

Συμπεριφορά γέφυρας στη Θεσσαλία σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης

Στεφανίδου Σωτηρία¹, Σέξτος Αναστάσιος², Κάππος Ανδρέας³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι γέφυρες αποτελούν έργα μεγάλης σημασίας καθώς τυχόν βλάβες ή/και αστοχίες τους έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές άμεσες αλλά και έμμεσες οικονομικές απώλειες και κοινωνικές επιπτώσεις. Οι γέφυρες βρίσκονται σε άμεση αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, ενώ παράλληλα είναι εκτεθειμένες σε διάφορες φυσικές καταστροφές όπως σεισμούς, πλημμύρες, κ.ά. Στην Ελλάδα, ενώ μέχρι σήμερα οι βλάβες γεφυρών από σεισμό ήταν πολύ περιορισμένες, παρατηρήθηκαν πρόσφατα σοβαρές βλάβες και αστοχίες σε νεόδμητες γέφυρες λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ. πλημμυρών), όπως επίσης και βλάβες γεφυρών λόγω επάλληλων φυσικών καταστροφών. Οι καταγεγραμμένες βλάβες και καταρρεύσεις ανέδειξαν την ανάγκη για προσδιορισμό της τρωτότητας γεφυρών σε ένα ευρύτερο περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης, το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αποτίμηση της συνολικής τους δομικής συμπεριφοράς. Επιπλέον, ανέδειξαν την αναγκαιότητα θεώρησης όλων των κρίσιμων συνιστωσών στην τρωτότητα, λαμβάνοντας υπόψη και τη θεμελίωση. Στην παρούσα εργασία η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της σεισμικής τρωτότητας γεφυρών που αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους συγγραφείς και λαμβάνει υπόψη όλες τις κρίσιμες συνιστώσες, συνεκτιμώντας και την υποσκαφή στον ορισμό των σταθμών βλάβης, εφαρμόζεται σε μια γέφυρα στη Θεσσαλία η οποία αφού πλήχθηκε από σεισμό, παρουσίασε φαινόμενα υποσκαφής λόγω πλημμυρών.

Λέξεις Κλειδιά: Γέφυρες, Πολλαπλή διακινδύνευση, Υποσκαφή, Καμπύλες Τρωτότητας

1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι γέφυρες οδικών δικτύων αποτελούν έργα μεγάλης σημασίας καθώς η κρατική οικονομική επένδυση για την κατασκευή τους είναι σημαντική, ενώ παράλληλα βλάβες ή/και ενδεχόμενες αστοχίες σε τμήματά τους έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές άμεσες αλλά και έμμεσες οικονομικές απώλειες και κοινωνικές επιπτώσεις. Οι γέφυρες βρίσκονται σε άμεση αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, ενώ παράλληλα είναι εκτεθειμένες σε διάφορες φυσικές καταστροφές όπως σεισμούς, πλημμύρες, κ.ά. Στην Ελλάδα, ενώ μέχρι σήμερα οι βλάβες γεφυρών από σεισμό ήταν πολύ περιορισμένες, παρατηρήθηκαν σοβαρές βλάβες και αστοχίες σε νεόδμητες γέφυρες λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ. πλημμυρών), με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις γέφυρες που κατέρρευσαν στην Καλαμπάκα Τρικάλων τον Ιανουάριο

¹ Ερευνήτρια, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ssotiria@civil.auth.gr

² Professor, University of Bristol, a.sextos@bristol.ac.uk

³ Professor, Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, andreas.kappos@ku.ac.ae

του 2016 και στα Χανιά Κρήτης το 2019, τις γέφυρες που κατέρρευσαν από τον κυκλώνα Ιανό το 2020, κ.ά. [1]. Οι καταγεγραμμένες βλάβες και καταρρεύσεις ανέδειξαν την ανάγκη για προσδιορισμό της τρωτότητας γεφυρών σε ένα ευρύτερο περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης, το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αποτίμηση της συνολικής τους συμπεριφοράς. Επιπλέον, ανέδειξαν την αναγκαιότητα θεώρησης όλων των κρίσιμων συνιστωσών στην τρωτότητα, λαμβάνοντας υπόψη και τη θεμελίωση.

Στην παρούσα εργασία αναδεικνύεται αρχικά το πρόβλημα της έκθεσης γεφυρών σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης, παρουσιάζοντας υλικό από την επιθεώρηση γεφυρών του επαρχιακού οδικού δικτύου της Θεσσαλίας μετά το σεισμό $M_w6.3$ του Μαρτίου 2021. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αποτίμηση τυπικής ποταμογέφυρας επαρχιακού δικτύου στην οποία διαπιστώθηκε ότι, σε μικρό διάστημα μετά το σεισμό και χωρίς να έχει υπάρξει ο απαραίτητος χρόνος για αξιολόγηση και ιεράρχηση επεμβάσεων στην περιοχή, έλαβαν χώρα ισχυρές βροχοπτώσεις που είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές πλημμύρες στην περιοχή.

2 ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΟ 2021

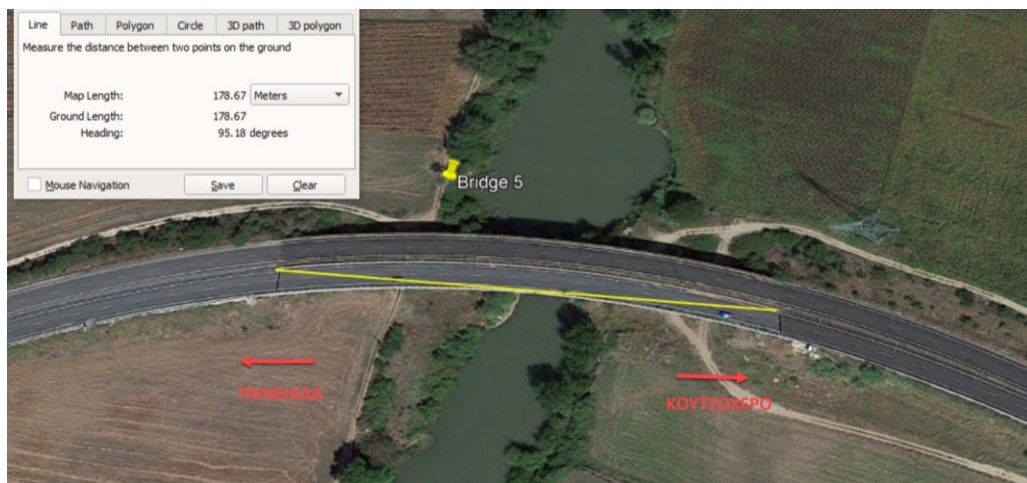
Τον Μάρτιο 2021 σεισμική ακολουθία έλαβε χώρα στην περιοχή της Θεσσαλίας, με τον κύριο σεισμό να καταγράφεται στις 03/03/21. Η ισχυρή σεισμική κίνηση μεγέθους σεισμικής ροπής $M_w6.3$ προκάλεσε σημαντικές βλάβες και επιπτώσεις στους τοπικούς οικισμούς μεταξύ των πόλεων Λάρισας, Τυρνάβου και Ελασσόνας, ενώ την επόμενη ημέρα (4 Μαρτίου) η σεισμική δραστηριότητα, η οποία ήταν πολύ έντονη, συνεχίστηκε με τη γένεση του ισχυρότερου μετασεισμού μεγέθους $M_w6.0$. Ο κύριος σεισμός και ο μετασεισμός έγιναν αισθητοί σε μεγάλες αποστάσεις από το επίκεντρό τους [2].

