

Μεθοδολογία υπολογισμού καμπυλών σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών και χρήση τους στο σχεδιασμό της μεθόδου ενίσχυσης

Σωτηρία ΣΤΕΦΑΝΙΔΟΥ¹, Ανδρέας ΚΑΠΠΟΣ²

Λέξεις κλειδιά: Γέφυρες, Σεισμική Αποτίμηση, Καμπύλες Τρωτότητας, Ενισχύσεις
Keywords: Bridges, Fragility Curves, Assessment, Retrofit

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία προτείνεται μεθοδολογία προσδιορισμού εξατομικευμένων καμπυλών σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών, επεκτείνοντας αντίστοιχη που έχει πρόσφατα προταθεί από τους συγγραφείς για υφιστάμενες γέφυρες. Η προτεινόμενη μεθοδολογία καλύπτει γέφυρες ενισχυμένες με διαφορετικές μεθόδους καθώς και σεισμικά αναβαθμισμένες (μέσω παθητικών συστημάτων), ενώ λαμβάνεται υπόψη η τρωτότητα όλων των επιμέρους κρίσιμων συνιστωσών καθώς και διαφορετικές μορφές αστοχίας. Η χρήση των καμπυλών τρωτότητας προτείνεται τόσο για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης, όσο και για το σχεδιασμό της. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το ποιος είναι ο κύριος στόχος της ενίσχυσης επιλέγεται το σχήμα που οδηγεί σε αύξηση του καταφλίου βλάβης της αντίστοιχης στάθμης για την εξεταζόμενη στάθμη σεισμικής έντασης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε υφιστάμενη γέφυρα εξετάζοντας διαφορετικές μεθόδους ενίσχυσης, ενώ σχολιάζεται η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου με βάση τις καμπύλες σεισμικής τρωτότητας της ενισχυμένης γέφυρας.

ABSTRACT : A component-based methodology for the derivation of bridge-specific fragility curves for retrofitted bridges is presented herein, based on a recently proposed methodology for as-built bridges (Stefanidou & Kappos, 2017). The methodology is applicable to bridges retrofitted with different measures (i.e. reinforced concrete (R/C) or FRP jackets) as well as seismically upgraded (using passive systems) bridges. Fragility curves for the retrofitted bridge are utilised for the selection and design of the retrofit scheme. In particular, retrofit measures are selected based on the retrofit target for the performance level considered. The methodology is applied to a case study bridge, considering different retrofit measures, while the optimum retrofit measure selection is discussed, based on the fragility curves of the retrofitted bridge.

¹ Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: ssotiria@civil.ntua.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, και City, University of London, email: Andreas.Kappos.1@city.ac.uk

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη προσεισμικών ενισχύσεων γεφυρών αναδείχθηκε από τις σημαντικές άμεσες και έμμεσες οικονομικές απώλειες που καταγράφηκαν στο τέλος του προηγούμενου αιώνα μετά από ισχυρούς σεισμούς όπως του Whittier Narrows το 1987, της Loma Prieta το 1989, του Northridge το 1994, του Kobe το 1995, κ.α. (έως και \$1.8 δισεκατομμύρια στο σεισμό της Loma Prieta σύμφωνα με τους Zhang et al., 1999). Οι υφιστάμενες μέθοδοι σεισμικής ενίσχυσης ή/και αναβάθμισης γεφυρών ποικίλλουν, ανάλογα και με την εκάστοτε κρίσιμη δομική συνιστώσα, ενώ μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που έχουν ως στόχο τον έλεγχο των μετακινήσεων (προσθήκη ανασχετήρων, διατμητικών συνδέσμων), την αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας (μανδύες Ο/Σ, μεταλλικοί, ή από ΙΟΠ) και στην αύξηση της δυνατότητας απόσβεσης σεισμικής ενέργειας (αποσβεστήρες, εφέδρανα υψηλής απόσβεσης). Σημαντικό εργαλείο για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης, σύμφωνα και με την εκάστοτε στάθμη επιτελεστικότητας, αποτελούν οι καμπύλες τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών, ωστόσο τόσο οι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία καμπύλες όσο και οι μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό τους είναι περιορισμένες. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί καμπύλες σεισμικής τρωτότητας βάθρων ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ (Bisadi *et al.* (2011), Olmos Navarrete *et al.*, (2016)), μανδύα ΙΟΠ (Fakharifar *et al.* 2015), και μεταλλικό μανδύα σε όλο το ύψος του βάρου ή μόνο στο κρίσιμο μήκος αυτού (Kim & Shinozuka (2004), Padgett, (2007)). Επίσης έχει εξεταστεί η επιρροή της αντικατάστασης των εφεδράνων από εφέδρανα υψηλής απόσβεσης με πυρήνα μολύβδου (LRB) και εφέδρανα τριβής τύπου εκκρεμούς (FPS) στη σεισμική τρωτότητα (Choi & Jeon (2003), Zhang & Huo (2009), Padgett, (2007), καθώς και η προσθήκη διατμητικών συνδέσμων και ανασχετήρων. Βασικό μειονέκτημα των διαθέσιμων μεθόδων είναι το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις δεν λαμβάνονται υπόψη όλες οι κρίσιμες συνιστώσες για τον υπολογισμό της τρωτότητας με αποτέλεσμα να μην είναι άμεσος και αποτελεσματικός ο προσανατολισμός των ενισχύσεων. Επιπλέον, οι τιμές κατωφλίων βλάβης, ήτοι η διαθέσιμη αντίσταση ενισχυμένων συνιστωσών (π.χ. των βάρων), δεν διαφοροποιούνται από τις αντίστοιχες πριν από την ενίσχυση, ούτε συσχετίζονται με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες της μεθόδου ενίσχυσης, με αποτέλεσμα να μην καθίσταται δυνατή η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου.

