατμητική αντοχή και λυγηρές διαμήκεις ράβδους. Τα υποστυλώματα έχουν διατομή 200 X 300 mm και μηδενική ακτίνα καμπυλότητας ακμής. Οι ερευνητές εφαρμόζουν μόνο μία στρώση εξωτερικής περίσφιγξης με ταινία Velcro με πάχος 0.3 mm, από νάυλον με λεπτομέρεια αυτο-αγκύρωσης. Η μηδαμινή περίσφιγξη με Velcro οδηγεί σε μηδαμινή βελτίωση τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος. Η παρεχόμενη περίσφιγξη είναι 6 φορές χαμηλότερη από αυτήν του υποστυλώματος 500PPL4 από την μελέτη των Rousakis and Tourtouras (2014), όπως θα φανεί στο επόμενο εδάφιο. Ωστόσο, η ελαστική μη επικολημένη ταινία σύνθετου υλικού επιδεικνύει μοναδικά χαρακτηριστικά περίσφιγξης περιορίζοντας τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος επικάλυψης και καθυστερώντας την ανάπτυξη των βλαβών. Οδηγεί σε αυξημένη ανώτατη μετακίνηση του πλαισίου κατά 1.25 φορές και σε αυξημένη απορροφούμενη ενέργεια κατά 3.7 φορές (υποστύλωμα VARC). Υπό αυτήν την έννοια, οι Kwon et al. (2016) επεκτείνουν το δυναμικό σεισμικής ανανηπτικότητας (seismic resilience) μη επικολημένων, εύκαμπτων σύνθετων ταινιών ή σχοινιών υψηλής παραμορφωσιμότητας.

Επιρροές της περίσφιγξης με σύνθετο σχοινί στην απόκριση φορτίου – οριζόντιας μετακίνησης υποστυλωμάτων ΩΣ

Παρακάτω, η πειραματική συμπεριφορά ενισχυμένων υποστυλωμάτων ΩΣ από τη μελέτη των Kwon et al. (2016) αξιοποιείται για συγκριτικές επεξεργασίες. Αρχικά παρουσιάζεται η ανάλυση του υποστυλώματος VARC των Kwon et al. για αυξανόμενο κεντρικό αξονικό θλιπτικό φορτίο έως την

αστοχία. Η καμπύλη σ-ε (σχήμα 2) αναπαράγεται με το προσομοίωμα Rousakis and Tourtouras (2016). Το προσομοίωμα είναι επαναληπτικό και βασίζεται στο προσομοίωμα των Spoelstra and Monti (1999) όπως υιοθετήθηκε από τον *fib* 14 (2001). Έχει αναπτυχθεί περαιτέρω ώστε να λάβει υπόψη τη διπλή επιρροή των χαλύβδινων συνδετήρων και του μανδύα FRP, τη συνεισφορά των χαλύβδινων ράβδων, την περίσφιγξη με σύνθετο σχοινί ή με προεντεταμένο σχοινί ή με προντεταμένο μανδύα FRP. Η συνεισφορά του εσωτερικού χαλύβδινου οπλισμού (συνδετήρων και ράβδων) ενδέχεται να είναι σημαντική στη συμπεριφορά τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων υποστυλωμάτων υπό αξονικά φορτία (Triantafyllou et al. 2015). Το προσομοίωμα μπορεί να περιγράψει την ανελαστική κρατυνόμενη συμπεριφορά ή αυτήν της απομείωσης των τάσεων για αύξηση των ανηγμένων παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος. Στο σχήμα 2 τεκμηριώνεται ότι σε όρους σ-ε, η διαφορά μεταξύ μη ενισχυμένου υποστυλώματος (ORC) και ενισχυμένου με ταινία Velcro (VARC) είναι μηδαμινή (αναλυτική καμπύλη). Ως μέτρο της παρεχόμενης εξωτερικής περίσφιγξης μεταξύ διαφορετικών υποστυλωμάτων ορίζεται το μέγιστο ενεργό μέτρο δυστένειας της περίσφιγξης της ενίσχυσης ως: η μέγιστη ενεργή παρεχόμενη πλευρική τάση (f_{ljmax}), διαιρούμενη με την πλευρική ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_l), πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης (α_j) και διαιρούμενη με την αντοχή του άοπλου σκυροδέματος (f_{co}), δηλαδή $(f_{ljmax}/\epsilon_l) \cdot \alpha_j / f_{co}$. Για την ενίσχυση με Velcro το μέτρο δυστένειας περίσφιγξης ισούται με 0.25.