Σε γενικές γραμμές, το οδικό δίκτυο δεν παρουσίασε σημαντικές και εκτεταμένες βλάβες από το σεισμό. Βλάβες που οδήγησαν σε διακοπή κυκλοφορίας καταγράφηκαν σε γέφυρες στο Δαμάσι και στο Βλαχογιάννι, ενώ περιορισμός της ταχύτητας κυκλοφορίας (από 90 σε 40km/h) τέθηκε σε γέφυρα στην περιοχή της Φαρκαδόνας μετά από τις πλημμύρες που έλαβαν χώρα στην περιοχή λίγες ημέρες μετά το σεισμό. Κλιμάκιο του ΕΤΑΜ πραγματοποίησε οπτική επιθεώρηση στις γέφυρες του οδικού δικτύου Ελασσόνας. Πραγματοποιήθηκε μετασεισμικός έλεγχος έξι (6) γεφυρών του οδικού δικτύου, οι οποίες στην πλειονότητά τους είναι γέφυρες οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς και μία γέφυρα με ανωδομή από δομικό χάλυβα και μία γέφυρα από φέρουσα λιθοδομή. Περισσότερες πληροφορίες για το σύνολο των γεφυρών είναι διαθέσιμες στη σχετική έκθεση (ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ, Δ.Π.Θ., Ε.Τ.Α.Μ., 2022).

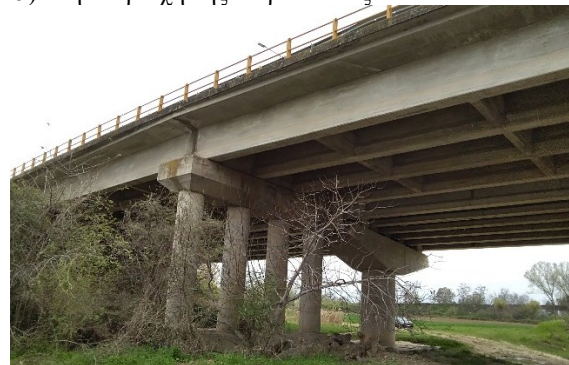
Οι σεισμικές βλάβες που καταγράφηκαν στις γέφυρες του οδικού δικτύου ήταν περιορισμένες και σε έκταση και σε βαθμό (κυρίως ελαφριές έως μέσες βλάβες, σπάνια εκτενέστερες). Συνοπτικά οι παρατηρηθείσες σεισμικές βλάβες οφείλονταν σε: (α) μετακινήσεις σε απλά εδραζόμενες γέφυρες τόσο στη θέση έδρασης στο μεσόβαθρο όσο και στο ακρόβαθρο καθώς και διατμητικές παραμορφώσεις ελαστομεταλλικών εφεδράνων ή/και μετακινήσεις μεταλλικών εφεδράνων παλαιού τύπου, καθώς και βλάβες στους αρμούς στη θέση έδρασης, (β) μετακινήσεις (καθιζήσεις, κτλ.) επιχώματος με αποτέλεσμα βλάβες σε εφέδρανα και αρμούς στη θέση του ακροβάθρου, (γ) ρωγμές στο οδόστρωμα λόγω καθιζήσεων, οι οποίες σχεδόν στο σύνολό τους κρίθηκαν ως μη ανησυχητικές. Επιπλέον, στο πλαίσιο της επιθεώρησης διαπιστώθηκαν βλάβες που δεν οφείλονταν στο σεισμό αλλά στο έντονα διαβρωτικό περιβάλλον και τη γήρανση των

υλικών. Οι μη σεισμικές βλάβες που καταγράφηκαν αφορούν: (α) αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης σε δοκούς καταστρώματος, δοκούς έδρασης, βάθρα και ακρόβαθρα, (β) διάβρωση των οπλισμών σε βάθρα και δοκούς έδρασης λόγω της έκθεσης στο παραποτάμιο, εντόνως διαβρωτικό περιβάλλον, και (γ) μόνιμες παραμορφώσεις εφεδράνων λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Σημειώνεται πως στην πληγείσα από το σεισμό της 3/3/21 περιοχή καταγράφη σημαντική πλημμύρα στις 23/03/21 λόγω υπερχείλισης του Πηνειού ποταμού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται εκτενέστερα η επιθεώρηση και η αποτίμηση ποταμογέφυρας στην περιοχή στην οποία καταγράφησαν οι δύο φυσικές καταστροφές διαδοχικά και σε μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ τους.

Η γέφυρα που επιθεωρήθηκε στην περιοχή της Φαρκαδόνας, η θέση της οποίας σημειώνεται στο Σχήμα 1, είναι ποταμογέφυρα πέντε ανοιγμάτων και αποτελείται από δύο κλάδους (διπλής κατεύθυνσης) οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί σε διαφορετική χρονική περίοδο (Σχήμα 2). Ο ένας κλάδος είναι νεόδμητος και έχει μονόστυλα κυλινδρικά μεσόβαθρα μεγάλης διαμέτρου ενώ ο άλλος παλαιότερος και έχει πολύστυλα μεσόβαθρα αποτελούμενα από 4 κυλινδρικά βάθρα μικρότερης διαμέτρου. Και οι δύο κλάδοι έχουν κατάστρωμα με προεντεταμένες προκατασκευασμένες δοκούς, απλά εδραζόμενο στα μεσόβαθρα (Σχήματα 2, 3). Η έδραση του καταστρώματος στα μεσαία ανοίγματα γίνεται μέσω κοινών ελαστομεταλλικών εφεδράνων (σε διαπλάτυνση κεφαλής στην περίπτωση μονόστυλου μεσοβάθρου και στη δοκό έδρασης σε περίπτωση πολύστυλου), ενώ η έδραση στα ακρόβαθρα πραγματοποιείται επίσης μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων.