Στην παρούσα εργασία, προτείνεται μεθοδολογία προσδιορισμού εξατομικευμένων καμπυλών σεισμικής τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών, επεκτείνοντας αντίστοιχη που έχει πρόσφατα προταθεί από τους συγγραφείς για υφιστάμενες γέφυρες (Stefanidou & Karros, 2017). Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας, προτείνονται σχέσεις για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης αντίστασης των ενισχυμένων με διαφορετικές μεθόδους και ιδιότητες βάρων. Επιπλέον, ορίζονται οι στάθμες βλάβης των ενισχυμένων στοιχείων τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, υπολογίζοντας τις τιμές κατωφλίου με τις προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις. Η μεθοδολογία προτείνεται τόσο για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης όσο και για το σχεδιασμό της, ανάλογα με τη στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας, ενώ εφαρμόζεται σε υφιστάμενη γέφυρα (άνω διάβαση) και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Μία νέα μεθοδολογία για τον προσδιορισμό εξατομικευμένων καμπυλών σεισμικής τρωτότητας γεφυρών και τη μαζική αποτίμηση αποθέματος γεφυρών οδικού δικτύου προτάθηκε πρόσφατα από τους γράφοντες (Stefanidou & Karros, 2017), ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε λογισμικό για την εφαρμογή της και πραγματοποιήθηκε επέκτασή της σε ενισχυμένες γέφυρες. Αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας είναι διαθέσιμη στη σχετική εργασία, ωστόσο τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής (με έμφαση σε αυτά που αφορούν στις ενισχυμένες γέφυρες) συνοψίζονται παρακάτω:

- Λαμβάνεται υπόψη η σεισμική τρωτότητα όλων των κρίσιμων για την αντισεισμική συμπεριφορά συνιστωσών, ήτοι των βάθρων, εφεδράνων, ακροβάθρων, και θεωρείται σύνδεση ‘εν σειρά’ για τον υπολογισμό της τρωτότητας του συστήματος.
- Οι τιμές κατωφλίων σταθμών βλάβης των ενισχυμένων στοιχείων προσδιορίζονται ποιοτικά και στη συνέχεια ποσοτικά με βάση διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα αναλύσεων.
- Δημιουργείται βάση δεδομένων ενισχυμένων με διαφορετικές μεθόδους βάθρων (π.χ. μανδύα Ο/Σ και ΙΟΠ) μεταβάλλοντας τόσο τις ιδιότητες της αρχικής διατομής όσο και της εκάστοτε μεθόδου ενίσχυσης. Με βάση στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων πληθώρας ανελαστικών αναλύσεων, προτείνονται εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό τιμών κατωφλίου με βάση τα εκάστοτε χαρακτηριστικά της αρχικής διατομής και της μεθόδου ενίσχυσης.
- Προτείνονται δύο προσεγγίσεις υπολογισμού σεισμικής απαίτησης στο σημείο ελέγχου των κρίσιμων συνιστωσών (λεπτομερής και προσεγγιστική), οι οποίες διαφοροποιούνται τόσο σε θέματα προσομοίωσης όσο και στη μέθοδο της ανάλυσης, με ελάχιστο απαιτούμενο να λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών και η διαφορετική μορφή παραμόρφωσης του φορέα (συνοριακές συνθήκες πριν και μετά το κλείσιμο του αρμού).
- Ποσοτικοποιούνται οι αβεβαιότητες στην αντίσταση λαμβάνοντας υπόψη την απόκλιση της τιμής της αντοχής του σκυροδέματος και του χάλυβα του ενισχυμένου στοιχείου από τη μέση τιμή.
- Αναπτύσσεται λογισμικό για την ευχερή μαζική εφαρμογή της μεθοδολογίας και τον υπολογισμό εξατομικευμένων καμπυλών σεισμικής τρωτότητας, στο οποίο ενσωματώνονται όλα τα επιμέρους βήματα της μεθοδολογίας.

ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

Όπως αναφέρθηκε, στο πλαίσιο της μεθοδολογίας, προτείνονται εμπειρικές σχέσεις για τον ποσοτικό προσδιορισμό της διαθέσιμης αντίστασης ενισχυμένων βάθρων, ήτοι των τιμών κατωφλίου οι οποίες σηματοδοτούν την εμφάνιση βλαβών