Σχ. 2 Αναλυτικές καμπύλες σ-ε υποστυλωμάτων ΩΣ με το προσομοίωμα Rousakis and Tourtouras (2016).

Στο σχήμα 2 απεικονίζεται επίσης η αναλυτική καμπύλη σ-ε σε αξονικό θλιπτικό φορτίο για το υποστυλώμα 500PPL4 με μέτρο δυστένειας περίσφιγξης ενίσχυσης 1.53. Η αναλυτική καμπύλη σ-ε του υποστυλώματος VARC για μέτρο δυστένειας περίσφιγξης ενίσχυσης 1.53 (ίσο με αυτό του 500PPL4) είναι η VARC1.53. Η καμπύλη έχει φθίνοντα μεταελαστικό κλάδο καθώς οι υφιστάμενοι εσωτερικοί χαλύβδিনি συνδετήρες έχουν χαμηλότερη αποτελεσματικότητα από αυτούς του

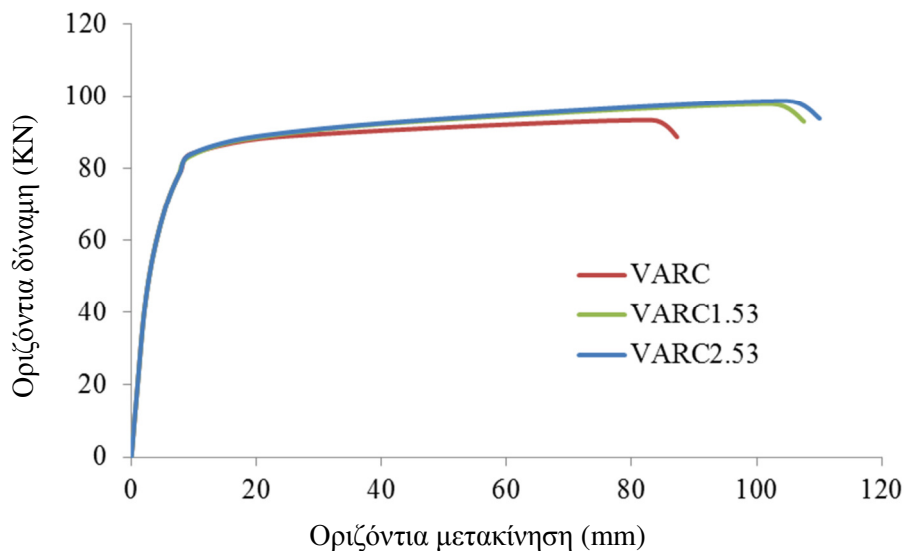
υποστυλώματος 500PPL4. Η φθίνουσα συμπεριφορά είναι τυπική για μη κυκλικά υποστυλώματα ΩΣ μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η απομείωση του αναλαμβανόμενου φορτίου για το VARC1.53 ελέγχεται καλύτερα από ότι στην περίπτωση VARC. Άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι το υποστυλώμα R-1-8H με διαστάσεις διατομής 508 mm X 737 mm και στρωγγυλεμένες ακμές με ακτίνα καμπυλότητας 25.4 mm, υποβαλλόμενο σε αξονικό κεντρικό θλιπτικό φορτίο από τη μελέτη των De Luca et al. (2011). Το υποστυλώμα περισιφίγγεται με 8 στρώσεις υβριδικού υφάσματος γυαλιού – βασάλτη FRP και μέτρο δυστένειας περισφιγξης ενίσχυσης 2.53. Η αντίστοιχη καμπύλη σ-ε του R-1-8H σύμφωνα με το προσομοίωμα Rousakis and Tourtouras (2015) παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Η καμπύλη σ-ε του υποστυλώματος VARC με ισοδύναμη δυστένεια περισφιγξης 2.53 (VARC2.53) αποκαλύπτει ακόμη καλύτερα ελεγχόμενο φθίνοντα κλάδο, σταθεροποιημένο σε υψηλότερη αναλαμβανόμενη τάση. Επιπλέον, η αξονική ανηγμένη παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος αναμένεται υψηλότερη από 0.07 για περισφιγξη με σύνθετο σχοινί (βλέπε τα πειράματα των Rousakis and Tourtouras 2014). Από την άλλη, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα για το υποστυλώμα R-1-8H με περισφιγξη FRP, η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας για το υποστυλώμα VARC θα ήταν πάρα πολύ χαμηλή εάν ενισχυόταν με FRP. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μανδύας FRP έχει χαμηλή παραμόρφωση αστοχίας και χαμηλό μέτρο πλευρικής δυστένειας. Επιπλέον, η μηδενική ακτίνα καμπυλότητας στις ακμές της ορθογωνικής διατομής VARC, αναμένεται να προκαλέσει πρόωρη θραύση των ινών του μανδύα FRP και να ελαχιστοποιήσει την αποτελεσματικότητά του.