Σχήμα 1: Θέση γέφυρας Γ5 (Bridge 5) στην περιοχή της Φαρκαδόνας



Σχήμα 2: Φωτογραφία της γέφυρας στην περιοχή Φαρκαδόνας μετά το σεισμό 03/03 και την πλημμύρα 23/03

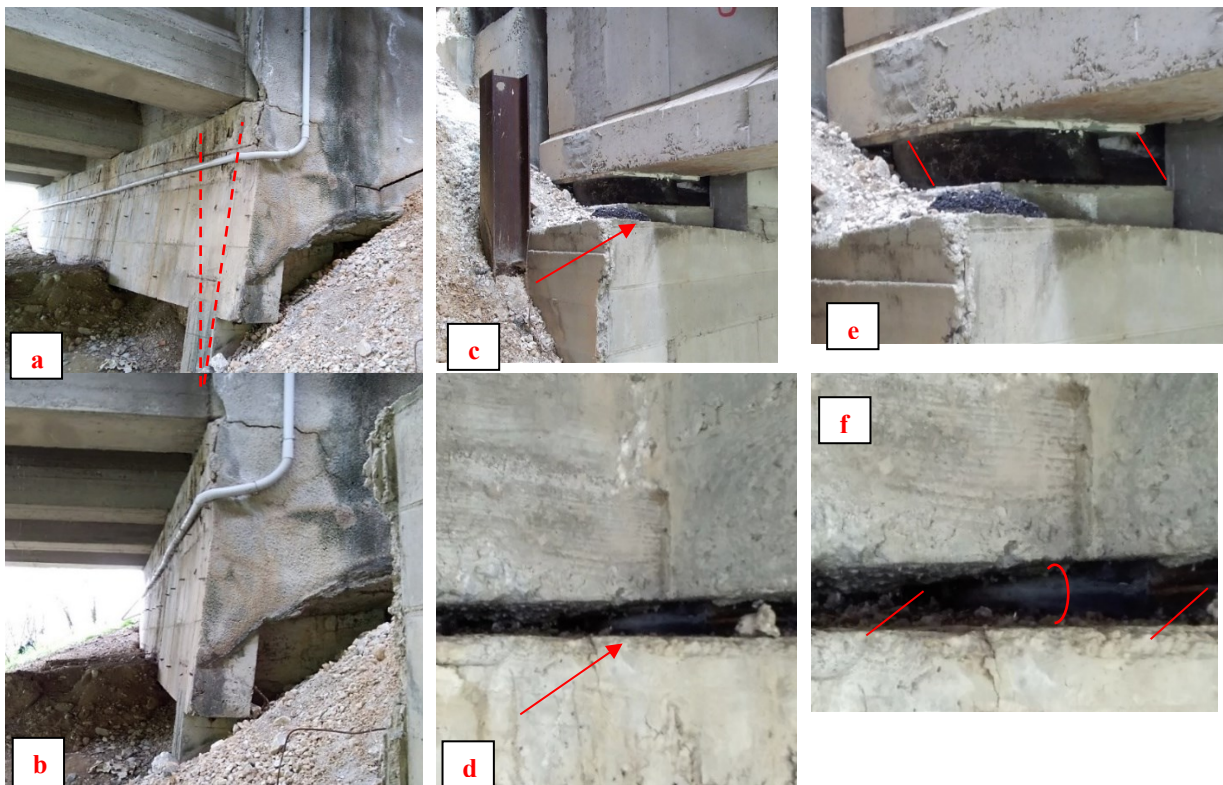
Οι βλάβες από την επιθεώρηση της γέφυρας μετά το σεισμό αναφέρονται λεπτομερώς στη συνέχεια και για τους δύο κλάδους Στο Σχήμα 3 είναι εμφανής η γήρανση των υλικών, η αποφλοιώση του σκυροδέματος επικάλυψης και η διάβρωση των οπλισμών λόγω οξείδωσης στον παλαιό κλάδο, βλάβες που δεν οφείλονται στο σεισμό αλλά στην επίδραση του έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος. Αντίστοιχες βλάβες δεν παρατηρούνται στον νεόδμητο κλάδο.



Σχήμα 3: Παλιός (με πολύστυλα βάθρα) και νέος (με μονόστυλα βάθρα) κλάδος της γέφυρας στην περιοχή της Φαρκαδόνας

Σε ότι αφορά στις σεισμικές βλάβες του *νεόδμητου κλάδου*, είναι εμφανές από τα Σχήματα 3 και 4 ότι ο νεότερος κλάδος δεν εμφανίζει σεισμικές βλάβες στα βάθρα και τα εφέδρανα στα οποία δεν αναπτύχθηκε μη-μόνιμη μετακίνηση ή διατμητική παραμόρφωση. Σημειώνεται ωστόσο ότι παρατηρείται σημαντική υποσκαφή στα μεσόβαθρα του νέου κλάδου που βρίσκονται στην κοίτη του ποταμού, η οποία προφανώς δεν οφείλεται στο σεισμό.

Σε ό,τι αφορά στις καταγεγραμμένες βλάβες του *παλαιότερου κλάδου*, αυτές είναι κυρίως βλάβες στη δοκό έδρασης (αποφλοιώση σκυροδέματος, αποκάλυψη οπλισμών, διάβρωση οπλισμών, κτλ.) (Σχήμα 4) και οφείλονται στο έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Σεισμικές βλάβες δεν καταγράφηκαν σε μεσόβαθρα και εφέδρανα μεσοβάθρων. Ωστόσο, μεσαίες έως σημαντικές βλάβες καταγράφηκαν στο ακρόβαθρο, τόσο στο σώμα του ακροβάθρου και τη θεμελίωσή του όπου παρατηρήθηκαν έντονες ρηγματώσεις και στρόφη θεμελίωσης (Σχήμα 6 (a), (b)), όσο και στα εφέδρανα στη θέση έδρασης στο ακρόβαθρα τα οποία εμφανίζουν μόνιμες διατμητικές παραμορφώσεις (Σχήμα 6(c), (e)) και σε μία περίπτωση σημαντική διατμητική παραμόρφωση, με σύσταση για αντικατάσταση του εφεδράνου (Σχήμα 6(d), (f)). Όπως και για τον νεότερο κλάδο σημειώνεται πως και στον παλιό κλάδο είναι εμφανής η υποσκαφή στη θεμελίωση, αποκαλύπτοντας μέρος του κεφαλόδεσμου. Συνεπώς είναι εμφανές ότι οι καταγεγραμμένες βλάβες είναι πιθανό να οφείλονται σε σεισμό και πλημμύρα, δηλαδή να οφείλονται σε επάλληλες φυσικές καταστροφές.