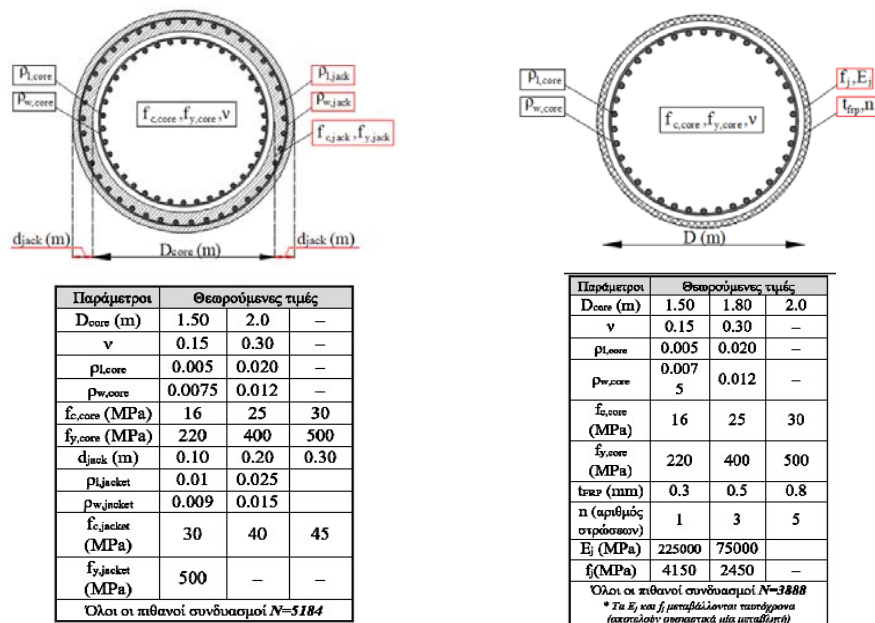
συγκεκριμένης στάθμης. Ως παράμετρος βλάβης χρησιμοποιείται η μετακίνηση του σημείου ελέγχου (καθολική παράμετρος βλάβης) η οποία προσδιορίζεται από ανελαστική ανάλυση μεμονωμένων βάρων λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές πιθανές μορφές αστοχίας (καμπτική, διατμητική). Οι σχέσεις διαφέρουν ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο ενίσχυσης (π.χ. μανδύας Ο/Σ ή μανδύας ΙΟΠ) και συσχετίζουν την τιμή κατωφλίου αρχικής και ενισχυμένης διατομής λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες της εκάστοτε μεθόδου ενίσχυσης (π.χ. πάχος και ποιότητα υλικών μανδύα, αριθμός στρώσεων και ιδιότητες FRP).

Πίνακας 1. Ποιοτική και ποσοτική περιγραφή τιμών κατωφλίου σταθμών βλάβης σε όρους καμπυλοτήτων

Στάθμη βλάβης	Τιμές κατωφλίων (καμπυλότητα)	Ποιοτική περιγραφή
ΣΒ 1 –Μικρές βλάβες	$\varphi_1: \varphi_y$	Οιονεί-ελαστική συμπεριφορά. Μικρορηγματώσεις στο σκυρόδεμα.
ΣΒ 2 –Μεσαίες βλάβες	$\varphi_2: \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi: \varepsilon_c \leq 0.004 \\ \varphi: \varepsilon_s \geq 0.015 \end{array} \right\}$	Αποφλοιώση σκυροδέματος επικάλυψης – Εύρος ρωγμών 1-2mm
ΣΒ 3 –Εκτενείς βλάβες	$\varphi_3: \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi: \varepsilon_c \leq 0.004 + 1.4 \cdot \rho_w \cdot \frac{f_{yw}}{f_{cc}} \\ \varphi: \varepsilon_s \geq 0.06 \end{array} \right\}$	- Λυγισμός διαμήκων ράβδων, θραύση συνδετήρων, διάρρηξη σκυροδέματος περισφιγμένου πυρήνα. – Εύρος ρωγμών >2mm - Απαρχή αποκόλλησης λωρίδων ΙΟΠ
ΣΒ 4 –Αστοχία	$\varphi_4: \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi: M_{res} < 0.90M_{max} \\ \varphi: \varepsilon_s \geq 0.075 \end{array} \right\}$	- Απόλεια φέρουσας ικανότητας- Κατάρρευση. - Διαχωρισμός λωρίδων, πλαστική ροή της ρητίνης, αστοχία ΙΟΠ

Αναλυτικότερα, οι στάθμες βλάβης για τα ενισχυμένα δομικά στοιχεία προσδιορίζονται αρχικά ποιοτικά και ποσοτικά, σε όρους *καμπυλοτήτων* τη στιγμή όπου η παραμόρφωση στην ακραία ίνα ξεπερνά τα όρια τιμών παραμορφώσεων υλικών, με βάση τον Πίνακα 1. Τα όρια των παραμορφώσεων υλικών για την εμφάνιση σταθμών βλάβης λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία ενώ έχει παρατηρηθεί ότι είναι παρόμοια για τα αρχικά και τα ενισχυμένα στοιχεία (Lu et al., (2005), Sheikh & Legeron, (2010), Priestley et al., (2007), Mirmiran & Shahawy, (1997)). Οι τιμές κατωφλίου σε όρους καμπυλοτήτων υπολογίζονται από ανάλυση διατομής κατά την οποία χρησιμοποιούνται μοντέλα περισφιγμένου σκυροδέματος ανάλογα με την εκάστοτε μέθοδο ενίσχυσης (περίσφιξη με μανδύα Ο/Σ ή ΙΟΠ), ενώ το αποτέλεσμα επηρεάζεται σημαντικά από το επιλεγόμενο μοντέλο. Σημαντική παράμετρο για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αποτελεί η συνεκτίμηση ή όχι των συνδετήρων

