

Σεισμική Αναβάθμιση Γεφυρών με βάση την Επιτελεστικότητα

Βασίλειος Μπαρδάκης¹, Πέτρος Μοσχολιός¹, Αικατερίνη-Χριστίνα Γεωργίου¹, Ιωάννης Καλκανάς¹, Ιωάννης Νούλας¹, Παντελής Γκαγκούλης¹, Εγκόλφιος Αθανασίου², Ελευθέριος Αβραμίδης³, Στέφανος Τοπάλογλου⁴, Μίλκα Αργυρού⁵

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σχολιάζονται τρεις εφαρμογές Επεμβάσεων με βάση την Επιτελεστικότητα σε Γέφυρες, και παρουσιάζονται αποτελέσματα ανελαστικών αναλύσεων. Το πρώτο παράδειγμα αφορά την Αποτίμηση και ενίσχυση μιας τοξωτής γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος. Το συνολικώς γεφυρούμενο μήκος περιλαμβάνει τρία ανοίγματα. Τα δύο ακραία ανοίγματα (μήκους 18.6m) εδράζονται αφενός σε ακρόβαθρο, αφετέρου σε δίστυλο μεσόβαθρο. Το κεντρικό άνοιγμα (μήκους 48.5m), στηρίζεται (μονολιθικά) σε τέσσερα τόξα από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω κατακόρυφων ορθοστατών (στύλων). Η δεύτερη εφαρμογή αναφέρεται σε μια πιο "απλή" γέφυρα εκ προεντεταμένου σκυροδέματος συνολικού μήκους (χωρίς τις προσβάσεις) 48.28 m. Πρόκειται για αμφιέριστη γέφυρα, ο φορέας της οποίας μορφώνεται από έγχυτη πλάκα επί τεσσάρων προκατασκευασμένων δοκών. Η τρίτη εφαρμογή αναφέρεται σε ένα τεχνικό έργο -μνημείο εκ λιθοδομής και οπτοπλινθοδομής μήκους περίπου 20.00m. Αποτελείται από δύο ανοίγματα-αψίδες τα οποία εδράζονται στο έδαφος μέσω ενός μεσοβάθρου και δύο ακροβάθρων.

Λέξεις κλειδιά: Αποτίμηση, Επιτελεστικότητα, Γέφυρα, Ανελαστική Ανάλυση, Ενίσχυση, ΚΑΝΕΠΕ, ΚΑΔΕΤ, ΙΟΠ, Evaluation, Performance, Bridge, Nonlinear Analysis, Retrofit, EN 1998-3, FRP

1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι σύγχρονοι κανονισμοί ΚΑΝ.ΕΠΕ./ΚΑ.Δ.Ε.Τ. και EN1998-3 που αφορούν δομητικές επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές έχουν στόχο τη διασφάλιση ικανοποιητικής στάθμης επιτελεστικότητας (ασφαλείας) αλλά και οικονομικότητας και εφαρμοσιμότητας της επέμβασης. Η παρούσα εργασία αφορά στην σεισμική αναβάθμιση γεφυρών με βάση την επιτελεστικότητα. Οι τεχνικές επεμβάσεων (σεισμικών & δομικών) ποικίλουν (περισφίγγεις με Ι.Ο.Π., προσθήκη μεταλλικών στοιχείων, προσθήκη ειδικών συσκευών stoppers, εφαρμογή προεντεταμένων

¹ Μελετητές, ΕΜΠΛΕΚΤΟΝ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΕΠΕ, Πάτρα, email: info@eblecton.gr

² Επιβλέπων, Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, , email: e_athanasiou@yahoo.gr

³ Επιβλέπων, Δήμος Πέλλας, email: avramides@giannitsa.gr

⁴ Τεχνικός σύμβουλος Δημάρχου Πέλλας, email: stopaeng@yahoo.gr

⁵ Επιβλέπουσα, Περιφέρεια Ιονίων Νήσων, email: milargy@gmail.com

ανθρακοελασμάτων, εγκατάσταση tuned mass dampers κ.α.) και έχουν διαστασιολογηθεί με βάση τα αποτελέσματα ανελαστικών αναλύσεων.