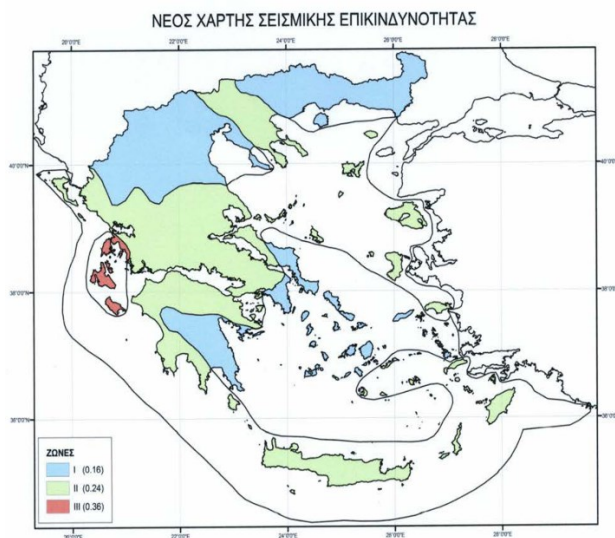


Σχήμα 6: Βλάβες στην περιοχή του ακροβάθρου και στα εφέδρανα έδρασης του καταστρώματος στο ακρόβαθρο

Όπως προαναφέρθηκε, μετά από έρευνα που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε πως μετά το σεισμό στις 03/03/21, υπήρξε καταγεγραμμένη πλημμύρα στην περιοχή στις 23/03/21, στην οποία έγινε υπερχείλιση του Πηνειού ποταμού, μετατρέποντας τον κάμπο της Φαρκαδόνας σε λίμνη. Για τη συγκεκριμένη γέφυρα υπάρχει διαθέσιμο βίντεο στο οποίο φαίνεται η ορμητική ροή του ποταμού (<https://www.youtube.com/watch?v=WWE7CtmjqPw>) (Σχήμα 7) η οποία είχε προφανώς ως αποτέλεσμα την υποσκαφή των μεσοβάθρων και ενδεχομένως την απομάκρυνση τμήματος του επιχώματος και την υποσκαφή της θεμελίωσης στο ακρόβαθρο. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, οι καταγεγραμμένες βλάβες στη γέφυρα στην αυτοψία που πραγματοποιήθηκε στις 05/04/21, δηλαδή μετά το σεισμό **και** την πλημμύρα στην περιοχή, πρέπει να αποδοθούν και στις δύο φυσικές καταστροφές ερμηνεύοντας τις βλάβες που προκάλεσε η καθεμία ξεχωριστά και ενδεχομένως επηρεάζοντας σε έναν βαθμό η μια την άλλη παρότι μη σύγχρονες. Το αποτέλεσμα ωστόσο, το οποίο αφορά στην αποτίμηση της κατάστασης της γέφυρας τη στιγμή της αυτοψίας είναι οι βλάβες που καταγράφηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω και πρέπει να αξιολογηθούν κατάλληλα για το σχεδιασμό των επεμβάσεων στη γέφυρα.

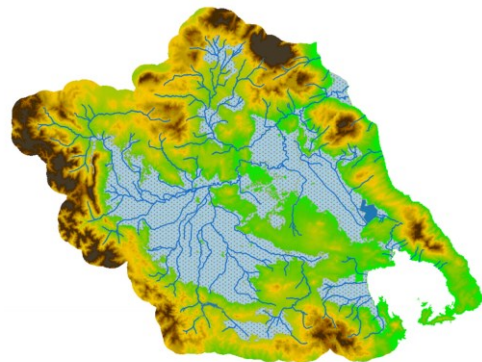


Σχήμα 7: Στιγμιότυπο τη στιγμή της πλημμύρας 23/03 και κατά την αυτοψία μετά από σεισμό και πλημμύρα (στις 05/04)



4.2.3 Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας

Στο πλαίσιο της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, άρθρα 4 και 5, και της ΚΥΑ ΗΠ 31822/1542/Ε103/21.7.2010 έγινε Προκαταρκτική Αξιολόγηση των Κινδύνων Πλημμύρας σε όλα τα Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας. Από την αξιολόγηση αυτή προσδιορίστηκαν οι σημαντικές ιστορικές πλημμύρες, από πλευράς επιπτώσεων, και οι Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ). Το ΥΔ Θεσσαλίας είναι το πλέον ευάλωτο της Ελλάδας, καθώς οι πλημμυρικές ζώνες καλύπτουν το 31,2% της περιοχής (4 172 από τα 13 377 km²). Τα όρια των ζωνών φαίνονται στον ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) περιοχής μελέτης

Σχήμα 8: Χάρτες σεισμικής (ΟΑΣΠ, 2003) και πλημμυρικής επικινδυνότητας

Οι γέφυρες είναι εν γένει εκτεθειμένες σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης και σε ορισμένες περιπτώσεις η πιθανότητα να συμβούν δύο φυσικές καταστροφές διαδοχικά σε μικρό χρονικό διάστημα, εντός του οποίου δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν επεμβάσεις, ή ακόμα και ταυτόχρονα δεν είναι αμελητέα. Με βάση το χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (Σχήμα 8), η περιοχή της Ελασσόνας είναι περιοχή μεσαίας σεισμικότητας (Ζώνη II) με το σεισμό σχεδιασμού να ανέρχεται σε 0.24g. Συνεπώς ο σεισμός που έλαβε χώρα στην περιοχή είναι μικρότερος του σεισμού σχεδιασμού, και η περίοδος επαναφοράς του είναι μικρότερη από $T=475$ χρόνια. Αντιστοίχως από τους χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας που προέκυψαν και διατίθενται για το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την Ειδική Γραμματεία Υδάτων προκύπτει ότι η περιοχή ανήκει στις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας. Από τη μελέτη του σχεδίου για τη λεκάνη απορροής στην οποία βρίσκεται το τεχνικό έργο προκύπτει ότι ακόμα και για την πολύ συχνή πλημμύρα (με περίοδο επαναφοράς $T=50$ χρόνια), το νερό ξεπερνάει τα όρια της κοίτης και στους κλάδους και στις εκβολές του ρέματος με αποτέλεσμα η πλημμύρα να διαχέεται εκτός της κοίτης και να πλημμυρίζει καλλιεργούμενες εκτάσεις. Η εικόνα είναι πιο δυσμενής στις περιόδους επαναφοράς $T=100$ και $T=1000$ χρόνια καθώς εμφανίζονται μεγαλύτερα βάθη ροής και η πλημμύρα έχει