του πυρήνα στον υπολογισμό της αντοχής και παραμόρφωσης αστοχίας περισφιγμένου σκυροδέματος. Για παράδειγμα, για τα κυλινδρικά βάρη ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ, ο συνυπολογισμός της περίσφιξης της υφιστάμενης διατομής έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας της περισφιγξης («διπλή» περισφιγξη πυρήνα, (Ong *et al*, 2004). Σε ό,τι αφορά στο περισφιγμένο με μανδύα ΙΟΠ σκυροδέμα σημειώνεται ότι ένας μεγάλος αριθμός διατιθέμενων μοντέλων αγνοεί την ύπαρξη εγκάρσιου οπλισμού στον πυρήνα, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις όπου προτείνεται ταυτόχρονη θεώρηση (άθροιση) της περισφιγξης που οφείλεται στους εσωτερικούς συνδετήρες και στα ΙΟΠ. Έχει αποδειχθεί (Biskinis & Fardis, 2013) ότι η παραπάνω θεώρηση δεν είναι συνεπής, καθώς οι συνδετήρες ενεργοποιούνται μετά από την αστοχία του ΙΟΠ.



Σχήμα 1. Θεωρούμενες παράμετροι κυλινδρικών βάρων ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ και μανδύα FRP.

Σε ότι αφορά στον ορισμό των σταθμών βλάβης των ενισχυμένων διατομών, σημειώνεται ότι για την περίπτωση μανδύα Ο/Σ, εξετάζεται επιπλέον η πιθανότητα υπέρβασης της οριακής παραμόρφωσης σκυροδέματος στον πυρήνα πριν από το μανδύα, γεγονός που συμβαίνει σπάνια και για μικρά πάχη μανδύα. Κατά την ανάλυση διατομών περισφιγμένων με μανδύα ΙΟΠ και με στόχο να ληφθεί υπόψη η περίπτωση μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας λόγω αρχικής περισφιγξης πυρήνα (αστοχία διατομής για οριακή παραμόρφωση μεγαλύτερη από την οριακή παραμόρφωση περισφιγμένου με ΙΟΠ σκυροδέματος), η διαδικασία για τον υπολογισμό της οριακής καμπυλότητας και αστοχίας που προτείνεται είναι (Biskinis & Fardis, 2013):

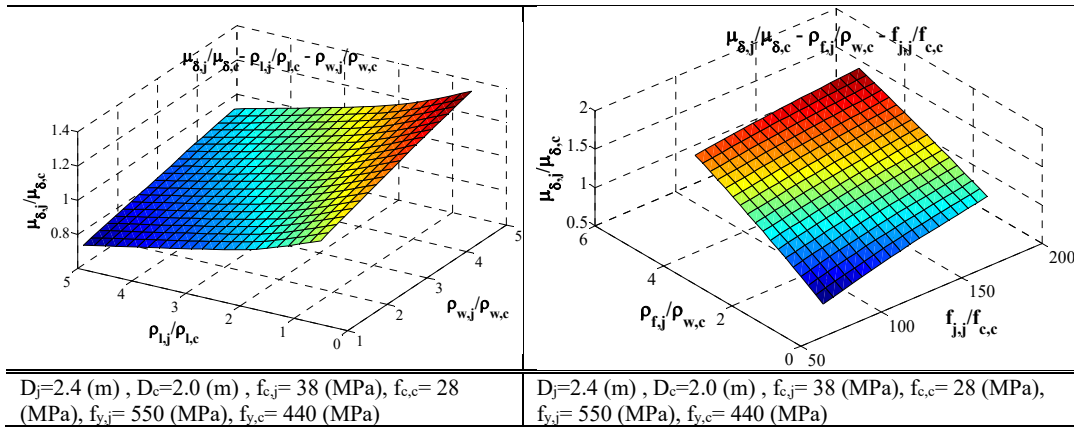
- Υπολογισμός οριακής καμπυλότητας και αστοχίας, θεωρώντας περίσφιγξη μόνον από το μανδύα ΙΟΠ.
- Υπολογισμός οριακής καμπυλότητας και αστοχίας του πυρήνα θεωρώντας μόνον τη περίσφιγξη λόγω συνδετήρων (μετά την αστοχία του ΙΟΠ). Αν η καμπτική αντοχή του πυρήνα είναι μεγαλύτερη από το 80% της αντίστοιχης για περίσφιγξη μόνον με ΙΟΠ, η οριακή παραμόρφωση αναπτύσσεται αργότερα και συσχετίζεται με την οριακή παραμόρφωση του πυρήνα.

Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας δημιουργείται βάση δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή παραμέτρων της αρχικής διατομής και των ιδιοτήτων της μεθόδου ενίσχυσης. Για παράδειγμα, το εύρος των θεωρούμενων παραμέτρων για την περίπτωση των κυλινδρικών βάρων ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ ή ΙΟΠ, παρουσιάζεται στον Σχήμα 1. Σε όλες τις ενισχυμένες διατομές της βάσης δεδομένων διενεργείται ανάλυση διατομής και προσδιορίζονται οι τιμές κατωφλίου σε όρους καμπυλοτήτων ($\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$), καθώς και τα διγραμμικοποιημένα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων ($M-\phi$). Στη συνέχεια με τη βοήθεια αυτοματοποιημένου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε (Mathworks, 2011) και θεωρώντας ένα εύρος υψών, δημιουργείται για το κάθε ενισχυμένο βάρη της βάσης δεδομένων το ανελαστικό προσομοίωμα του ισοδύναμου προβόλου και διενεργείται ανελαστική στατική ανάλυση με χρήση του λογισμικού OpenSees (McKeena & Fenves, 2015). Κατά τη διαμόρφωση του ανελαστικού προσομοιώματος θεωρείται συγκεντρωμένη πλαστική άρθρωση στη βάση εξετάζοντας επιπλέον την επιρροή του διαφορετικού ορισμού μήκους πλαστικής άρθρωσης (Μπισκίνης (2007), Priestley et al. (2007)), ενώ λαμβάνεται υπόψη η ρηγματώση της διατομής (προσδιορίζοντας την εκάστοτε ενεργό δυσκαμψία) και τα φαινόμενα 2ας τάξεως (P-delta). Με βάση τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προτείνονται εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό εξατομικευμένων τιμών κατωφλίων σταθμών βλάβης σε όρους καθολικής παραμέτρου βλάβης, ήτοι της μετακίνησης σημείου ελέγχου, μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί άμεσα από την ανάλυση και να συσχετιστεί με βλάβες του συστήματος (Πίνακας 2). Οι τιμές κατωφλίων σταθμών βλάβης για τα βάρη και τα εφέδρανα παρουσιάζονται αναλυτικά αλλού (Stefanidou & Kappos, 2017).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η επιρροή των επιμέρους μεταβαλλόμενων παραμέτρων στη διαθέσιμη πλαστιμότητα μετακινήσεων κυλινδρικών βάρων ενισχυμένων με μανδύα Ο/Σ και ΙΟΠ, εφαρμόζοντας τις προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις. Η πλαστιμότητα μετακινήσεων (και αντίστοιχα η πλαστιμότητα καμπυλοτήτων) μειώνεται για αύξηση του λόγου ποσοστών διαμήκους οπλισμού, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση του εφελκόμενου τμήματος και αστοχία λόγω συντριβής θλιβόμενης ζώνης, και αυξάνεται για αύξηση του λόγου ποσοστών εγκάρσιου οπλισμού, γεγονός αναμενόμενο καθώς μέσω της αυξημένης περίσφιγξης αυξάνεται η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος.

Οι εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό εξατομικευμένων τιμών κατωφλίων σταθμών βλάβης σε όρους μετακινήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 για κυλινδρικά βάρη ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ και μανδύα ΙΟΠ. Οι τιμές κατωφλίου των ενισχυμένων βάρων συσχετίζονται με τις αντίστοιχες των βάρων πριν από την

ενίσχυση, καθώς και με τους λόγους μεταβαλλόμενων παραμέτρων αρχικής και ενισχυμένης διατομής (ανηγμένα μεγέθη). Οι σχέσεις είναι γραμμικές και προκύπτουν από ανάλυση παλινδρόμησης. Σημειώνεται ότι για να είναι συνεπείς, πρέπει για λόγο παραμέτρων ενισχυμένης προς αρχική ίσο με τη μονάδα η τιμή του λόγου σχετικών μετακινήσεων ενισχυμένης/αρχικής να είναι επίσης ίση με τη μονάδα. Για το λόγο αυτόν εφαρμόζεται η (ενσωματωμένη στη Matlab) μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμούς (least squares for linear equality constraints).



Σχήμα 2. Επιρροή παραμέτρων στο λόγο πλαστιμότητας μετακινήσεων ενισχυμένων/αρχικών κυλινδρικών βάρων (ενίσχυση με μανδύα Ο/Σ και ΙΟΠ)

Πίνακας 2. Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού τιμών καταφλίου σταθμών βλάβης για ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ και ΙΟΠ βάρη

Κυλινδρικά Βάρη (Ενίσχυση με μανδύα Ο/Σ)						
$(\delta_{RCj} / H) / (\delta_{core} / H) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (D_{RCj} / D_{core}) + \beta_2 \cdot (\rho_{l,RCj} / \rho_{l,core}) + \beta_3 \cdot (\rho_{w,RCj} / \rho_{w,core}) + \beta_4 \cdot (f_{c,RCj} / f_{c,core}) + \beta_5 \cdot (f_{y,RCj} / f_{y,core})$						
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
$(\delta_{1,RCj} / H) / (\delta_{1,core} / H)$	+0.566	+0.059	+0.129	+0.016	-0.169	+0.399
$(\delta_{2,RCj} / H) / (\delta_{2,core} / H)$	+1.167	-0.353	+0.012	+0.007	+0.002	+0.164
$(\delta_{3,RCj} / H) / (\delta_{3,core} / H)$	+0.802	-0.212	-0.013	+0.219	-0.324	+0.528
$(\delta_{4,RCj} / H) / (\delta_{4,core} / H)$	+1.094	-0.274	+0.003	+0.124	-0.334	+0.388