Οι παραπάνω αναλυτικές καμπύλες σ-ε αξιοποιούνται στη στατική ανελαστική ανάλυση (pushover) του υποστυλώματος VARC με σταθερό αξονικό φορτίο, με το λογισμικό RESPONSE 2000 (βλέπε επίσης την εργασία Rousakis et al. 2016). Η προβλεπόμενη μετακίνηση αστοχίας από την ανάλυση για ενίσχυση με 1 στρώση Velcro είναι 87.2 mm και παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές για ανακυκλιζόμενη φόρτιση 86.9 mm και 95.4 mm. Εάν εξεταστεί η περίπτωση ενίσχυσης του υποστυλώματος με 6 τρώσεις Velcro, η οποία ισοδυναμεί με αυτήν του υποστυλώματος 500PPL4 (μέτρο δυστένειας περισφιγξης 1.53), η αναλυτική μετακίνηση αστοχίας της VARC1.53 είναι 107.6 mm. Στην περίπτωση ενίσχυσης με 10 στρώσεις ταινίας Velcro (ισοδύναμη του R-1-8H με μέτρο δυστένειας περισφιγξης 2.53) η αναλυτική μετακίνηση της VARC2.53 είναι 110 mm. Παρατηρείται ότι η μετακίνηση της VARC1.53 είναι υψηλότερη κατά 23% αυτής της VARC και της VARC2.53 είναι υψηλότερη κατά 26% αντίστοιχα. Στο σχήμα 3 εικονίζονται όλες οι αναλυτικές καμπύλες. Είναι προφανές ότι εξαιτίας της μηδενικής ακτίνας καμπυλότητας της διατομής του υποστυλώματος, η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με FRP θα ήταν μηδαμινή καθώς αναμένεται να θραυστούν πρόωρα οι ίνες. Ακόμη και εάν η ακτίνα καμπυλότητας ήταν επαρκής, η πολύ χαμηλή περισφιγξη θα οδηγούσε σε παρόμοια αποτελέσματα.

Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αναδεικνύει για πρώτη φορά τα χαρακτηριστικά εγγενούς ανανηπτικότητας (inherent resilience) υποστυλωμάτων ΩΣ ενισχυμένων με σύνθετα σχοινιά σε σεισμική φόρτιση. Εστιάζει στην ικανότητα των υποστυλωμάτων να διατηρήσουν το αναλαμβανόμενο αξονικό φορτίο τους ενώ παρουσιάζονται συγκριτικά και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας περισφιγξης με χάλυβα και FRP. Από την κριτική ανασκόπηση προκύπτει ότι η εγγενής ανανηπτικότητα του σκυροδέματος περισφιγμένου με σύνθετα σχοινιά οφείλεται στην παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος, στην ικανότητα ανακατανομής των ανηγμένων παραμορφώσεων από το εύκαμπτο και

μη επικολημένο σχοινί και στην πολύ υψηλή παραμόρφωση αστοχίας του σχοινοῦ χωρίς θραύση. Πρόσθετα χαρακτηριστικά ανανηπτικότητας είναι η πολύ χαμηλή ευαισθησία του σχοινοῦ σε βλάβες λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και η θραύση του σχοινοῦ χαμηλής παραμόρφωσης αστοχίας κλώνο-κλώνο.



Σχ. 3 Στατικές ανελαστικές αναλύσεις υποστυλωμάτων VARC για διαφορετικά μέτρα δυστένειας περίσφιγξης.