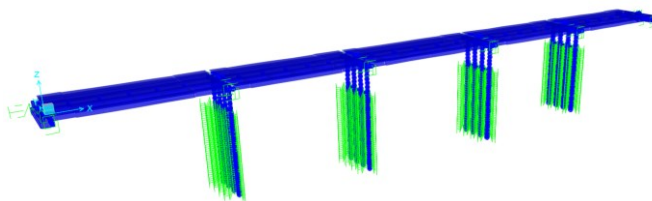
μεγαλύτερη έκταση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ακόμα μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και να πλήττονται μεγαλύτερες καλλιεργούμενες εκτάσεις (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας και Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2018). Αντίστοιχα η αναμενόμενη παροχή αιχμής είναι $950\sim1250\text{ m}^3/\text{sec}$ για $T=50\sim100$ έτη. Με βάση τα δεδομένα βροχοπτώσεων της περιοχής που παρέχονται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, όπως αυτά καταγράφηκαν στους πλησιέστερους μετεωρολογικούς σταθμούς (Πλατανούλια, Τρικάλων), τις ημέρες της πλημμύρας και τις προηγούμενες, τα χιλιοστά βροχής ήταν αθροιστικά άνω των 100mm. Σημειώνεται πως δεν υπάρχει διαθέσιμη η πληροφορία του χρόνου των βροχοπτώσεων, ώστε να πραγματοποιηθεί υδρολογική ανάλυση, να υπολογιστεί η παροχή για το συγκεκριμένο συμβάν και να συγκριθεί με την αντίστοιχη σχεδιασμού (για $T=100$). Ωστόσο, δεδομένου ότι με βάση όσα αναφέρονται στο σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας για τη συγκεκριμένη περιοχή της γέφυρας, η υπέρβαση της κοίτης του ποταμού είναι σχεδόν βέβαιη ακόμα και για βροχοπτώσεις που συμβαίνουν συχνά στη διάρκεια ζωής του έργου, η συγκεκριμένη βροχοπτώση μπορεί να θεωρηθεί μικρότερη από αυτή του σχεδιασμού (περίοδος επαναφοράς $T<100$ έτη).

3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ

Με βάση τα αποτελέσματα της επιθεώρησης, πραγματοποιήθηκε σεισμική αποτίμηση της γέφυρας στην περιοχή της Φαρκαδόνας με τη διενέργεια ανελαστικής στατικής ανάλυσης και χρήση φασμάτων απαίτησης για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης μετακίνησης λόγω του σεισμικού συμβάντος και της μετακίνησης που θα οδηγούσε σε σημαντικές ανελαστικοποιήσεις στη γέφυρα.



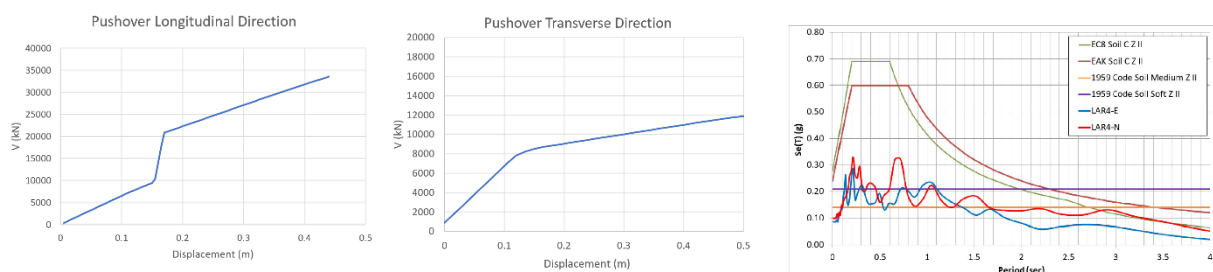
Σχήμα 9: Γέφυρα στην περιοχή της Φαρκαδόνας : Μετρήσεις και τοπογραφικό ανάγλυφο



Σχήμα 10: Γέφυρα στην περιοχή της Φαρκαδόνας : Υπολογιστικό προσομοίωμα

Για τη διαμόρφωση του υπολογιστικού προσομοιώματος (Σχήμα 10) του παλαιού τμήματος χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις που έγιναν επιτόπου, μετρήσεις από το Google Earth (υψόμετρο με βάση την τοπογραφία κτλ., βλ. Σχήμα 9) ενώ έγιναν εύλογες παραδοχές με βάση κατασκευαστικές πρακτικές σε παρόμοιες γέφυρες (ποσοστό οπλισμού σε γέφυρες παρόμοιας ηλικίας με πολύστυλα κυλινδρικά βάθρα, κ.ά.). Η ποταμογέφυρα έχει 5 ανοίγματα τα οποία εδράζονται μέσω κοινών ελαστομεταλλικών εφεδράνων σε πολύστυλα μεσόβαθρα αποτελούμενα από 4 στύλους διαμέτρου 0.90m. Για τα βάθρα θεωρήθηκε σκυρόδεμα C16/20 και χάλυβας S400. Ο οπλισμός των βάθρων υπολογίστηκε θεωρώντας ανηγμένη τιμή $\rho_i=0.002$ ενώ ο εγκάρσιος οπλισμός εκτιμήθηκε $\Phi 10/200$. Οι παραπάνω παραδοχές καθώς και οι ιδιότητες των εφεδράνων βασίζονται σε στοιχεία από ποταμογέφυρα με ίδιο στατικό σύστημα κατασκευασμένη το 1984.