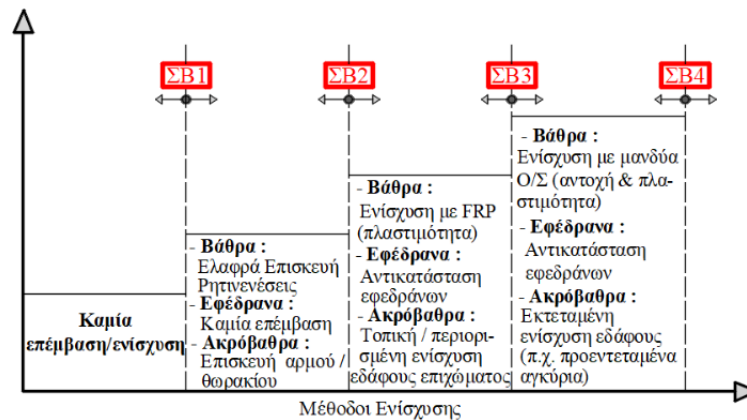
Κυλινδρικά Βάθρα (Ενίσχυση με μανδύα ΙΟΠ)

$$(\delta_{FRP_j} / H) / (\delta_{core} / H) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (D_{FRP,j} / D_{core}) + \beta_2 \cdot (E_{FRP,j} / E_{c,core}) + \beta_3 \cdot (f_{jFRP,j} / f_{c,core}) + \beta_4 \cdot (\rho_{jFRP,j} / \rho_{w,core})$$

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
$(\delta_{1,FRP_j} / H) / (\delta_{1,core} / H)$	-1.27e+02	+1.28e+02	-9.14e-03	+4.06e-03	+4.89e-02
$(\delta_{2,FRP_j} / H) / (\delta_{2,core} / H)$	-7.610	+8.580	+2.67e-03	+4.49e-04	2.91e-02
$(\delta_{3,FRP_j} / H) / (\delta_{3,core} / H)$	+9.02e+01	-8.96e+01	-1.07e-01	+1.40e-02	+4.71e-01
$(\delta_{4,FRP_j} / H) / (\delta_{4,core} / H)$	+7.56e+01	-7.49e+01	-7.61e-02	+1.11e-02	+4.02e-01

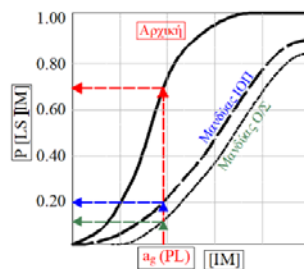
ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Μετά τον προσδιορισμό τιμών καταωφλίου σταθμών βλάβης των κρίσιμων συνιστωσών (με ή χωρίς ενισχύσεις) υπολογίζεται, με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Stefanidou & Karros (2017), η σεισμική απαίτηση και χαράσσονται οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας των συνιστωσών και στη συνέχεια του συστήματος της γέφυρας. Οι καμπύλες σεισμικής τρωτότητας υφιστάμενων γεφυρών χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της αντισεισμικής συμπεριφοράς και μπορούν να αξιοποιηθούν για τον προσανατολισμό ενισχύσεων και τον σχεδιασμό τους, σε συνδυασμό με τις καμπύλες τρωτότητας ενισχυμένων γεφυρών. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τη στάθμη βλάβης του συνολικού συστήματος και την εκάστοτε κρίσιμη συνιστώσα προτείνονται επεμβάσεις/ενισχύσεις, οι οποίες περιγράφονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Επεμβάσεις/Ενισχύσεις συνιστωσών ανάλογα με τη στάθμη βλάβης του συστήματος

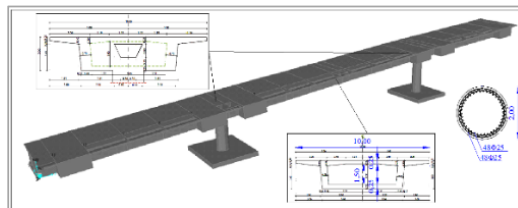
Για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης είναι απαραίτητη η χάραξη των καμπυλών τρωτότητας των ενισχυμένων γεφυρών και των κρίσιμων επιμέρους συνιστωσών. Συγκεκριμένα υπολογίζεται αρχικά η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης της υφιστάμενης γέφυρας και επιλέγεται η μέθοδος ενίσχυσης ανάλογα και με την εκάστοτε κρίσιμη συνιστώσα για το επιλεγμένο κριτήριο επιτελεστικότητας. Στο παράδειγμα του Σχήματος 4 χαράσσεται αρχικά η καμπύλη τρωτότητας για βάθρα ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ και μανδύα ΙΟΠ και επιλέγεται η βέλτιστη λύση με κριτήριο την αποτελεσματικότερη αύξηση της εκάστοτε τιμής κατωφλίου και αντίστοιχα τη μείωση της σεισμικής τρωτότητας. Διερεύνηση της επιρροής των διαφορετικών παραμέτρων των μεθόδων ενίσχυσης στην τρωτότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί αρχικά εφαρμόζοντας τις προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό τιμών κατωφλίου μεταβάλλοντας τις ιδιότητες της μεθόδου ενίσχυσης (π.χ. πάχος μανδύα, αριθμός στρώσεων και ιδιότητες ΙΟΠ) και χαράσσοντας τις καμπύλες τρωτότητας ενισχυμένων συνιστωσών και συστήματος.