2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΞΩΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 Ιστορικό

Η Γέφυρα έχει μήκος (χωρίς τις προσβάσεις) 85.7m και οριζοντιογραφικά είναι ευθύγραμμη, χωρίς εγκάρσια κλίση, αλλά με ελαφρώς μηκοτομική, ενώ το συνολικό της πλάτος είναι 12.20m. Ο φορέας της Γέφυρας αποτελείται από τρία ανοίγματα. Τα δύο ακαία ανοίγματα (μήκους 18.6m) εδράζονται αφενός σε ακρόβαθρο, αφετέρου σε δίστυλο μεσόβαθρο. Το κεντρικό άνοιγμα (μήκους 48.5m), στηρίζεται (μονολιθικά) σε τέσσερα τόξα από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω κατακόρυφων ορθοστατών (στύλων). Στα σημεία σύνδεσης των ορθοστατών με τα τόξα εντοπίζονται εγκάρσιες δοκοί με εξαίρεση τους ακραίους ορθοστάτες που καταλήγουν στο έδαφος μέσω στοιχείου θεμελίωσης. Σημειώνεται επίσης ότι οι τέσσερις ορθοστάτες με το μικρότερο ύψος, πλησίον της κλείδας, είναι εμφανιζόμενοι. Οι πλάκες του καταστρώματος συνδέονται άμεσα με κύριες δοκούς και διαφράγματα στα ακραία ανοίγματα, και με πλέγμα δοκών στο κεντρικό άνοιγμα. Μεταξύ των τριών ανοιγμάτων του καταστρώματος υπάρχουν αρμοί (ανεπαρκούς εύρους), οι οποίοι έχουν επικαλυφθεί με πολλαπλά στρώματα ασφάλτου (τα οποία εμφανίζουν σε αυτές τις θέσεις ρωγμές).

Η θεμελίωση των δίστυλων βάθρων των ακραίων ανοιγμάτων, των τόξων του μεσαίου ανοίγματος καθώς και των ακραίων ορθοστατών αυτών, πραγματοποιείται μέσω ογκωδών βάσεων σκυροδέματος, που εδράζονται σε βραχώδες υπόβαθρο. Στα ακρόβαθρα, διαπιστώθηκε τυπική διάταξη, χωρίς θωράκια.



Εικόνα 1: Φωτογραφία Γέφυρας



Εικόνα 2: Αρμός μεταξύ ακραίου και κεντρικού ανοίγματος και περιοχές αποφλοίωσης σκυροδέματος και έντονης οξείδωσης του οπλισμού



Εικόνα 3: Στοιχείο Θεμελίωσης

2.2 Τεκμηρίωση

Εκτελέστηκε πρόγραμμα Τεκμηρίωσης ικανοποιητικής Σ.Α.Δ. (Στάθμης Αξιοπιστίας Δεδομένων) με χρήση τηλεσκοπικού γερανού, εξοπλισμού αναρρίχησης και ΣμηΕΑ (drone), το οποίο περιλάμβανε : πυρηνοληψίες, ανιχνεύσεις οπλισμού, χαντρώματα, παχυμετρήσεις, αποκοπή δειγμάτων οπλισμού, ενδοσκοπήσεις, εκτίμηση διάβρωσης, κρουσιμετρήσεις, απεικονίσεις θερμοκάμερας, κ.α.