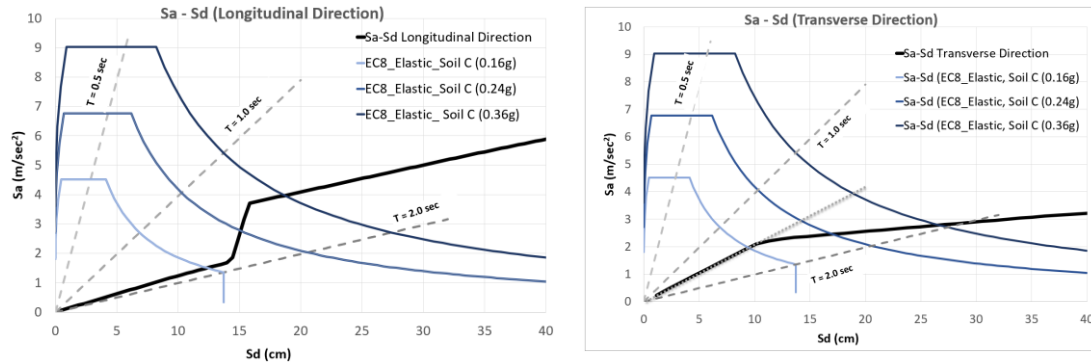
Οι καμπύλες αντίστασης της γέφυρας στις δύο διευθύνσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 11. Ο φορέας είναι πιο δύσκαμπτος στην εγκάρσια διεύθυνση, ενώ είναι εμφανής η αλλαγή στη δυσκαμψία του συστήματος μετά το κλείσιμο του αρμού στη διαμήκη διεύθυνση. Οι ιδιοπερίοδοι στη διαμήκη και στην εγκάρσια διεύθυνση είναι περίπου 1.95 s και 1.85 s αντίστοιχα.



Σχήμα 11: Καμπύλες αντίστασης της γέφυρας στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση και σύγκριση φασμάτων απόκρισης (ΙΤΣΑΚ-ΔΠΘ, 2021)

Με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στον Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2004) γίνεται η αναγωγή του πολυβάθμιου συστήματος της γέφυρας σε μονοβάθμιο και η χάραξη των καμπυλών αντίστασης του φορέα σε όρους S_a-S_d . Εφαρμόζεται η μέθοδος των φασμάτων απαίτησης-ικανότητας, προσδιορίζοντας τη στοχευόμενη μετακίνηση για έδαφος κατηγορίας C και a_g 0,16g, 0,24g και 0,36g (Σχήμα 12). Σημειώνεται ότι η ιδιοπερίοδος του φορέα και στις δύο διευθύνσεις είναι μεγαλύτερες από τη γωνιακή περίοδο του φάσματος (T_c), συνεπώς οι ελαστικές μετακινήσεις λαμβάνονται ίσες με τις ανελαστικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ελαστικά φάσματα. Από το Σχήμα 11 είναι εμφανές ότι για T : 1.95~1.85 (sec) η τιμή της $S_a(g)$ είναι περίπου 0.13. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 12, για $S_a(g) = 0.13$ η συμπεριφορά είναι ελαστική και στις δύο διευθύνσεις. Για να εισέλθει η γέφυρα στην ανελαστική περιοχή και να ξεκινήσουν

οι ανελαστικές παραμορφώσεις και ενδεχόμενες βλάβες η $S_a(g)$ στη διαμήκη διεύθυνση θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον ίση με 0.19 και στην εγκάρσια με 0.17 για τις ιδιοπεριόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



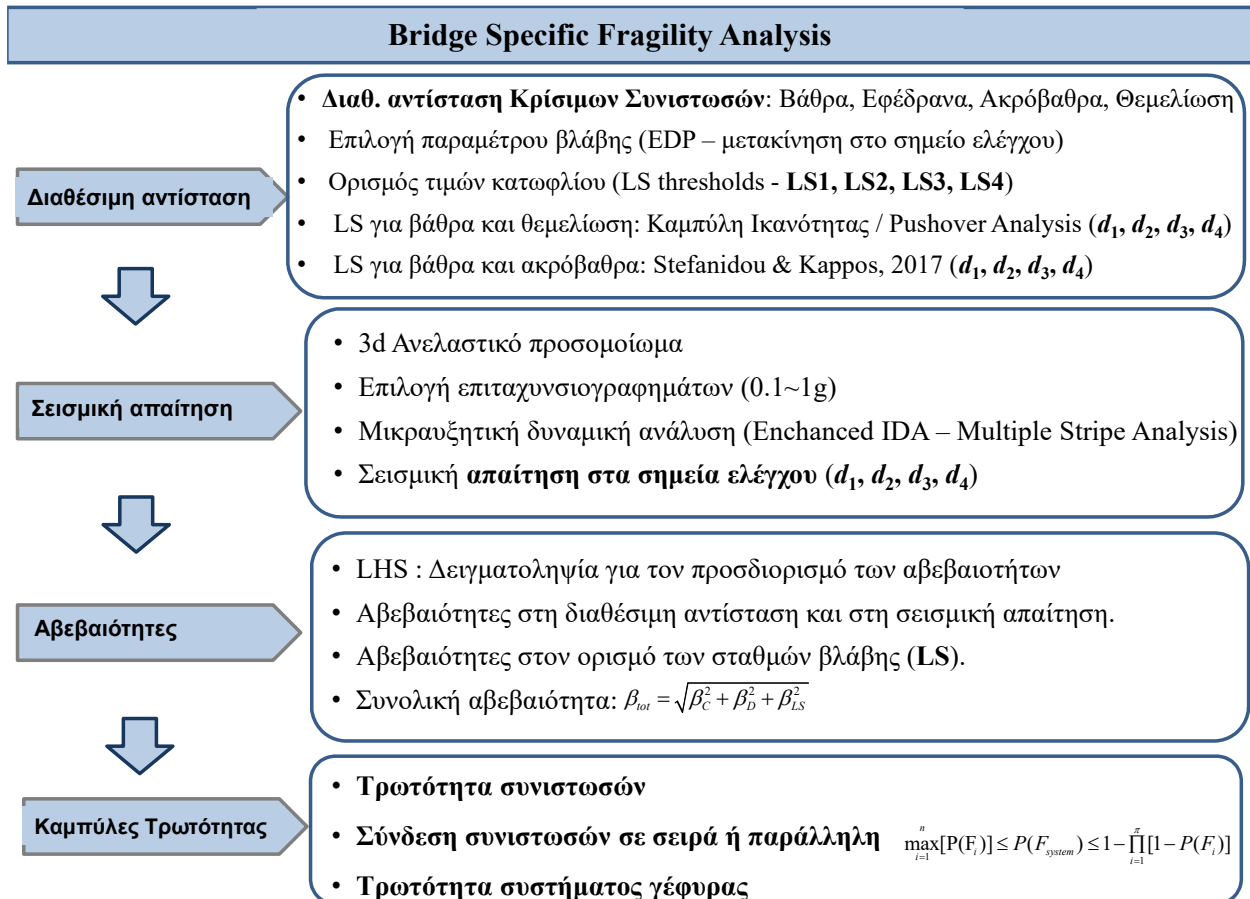
Σχήμα 12: Φάσματα S_a - S_d της γέφυρας στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΓΕΦΥΡΩΝ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΩΣ ΚΡΙΣΙΜΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ

Με βάση τα παραπάνω, αποδεικνύεται πως υπάρχει η πιθανότητα δύο επάλληλων φυσικών καταστροφών σε μία περιοχή, ωστόσο είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Αυτό έχει σχολιαστεί και στην [3], όπου παρουσιάστηκαν συνδυαστικοί (bivariate) χάρτες σεισμικής και πλημμυρικής επικινδυνότητας. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη για μεθοδολογίες προσδιορισμού της τρωτότητας, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη όλες τις κρίσιμες συνιστώσες και θα μπορούν να συνεκτιμήσουν την επιρροή της ενδεχόμενης βλάβης από πολλαπλές φυσικές καταστροφές και την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο έχει αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί μεθοδολογία η οποία προτείνει τη θεώρηση της τρωτότητας των κρίσιμων συνιστωσών (βάθρα, εφέδρανα, ακρόβαθρα) [4]. Όπως παρουσιάστηκε στην [6], είναι σκόπιμη η επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Σχήμα 13), ώστε να συμπεριληφθεί στις κρίσιμες συνιστώσες και η θεμελίωση, η οποία στην περίπτωση της υποσκαφής μπορεί να είναι η πιο κρίσιμη συνιστώσα και να καθορίζει τη βλάβη του συνολικού συστήματος.

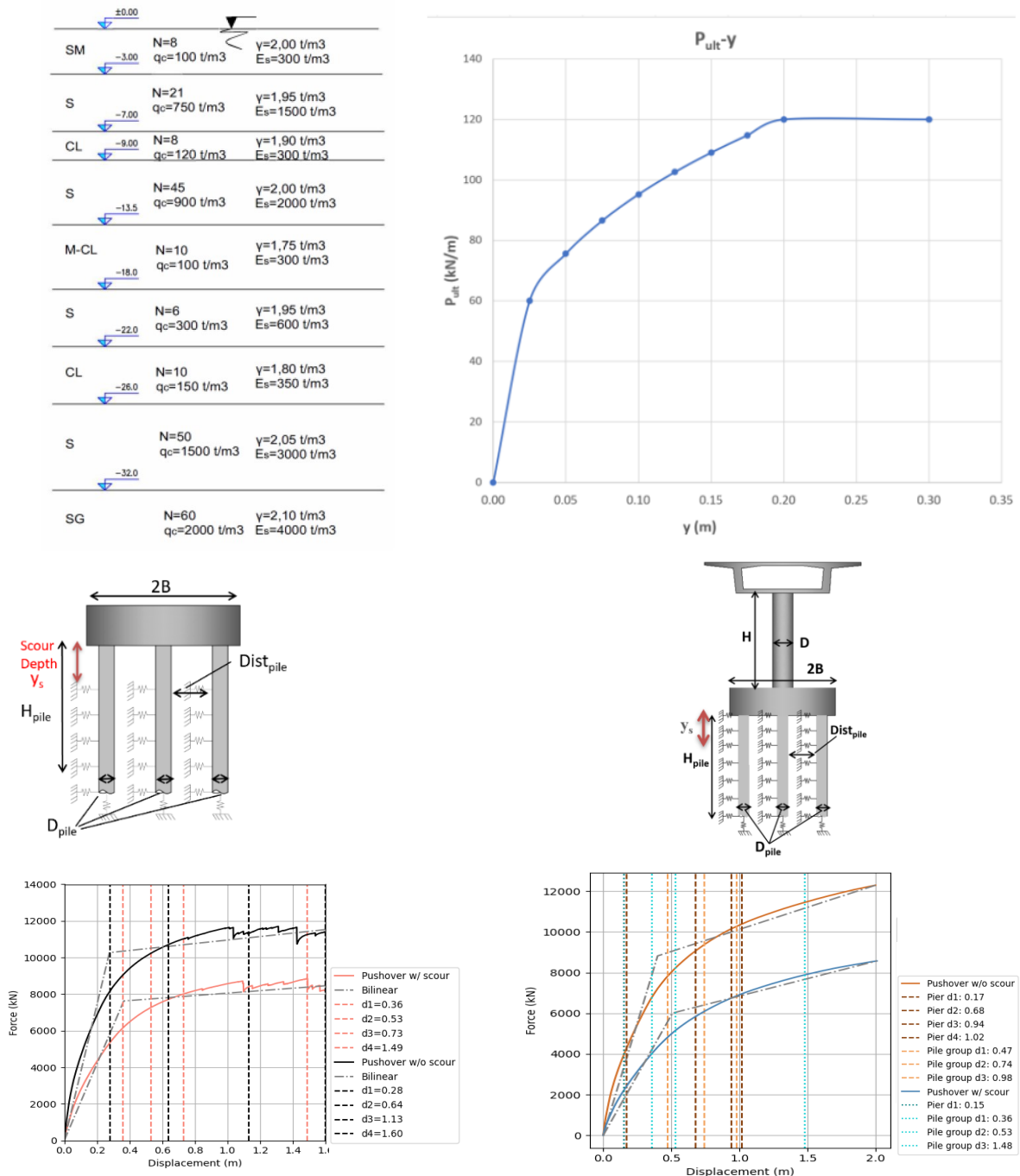
Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ορισμός των σταθμών βλάβης στην περίπτωση της πασσαλοθεμελίωσης δεν είναι σαφής, καθώς η αστοχία ενός πασσάλου δε σημαίνει απαραίτητα αστοχία της πασσαλοθεμελίωσης ή βλάβη της στην εκάστοτε στάθμη, πόσο μάλλον βλάβη στην ανωδομή. Για το λόγο αυτό προτείνεται η θεώρηση των κατωφλίων σταθμών βλάβης με βάση την καμπύλη αντίστασης του υποσυστήματος της πασσαλοθεμελίωσης σε όρους μετακινήσεων του σημείου ελέγχου. Η πρώτη στάθμη βλάβης προτείνεται να λαμβάνεται ίση με τη μετακίνηση διαρροής της διγραμμικοποιημένης καμπύλης αντίστασης της πασσαλοθεμελίωσης, ενώ η τρίτη ως η μετακίνηση τη στιγμή που ο πρώτος πάσσαλος αστοχεί (η στιγμή που αναπτύσσεται η ϵ_{cu} ή παραμόρφωση χάλυβα ίση με $\epsilon_s=0.06$). Η δεύτερη στάθμη βλάβης προτείνεται να ορίζεται από το ημιάθροισμα της πρώτης και της τρίτης, ενώ η αστοχία από την πτώση αντοχής (10~15%) της καμπύλης αντίστασης του υποσυστήματος της θεμελίωσης. Αντίστοιχα ορίζονται οι στάθμες βλάβης στην περίπτωση που υπάρχει υποσκαφή θεμελίωσης, αφαιρώντας τα ελατήρια στο βάθος