Σε υποστυλώματα ΩΣ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η τοπική βλάβη του σκυροδέματος, ο εκτεταμένος τοπικός λυγισμός των διαμήκων ράβδων και η γενική αστάθεια του στοιχείου σκυροδέματος αυτό-ανακατανέμεται (εγγενής ιδιότητα εάν θεωρηθεί στο επίπεδο του συστήματος του δομικού στοιχείου) και προκύπτει ολοένα αυξανόμενη ικανότητα ανάληψης αξονικού φορτίου (παρά τους πολλαπλούς τοπικούς και γενικούς λυγισμούς). Η μέγιστη αξιοποίηση επέρχεται με την απόκριση «ελατηρίου» του σκυροδέματος και δηλώνει σημαντική υποβάθμιση της «συνοχής» του πυρήνα μέσω της εκτεταμένης ρηγμάτωσής του. Η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος όπως και η απορροφούμενη ενέργεια είναι εξαιρετικά υψηλές.

Το προσομοίωμα Rousakis and Tourtouras (2015) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτική αποτίμηση της ανανηπτικότητας σκυροδέματος περισιγμένου με χάλυβα και σύνθετο σχοινί ή εξωτερικά επικολλούμενο FRP. Από τις παραμετρικές στατικές ανελαστικές αναλύσεις υποστυλωμάτων λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά αποτελέσματα από τους Kwon et al. προκύπτει ότι η περίσφιγξη με σύνθετα σχοινιά ή ταινίες μπορεί να παρέχει στο υποστυλώμα αξιοσημείωτη ανανηπτικότητα σε σχέση με την ικανότητα ανάληψης κατακόρυφου φορτίου. Η πλαστιμότητα οριζόντιων μετακινήσεων των υποστυλωμάτων αυξάνει σημαντικά για χαμηλότερο μέτρο δυστένειας περίσφιγξης από τον χάλυβα ή το FRP.

Όπως προκύπτει από τη συμπεριφορά του επισκευασμένου υποστυλώματος RCrepBFTL9PPL4R η μη επικολλούμενη περιτύλιξη με σύνθετο σχοινί ή/και ταινία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επισκευή υποστυλωμάτων με βλάβες από σεισμό. Παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία σε βλάβες λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Αποτελεί προσωρινή, άμεσα ενεργοποιούμενη, μη χρονοβόρα,

εύκολα προτανυόμενη και εύκολα αφαιρέσιμη ενίσχυση. Εάν συνδυαστεί με υποστύλωση ή ενίσχυση με εξωτερικά μεταλλικά στοιχεία μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική μέθοδο ενίσχυσης.

Συμπεραίνεται μια νέα προσέγγιση σχεδιασμού στοχεύοντας σε αναβαθμισμένη εγγενή ανηπτικότητα παρόμοιων δομικών υποσυστημάτων. Υποσυστήματα με ασθενή κρίκο επιρρεπή σε μοιραία συσσώρευση βλάβης μπορούν να επιτύχουν αυξημένη εγγενή ανηπτικότητα μέσω της ομοιόμορφης ανακατανομής των βλαβών μέσα στη μάζα του πυρήνα ανάληψης του φορτίου (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 φραγή βλάβης). Επιπλέον, δεν πρέπει να είναι επικολημένη ώστε να αναπτύσσει μόνο τριβή με τον πυρήνα σκυροδέματος 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 είναι πάντα 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 που διαθέτει ευαισθησία στην αναπτυσσόμενη βλάβη στο πυρήνα. Έτσι, ακόμη και εάν το κύριο φέρων υλικό υποστεί τοπική έναρξη βλάβης (υποκείμενη σε ενδεχόμενη περαιτέρω συσσώρευση) η προτεινόμενη περίσφιγξη, μέσω ανακατανομής, αντιδρά με τρόπο που διαχέει τη βλάβη στο σκυρόδεμα και το καθιστά πάλι πιο ομοιόμορφο και πιο ομοιογενές στην απόκρισή του. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει σημαντικά αναβαθμισμένη ικανότητα ανάληψης αξονικού φορτίου, η οποία είναι κρίσιμη για την αποφυγή καταστροφικής κατάρρευσης.