Εικόνες 4 & 5 : χρήση τηλεσκοπικού γερανού κατά την Τεκμηρίωση

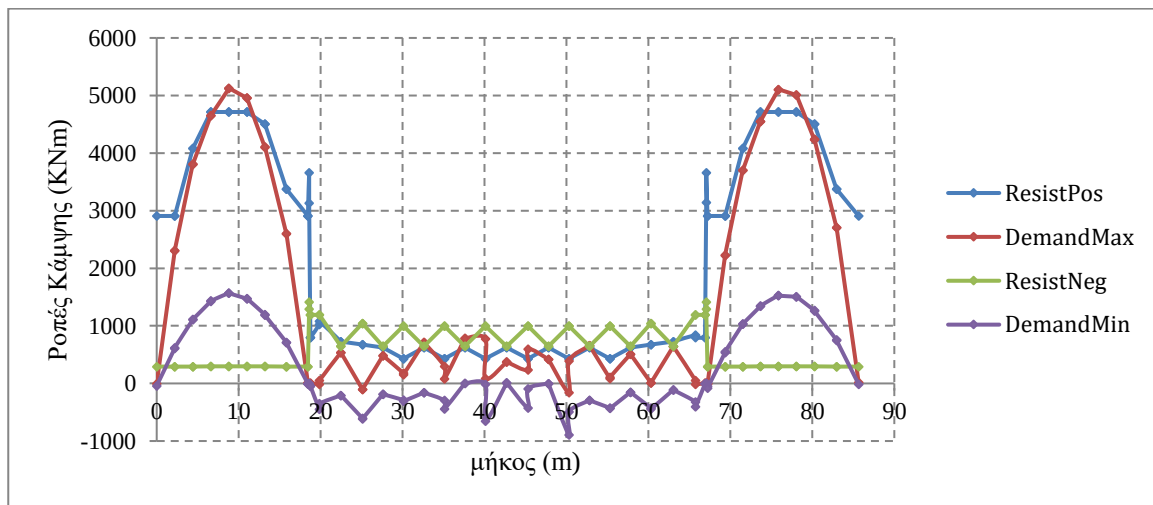
2.3 Αποτίμηση

Δημιουργήθηκαν κατάλληλα προσομοιώματα και εκτελέστηκαν ελαστικές και ανελαστικές αναλύσεις (στατικές/pushover και δυναμικές). Πορίστηκε ότι το υφιστάμενο δομικό σύστημα δεν επαρκεί για την κάλυψη του Στόχου Επιτελεστικότητας «B1» ($\alpha_g=0.24$), ούτε για την ανάληψη των σύγχρονων φορτίων κυκλοφορίας (EN 1991 600kN/400kN/200kN).

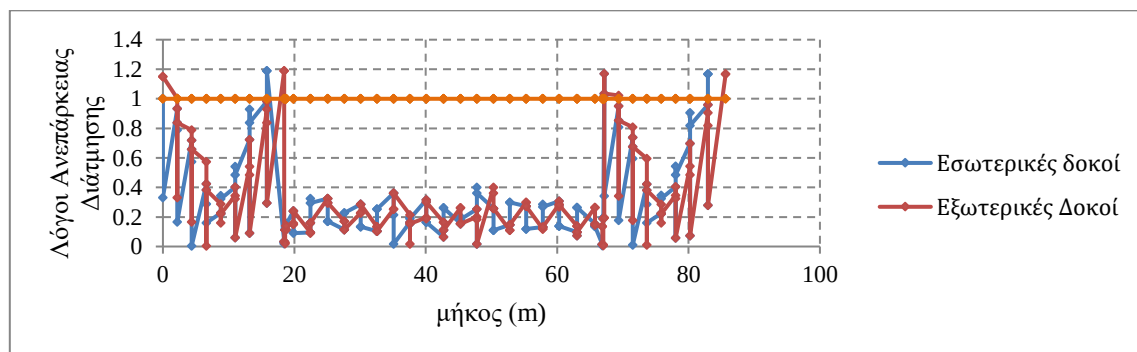
Χαρακτηριστικά, διαπιστώθηκαν :

- έλλειμμα έναντι ροπής στις κύριες δοκούς των ακραίων ανοιγμάτων
- έλλειμμα έναντι τέμνουσας και πλαστιμότητας σε πολλά στοιχεία (όλων των ανοιγμάτων)
- ανεπάρκεια εφεδράνων και αρμών για πλήρως ανεξάρτητη λειτουργία των τριών ανοιγμάτων
- φαινόμενα σημαντικών δευτερευουσών ροπών στα ευλύγιστα στοιχεία, κ.α.

Οι έλεγχοι μή-σεισμικών δράσεων συνοψίζονται στα παρακάτω σχήματα όπου παρουσιάζονται και τα ελλείματα καμπτικής και διατμητικής αντοχής του υφιστάμενου φορέα καταστρώματος, τα οποία θεραπεύτηκαν με κατάλληλες επεμβάσεις (ΙΟΠ).