της υποσκαφής και πραγματοποιώντας την ανελαστική στατική ανάλυση για τον προσδιορισμό της σεισμικής ικανότητας στο σύστημα με υποσκαφή.



Σχήμα 13: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας προσδιορισμού σεισμικής τρωτότητας με θεώρηση και της θεμελίωσης ως κρίσιμη συνιστώσα

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη αντίστασης τυπικής βαθιάς θεμελίωσης με πασσάλους και ο ορισμός των σταθμών βλάβης στο σύστημα βάθρου-πασσαλοθεμελίωσης (στο οποίο λαμβάνεται υπόψη τόσο η βλάβη της πασσαλοθεμελίωσης όσο και της ανωδομής) για τις περιπτώσεις με και χωρίς υποσκαφή. Παρουσιάζεται επίσης το εδαφικό προφίλ με βάση το οποίο υπολογίστηκαν τα ελατήρια δύναμης-μετακίνησης (p-y) καθ' ύψος των πασσάλων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Σημειώνεται πως η επιρροή της υδραυλικής υποσκαφής στις τιμές κατωφλίων σταθμών βλάβης του υποσυστήματος του βάθρου γέφυρας είναι σημαντική, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση τόσο της αντοχής όσο και της δυσκαμψίας, όσο και την αλλαγή της ιεραρχίας των αστοχιών. Στην περίπτωση της ύπαρξης υποσκαφής η αστοχία των πασσάλων και όχι του βάθρου ορίζει την αστοχία του υποσυστήματος με αποτέλεσμα μικρότερες τιμές κατωφλίου και αντίστοιχα μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας βλάβης στην ανάλυση σεισμικής τρωτότητας.



Σχήμα 14: Καμπύλες αντίστασης και τιμές κατωφλίου πασσαλοθεμελίωσης και υποσυστήματος βάθρου-θεμελίωσης με και χωρίς υποσκαφή.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν βλάβες υφιστάμενης γέφυρας στην περιοχή της Θεσσαλίας σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης, δηλαδή βλάβες από σεισμό του 2021 στην περιοχή (M_w6.3) και πλημμύρα η οποία έλαβε χώρα λίγες ημέρες μετά τη σεισμική ακολουθία και χωρίς να έχουν γίνει επεμβάσεις αποκατάστασης εν τω μεταξύ. Παρά το γεγονός ότι ο σεισμός δεν είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές βλάβες τόσο στην ανωδομή (κατάστρωμα) όσο και στις κρίσιμες για την αντισεισμική συμπεριφορά συνιστώσες (βάθρα, ακρόβαθρα,

εφέδρανα), οι βλάβες που καταγράφηκαν είχαν ως αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις τη διακοπή της κυκλοφορίας, διαταράσσοντας τη μετασεισμική λειτουργικότητα του οδικού δικτύου. Περιορισμός της κυκλοφορίας προδιαγράφηκε μετά από την πλημμύρα, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την υποσκαφή της θεμελίωσης. Στο πλαίσιο της εργασίας σχολιάζεται η μέγιστη επιτάχυνση (PGA) και η παροχή (Q) με βάση δεδομένα για τη βροχύπτωση από μετεωρολογικούς σταθμούς και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού. Τέλος, παρά το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή ο σεισμός προηγείτο της πλημμύρας, παρουσιάζεται ενδεικτικά η επιρροή της υποσκαφής στη διαθέσιμη αντίσταση (ικανότητα) του υποσυστήματος των βάθρων με στόχο να αναδειχθεί η διαφοροποίηση της συνολικής συμπεριφοράς και να υπογραμμιστεί η άμεση ανάγκη για επεμβάσεις. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει και αναδεικνύεται η ανάγκη διαμόρφωσης μεθοδολογιών στις οποίες θα λαμβάνεται υπόψη περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης.

6 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πρώτη συγγραφέας έχει πάρει χρηματοδότηση από :

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση Μεταδιδασκτόρων ερευνητών/ερευνητριών - Β΄ Κύκλος» (MIS-5033021), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).



7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Stefanidou S, Karatzetzou A, Tsinidis G, Mitoulis S, Argyroudis S. Multi-hazard fragility assessment of bridges: Methodology and case study application, 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC 2022), 5-7 July, Athens, Greece, 2022.
2. ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ, Δ.Π.Θ., Ε.Τ.Α.Μ. (2022) Σεισμική ακολουθία Θεσσαλίας, Μάρτιος 2021, Τεχνική Έκθεση, Μάργαρης, Β., Κλήμης, Ν., Σέξτος, Α. (επιμέλεια), DOI: 10.13140/RG.2.2.33758.51527
3. Karatzetzou A, Stefanidis S, Stefanidou S, Tsinidis G, Pitilakis D. Unified hazard models for risk assessment of transportation networks in a multi-hazard environment, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022; (75): 102960
4. Stefanidou SP, Kappos AJ. Methodology for the development of bridge-specific fragility curves, *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 2017; (46): 73–93.
5. CEN [Comité Européen de Normalisation]. (2003). Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
6. Στεφανίδου Σ, Κάππος ΑΙ Τρωτότητα γεφυρών σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας (4οΠΣΑΜΤΣ), Αθήνα, 5-7 Σεπτεμβρίου, 2019.