Σχήμα 4. Επιλογή βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης για επιλεγμένη στάθμη επιτελεστικότητας

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΓΕΦΥΡΑ

Η μεθοδολογία για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ενίσχυσης που παρουσιάστηκε εφαρμόζεται σε άνω διάβαση της Εγνατίας Οδού, όχι διότι η ενλόγω (σύγχρονη) γέφυρα όντως απαιτεί ενίσχυση, αλλά διότι διατίθεντο όλα τα απαιτούμενα στοιχεία. Συνεπώς η ενίσχυση στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει την έννοια ότι μειώνεται η τρωτότητα της γέφυρας σε σεισμικές δράσεις σημαντικά υψηλότερες από αυτές για τις οποίες σχεδιάστηκε. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η εφαρμογή μανδύων διαφορετικών ιδιοτήτων (διαφορετικό πάχος μανδύα και ποσοστό διαμήκους οπλισμού όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3) καθώς και δύο διαφορετικές περιπτώσεις ΙΟΠ (ανθρακούφασματα, υαλοϋφάσματα).

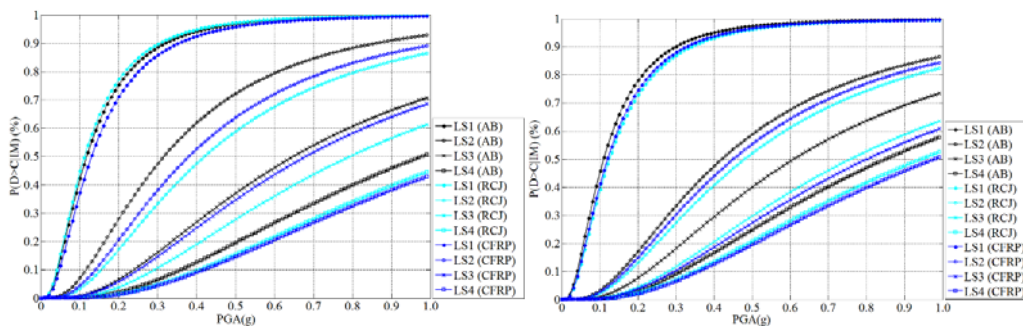


Σχήμα 5. Α/Δ Τ7 με κυλινδρικά βάθρα μονολιθικά συνδεδεμένα με το κατάστρωμα

Πίνακας 3. Παράμετροι μανδύα Ο/Σ ενισχυμένων βάθρων

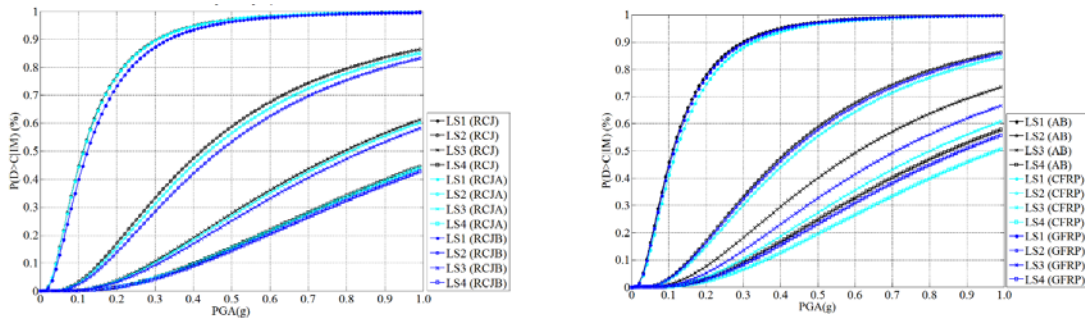
Παράμετροι	Αρχική διατομή (AB)	Μανδύας Ο/Σ (RCJ)	RCJ(A)	RCJ(B)
D (m)	1.50	1.90	1.9	2.1
$f_{c,m}$ (MPa)	24 (C16/20)	28 (C20/25)	28 (C20/25)	28 (C20/25)
f_y (MPa)	440 (S400s)	550 (B500c)	550 (B500c)	550 (B500c)
ρ_l	0.0102	0.015	0.025	0.015
ρ_w	0.004	0.011	0.011	0.011

Η μείωση της σεισμικής τρωτότητας, κυρίως στις υψηλές στάθμες βλάβης, της γέφυρας με την εφαρμογή μανδύα Ο/Σ ή ΙΟΠ είναι εμφανής από την παρατήρηση του Σχ.6 (αριστερά), γεγονός που οφείλεται κυρίως στην αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας λόγω περίσφιξης σκυροδέματος. Τα ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ βάθρα, ενδέχεται να εμφανίσουν την ίδια (ή και μεγαλύτερη) σεισμική τρωτότητα για την πρώτη στάθμη βλάβης (LS1), γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη καμπυλότητα διαρροής των ενισχυμένων διατομών. Για τις χαμηλές στάθμες βλάβης (LS2, LS3) η εφαρμογή μανδύα Ο/Σ προκύπτει αποτελεσματικότερη σε σύγκριση με την εφαρμογή μανδύα ΙΟΠ, ενώ το αντίθετο ισχύει για την υψηλή στάθμη βλάβης (LS4), γεγονός το οποίο αποδίδεται στην παράλληλη αύξηση της δυσκαμψίας και επακόλουθα των σεισμικών δυνάμεων με την εφαρμογή μανδύα Ο/Σ.