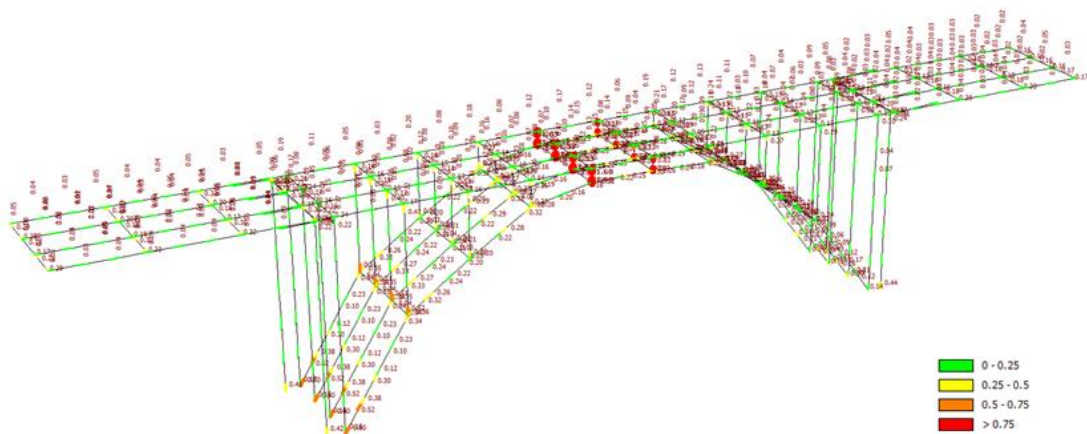


Σχήμα 1: Περιβάλλουσα Απαίτησης Καμπτικών Ροπών και Διαθέσιμων Αντοχών

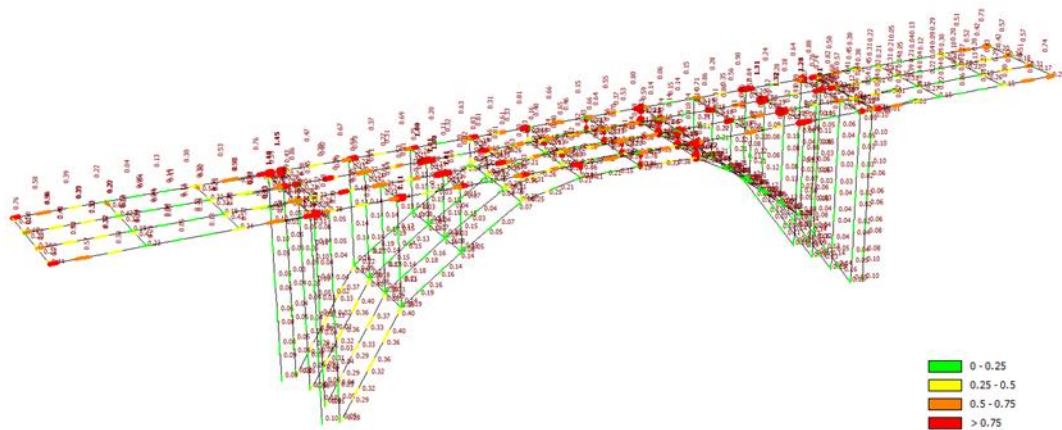


Σχήμα 2: Λόγοι Ανεπάρκειας Διάτμησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανελαστικής σεισμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας.



Εικόνα 6: Δείκτες επάρκειας κάμψης στη διαμήκη διεύθυνση (0.24g) - μερικώς ενισχυμένου



Εικόνα 7: Δείκτες επάρκειας διάτμησης στη διαμήκη διεύθυνση (0.24g) - μερικώς ενισχυμένου

2.4 Επεμβάσεις

Οι επεμβάσεις περιλαμβάνουν:

- εφαρμογή υφασμάτων ΙΟΠ (Ινοπλισμένων Πολυμερών) άνθρακα ή υάλου
- εξάρτηση ακραίων ανοιγμάτων στα δίστυλα μεσόβαθρα σε περίπτωση μεγάλων σεισμικών μετακινήσεων με ειδικές συσκευές (lock up)
- εξασφάλιση ακραίων ανοιγμάτων σε περίπτωση μεγάλων σεισμικών μετακινήσεων με διατμητικά κλειδιά
- εξασφάλιση λυγηρών στοιχείων
- αποκατάσταση διάβρωσης

3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ «ΑΠΛΗΣ» ΓΕΦΥΡΑ ΕΚ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 Ιστορικό

Η δεύτερη εφαρμογή αναφέρεται σε μια πιο "απλή" γέφυρα εκ προεντεταμένου σκυροδέματος συνολικού μήκους (χωρίς τις προσβάσεις) 48.28 m. Οριζοντιογραφικά είναι ευθύγραμμη, χωρίς εγκάρσια κλίση, ενώ το συνολικό της πλάτος είναι 9.20m. Ο φορέας της Γέφυρας αποτελείται από ένα άνοιγμα. Στηρίζεται σε δύο ακρόβαθρα και η πλάκα του καταστρώματος συνδέεται με τέσσερις προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς σκυροδέματος καθώς και εγκάρσια διαφράγματα ανά 9.70m.