Βιβλιογραφία

- Biondini, F., Camnasio, E., Titi, A. (2015). “Seismic resilience of concrete structures under corrosion”, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 44: 2445–2466. doi: [10.1002/eqe.2591](https://doi.org/10.1002/eqe.2591).
- Bocchini, P., and Frangopol, D. M. (2012). “Restoration of bridge networks after an earthquake: multi-criteria intervention optimization.” *Earthq. Spectra*, 28(2), 427–455.
- Bocchini, P., and Frangopol, D. M. (2013). “Optimal resilience- and cost-based post-disaster intervention prioritization for bridges along a highway segment.” *J. Bridge Eng.*, 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592 .0000201, 1–13.
- Bocchini, P., M., Frangopol, D. M., D. M., Ummenhofer, T., Zinke, T. (2014). “Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach.” *Journal of Infrastructure Systems*, 20(2), 1–16. doi:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000177.
- Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O’Rourke TD, Reinhorn AM, Shinozuka M, Tierney K, Wallace WA, Winterfeldt DV. (2003). “A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities.” *Earthquake Spectra* 2003;19:733–52.
- De Luca, A., Nardone, F., Matta, F., Nanni, A., Lignola, G. P., Prota, A. (2011). “Structural Evaluation of Full-Scale FRP-Confined Reinforced Concrete Columns”, *Journal of Composites for Construction*, 15 (February), 112–123. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943- 5614.0000152.
- Dong, Y., and Frangopol, D. M. (2015). “Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties”. *Engineering Structures*, 83, 198–208. doi:10.1016/j.engstruct.2014.10.050.

- Echevarria, A., Zaghi, A. E., Christenson, R., & Accorsi, M. (2015). "CFFT Bridge Columns for Multihazard Resilience", *Journal of Structural Engineering*, C4015002. doi:10.1061/(ASCE)st.1943-541x.0001292.
- fib* Bulletin 14 (2001). "Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures", *fib* Bulletin 14, Lausanne, 2001 (convener of TG 9.3 A. Triantafyllou).
- Kwon M., Seo H., Kim J. (2016). "Seismic performance of RC-column wrapped with Velcro", *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal* Vol. 58 No. 2, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2016.58.2.379>.
- Li, P., Wu, Y. F. (2015). "Stress-strain model of FRP confined concrete under cyclic loading." *Composite Structures*, 134, 60–71. doi:10.1016/j.compstruct.2015.08.056.
- McAllister, T. (2013). "Developing Guidelines and Standards for Disaster Resilience of the Built Environment: A Research Needs Assessment", 1–142. doi:10.6028/NIST.TN.1795.
- Nisticò N., Pallini F., Rousakis T., Wu Y.F., Karabinis A. (2014). "Peak strength and ultimate strain prediction for FRP confined square and circular concrete sections." *Composites Part B: Engineering*. Volume 67, December 2014, Pages 543–554.
- Rousakis, T. (2014). "Elastic Fiber Ropes of Ultrahigh-Extension Capacity in Strengthening of Concrete Through Confinement." *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(1), 34–44.
- Rousakis, T. (2013). "Hybrid Confinement of Concrete by FRP Sheets and Fiber Ropes Under Cyclic Axial Compressive Loading." *ASCE, J. Compos. Constr.*, 17(5), 732–743.
- Rousakis T.C., Kouravelou K.B., Karachalios T.K. (2014). "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., Saridaki M.E., Mavrothalassitou S.A., Hui D. (2016). "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., Tourtouras I.S. (2014). "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., Tourtouras, I. S. (2015). "Modeling of passive and active external confinement of RC columns with elastic material." *ZAMM Journal*, by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. V.95 (10) pp. 1046 – 1057. Article first published online: 6 AUG 2015. DOI: 10.1002/zamm.201500014.
- Rousakis T.C. (2016). "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.
- Spoelstra M. R., Monti G. (1999). "FRP-confined concrete model", *ASCE Journal of Composites for Construction* 3(3), 143–150.
- Triantafyllou G.G., Rousakis T.C., Karabinis A.I. (2015). "Axially Loaded Reinforced Concrete Columns with a Square Section Partially Confined by Light GFRP Straps." *ASCE Journal of Composites for Construction* 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000496 , 04014035.
- Wu, Y., Wei, Y. (2014). "General Stress-Strain Model for Steel- and FRP-Confined Concrete." *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000511, 04014069.
- Wu, Y., Wei, Y. (2015). "Stress – Strain Modeling of Concrete Columns with Localized Failure : An Analytical Study". *J. Compos. Constr.*, 1–14. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000634.