Σχήμα 6. Καμπύλες τρωτότητας διαμήκους (αριστερά) και εγκάρσιας διεύθυνσης (δεξιά) αρχικής (AB) και ενισχυμένης με μανδύα Ο/Σ (RCJ) και ΙΟΠ (CFRP)

Από την παρατήρηση του Σχ. 7 και όπως έχει αποδειχθεί από παραμετρική διερεύνηση (Stefanidou & Karpas, 2014), η μεταβολή του ποσοστού διαμήκους οπλισμού είναι αποτελεσματικότερη από την αύξηση του πάχους, ήτοι για να είναι σημαντικότερη η επιρροή της ενίσχυσης στη σεισμική τρωτότητα, η αύξηση της αντοχής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της δυσκαμψίας. Σε ό,τι αφορά στην ενίσχυση με μανδύα από ΙΟΠ, διαπιστώνεται ότι τα ανθρακοϋφάσματα είναι εν γένει πιο αποτελεσματικά για τη μείωση της σεισμικής τρωτότητας σε σύγκριση με τα υαλοϋφάσματα.



Σχήμα 7. Καμπύλες τρωτότητας διαμήκου διεύθυνσης ενισχυμένης με μανδύα Ο/Σ (RCJ, RCJA, RCJB) (αριστερά) και εγκάρσια διεύθυνσης ενισχυμένης με μανδύα ΙΟΠ (CFRP & GFRP) (δεξιά)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέδειξε την σκοπιμότητα της χρήσης εξατομικευμένων καμπυλών τρωτότητας στην επιλογή και το σχεδιασμό ενισχύσεων σε υφιστάμενες γέφυρες από σκυρόδεμα. Από την μελέτη περίπτωσης που παρουσιάστηκε προέκυψαν τα εξής ειδικότερα συμπεράσματα:

- Με την εφαρμογή μανδύα (Ο/Σ ή ΙΟΠ) υποστλωμάτων μειώνεται περισσότερο η σεισμική τρωτότητα για τις υψηλές στάθμες βλάβης και στις δύο διευθύνσεις της γέφυρας, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας λόγω περίσφιξης σκυροδέματος.
- Τα ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ βάρθρα, ενδέχεται να εμφανίσουν την ίδια (ή και μεγαλύτερη) σεισμική τρωτότητα για την πρώτη στάθμη βλάβης, γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη καμπυλότητα διαρροής των ενισχυμένων διατομών.
- Για τις ενδιάμεσες (δεύτερη και τρίτη) στάθμες βλάβης η εφαρμογή μανδύα Ο/Σ προκύπτει αποτελεσματικότερη σε σύγκριση με την εφαρμογή μανδύα ανθρακούφασμάτων, ενώ το αντίθετο ισχύει για την υψηλή (τέταρτη) στάθμη βλάβης. Το τελευταίο αποδίδεται στην παράλληλη αύξηση της δυσκαμψίας με την εφαρμογή μανδύα Ο/Σ, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες σεισμικές δυνάμεις και μικρότερη αποτελεσματικότητα για τις υψηλές στάθμες βλάβης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Biskinis, D., & Fardis, M. N. (2013). Models for FRP-wrapped rectangular RC columns with continuous or lap-spliced bars under cyclic lateral loading. *Engineering Structures*, 57, 199–212.
- Choi, E., & Jeon, J.-C. (2003). Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zone. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7(1), 41–51.
- Fakharifar, M., Chen, G., Dalvand, A., & Shamsabadi, A. (2015). Collapse Vulnerability and Fragility Analysis of Substandard RC Bridges Rehabilitated with Different Repair Jackets Under Post-mainshock Cascading Events. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.
- Kim, S.-H., & Shinozuka, M. (2004). Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(1-2), 105–112.
- Lu, Y., Gu, X., & Guan, J. (2005). Probabilistic Drift Limits and Performance Evaluation of Reinforced Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 131(6), 966–978.
- Mirmiran, A., & Shahawy, M. (1997). Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 123(5), 583–590.
- Olmos Navarrete, B. A., Jara Guerrero, J. M., Gómez Soberón, M. de la C. T. J., & Jara Díaz, M. (2016). Influence of RC jacketing on the seismic vulnerability of RC bridges. *Engineering Structures*, 123, 236–246.
- Ong, K. C. G., Kog, Y. C., Yu, C. H., & Sreekanth, A. P. V. (2004). Jacketing of reinforced concrete columns subjected to axial load. *Magazine of Concrete Research*, 56(2), 89–98.
- Padgett, J. E. (2007). *Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Bridges using Probabilistic Methods*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press, Pavia, Italy.
- Sheikh, N., & Legeron, F. (2010). Seismic performance-based design of bridges with quantitative local performance criteria. In *2nd International Structures Speciality Conference*. Winnipeg, Manitoba.
- Stefanidou, S. P., & Kappos, A. J. (2014). Retrofitting of Bridges for Seismic Vulnerability Reduction. In *15th European Bridge Conference and Exhibition*. London.
- Stefanidou, S. P., & Kappos, A. J. (2017). Methodology for the development of bridge-specific fragility curves. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46, 73–93.
- Zhang, J., & Huo, Y. (2009). Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method.
- Zhang, Y., Cofer, W. F., & Mclean, D. I. (1999). Analytical Evaluation of Retrofit Strategies for Multicolumn Bridges. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 4(2), 143–150.