Εικόνα 8: Όψη Γέφυρας

Η γέφυρα λειτουργεί σε διαβρωτικό περιβάλλον (υψηλή υγρασία σε συνδυασμό με κύκλους χαμηλών-υψηλών θερμοκρασιών κατά τη χειμερινή περίοδο), και εμφανίζει σημαντική παθολογία. Χαρακτηριστικά, στην πλάκα και στις δοκούς του καταστρώματος της Γέφυρας διαπιστώθηκε αποφλοιώση σκυροδέματος και έντονη οξείδωση του οπλισμού, ενώ εμφανείς ήταν και κάποιες ρωγμές στα ακρόβαθρα. Επιπλέον, έντονη διάβρωση παρατηρήθηκε σε πολλούς σωλήνες περιβολής, η οποία σε λίγες περιοχές εκτεινόταν βαθύτερα - στους τένοντες.

Και σε αυτή την περίπτωση εκτελέστηκε πρόγραμμα Τεκμηρίωσης ικανοποιητικής Σ.Α.Δ. (Στάθμης Αξιοπιστίας Δεδομένων) με χρήση τηλεσκοπικού γερανού και σκάφους, το οποίο περιλάμβανε : πυρηνοληψίες, ανιχνεύσεις οπλισμού, χαντρώματα, παχυμετρήσεις, αποκοπή δειγμάτων οπλισμού, ενδοσκοπήσεις, εκτίμηση διάβρωσης, κρουσιμετρήσεις, απεικονίσεις θερμοκάμερας, κ.α.



Εικόνα 9: Οξειδωμένοι σωλήνες περιβολής στο μέσο του ανοίγματος της γέφυρας



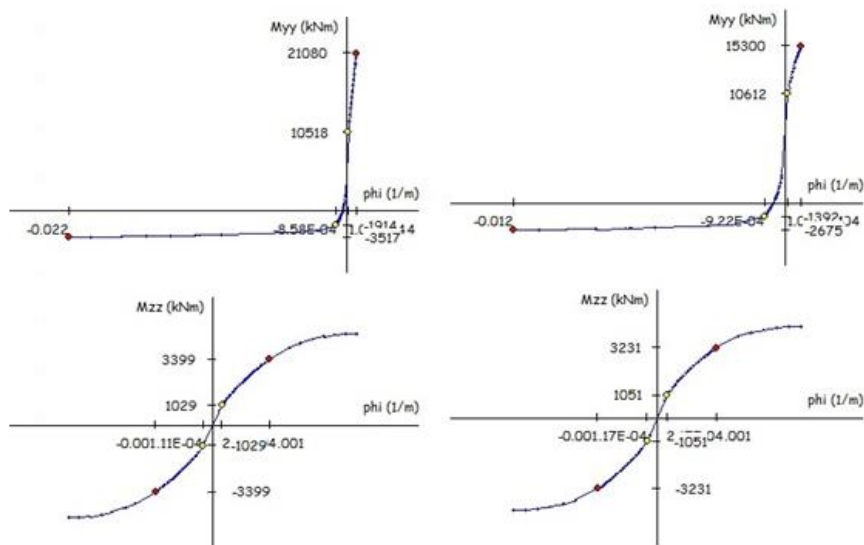
Εικόνα 10: Ακρόβαθρο-Θεμελίωση

3.2 Αποτίμηση

Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης αποτίμησης προκύπτει ότι η υφιστάμενη κατασκευή δεν επαρκεί για την κάλυψη του Στόχου Επιτελεστικότητας «B1» ($\alpha_g=0.16$), ούτε για την ανάληψη των σύγχρονων φορτίων κυκλοφορίας (EN 1991 600kN/400kN/200kN).

Χαρακτηριστικά, διαπιστώθηκαν :

- ανεπάρκεια αρμών
- εδράσεις χωρίς αντισεισμικές προβλέψεις
- έλλειμμα έναντι ροπής στις προκατασκευασμένες δοκούς
- έλλειμμα έναντι τέμνουσας και πλαστιμότητας σε πολλά στοιχεία
- προβλήματα λειτουργικότητας (υπερβολικές ταλαντώσεις)



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροπής -καμπυλότητας ενισχυμένης διατομής με γωνιακά ελάσματα L180-16 στην μεσαία θέση και ανθρακοέλασμα πάχους 1.4mm

3.3 Επεμβάσεις

Οι επεμβάσεις περιλαμβάνουν:

- κατασκευή δεσμεύσεων έναντι μεγάλων σεισμικών μετατοπίσεων (stoppers)
- εφαρμογή υφασμάτων ΙΟΠ (Ινοπλισμένων Πολυμερών) άνθρακα
- εγκατάσταση συσκευών μείωσης ταλαντώσεων TMD (Tuned Mass Dampers)
- ενισχύσεις τοπικής αποκατάστασης («συρραφές») με προεντεταμένα ανθρακοελάσματα
- προσθήκη μεταλλικών στοιχείων διατομής L (συνδεδεμένων μέσω βλήτρων) στις δοκούς με σκοπό την αύξηση της καμπτικής αντοχής
- αποκατάσταση διάβρωσης

4 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ-ΜΝΗΜΕΙΟΥ

4.1 Ιστορικό

Η τρίτη εφαρμογή αναφέρεται σε ένα τεχνικό έργο-μνημείο εκ λιθοδομής και οπτοπλινθοδομής μήκους περίπου 20.00m και πλάτους 4.60m. Αποτελείται από δύο ανοίγματα-αψίδες (τα οποία εδράζονται στο έδαφος μέσω ενός μεσοβάθρου και δύο ακροβάθρων / Εικόνα 11: Όψη Γέφυρας). Τα δομικά υλικά της γέφυρας είναι λίθοι, συμπαγείς πλίνθοι και κονιάματα.

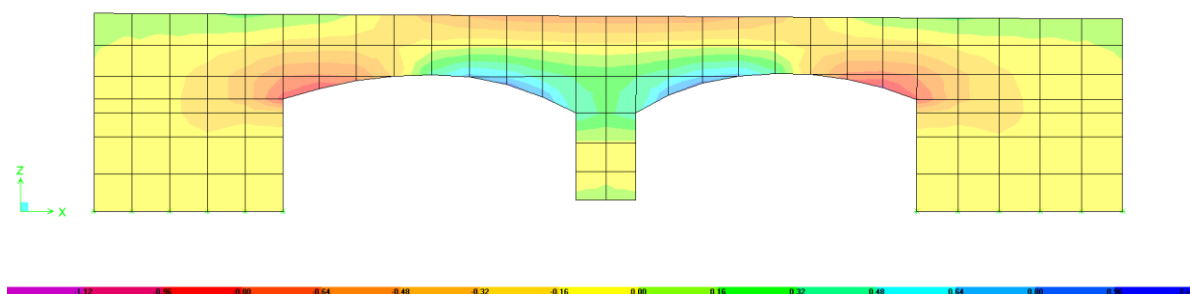


Εικόνα 11: Όψη Γέφυρας

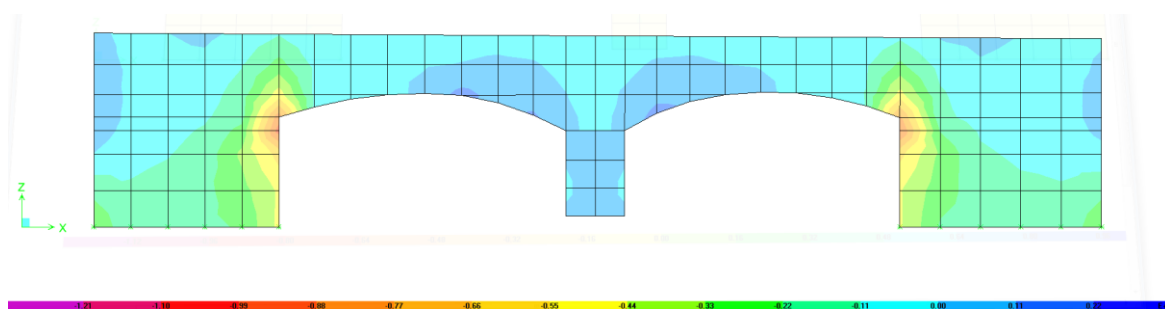
Η γέφυρα έχει αποτυπωθεί λεπτομερώς στο παρελθόν. Στην πιο πρόσφατη Τεκμηρίωση παρατηρήθηκαν σημαντικές ρωγμές στην τοιχοποιία, αποκολλήσεις πλίνθων καθώς και ανάπτυξη βλάστησης. Τόσο από τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών υπολογισμών, όσο και από την (ιστορική) παθολογία της υφιστάμενης γέφυρας πορίζεται ότι οι προηγούμενες (< 2011) καθιζήσεις στο μεσόβαθρο είναι σημαντικές (>>10cm) και περίπου διπλάσιες από τα ακρόβαθρα (>>5cm). Σε προηγούμενες γεωτεχνικές μελέτες και έρευνες είχε τεκμηριωθεί ότι το έδαφος όπου εδράζεται το μεσόβαθρο είναι επισφαλές έναντι ρευστοποίησης.

4.2 Αποτίμηση

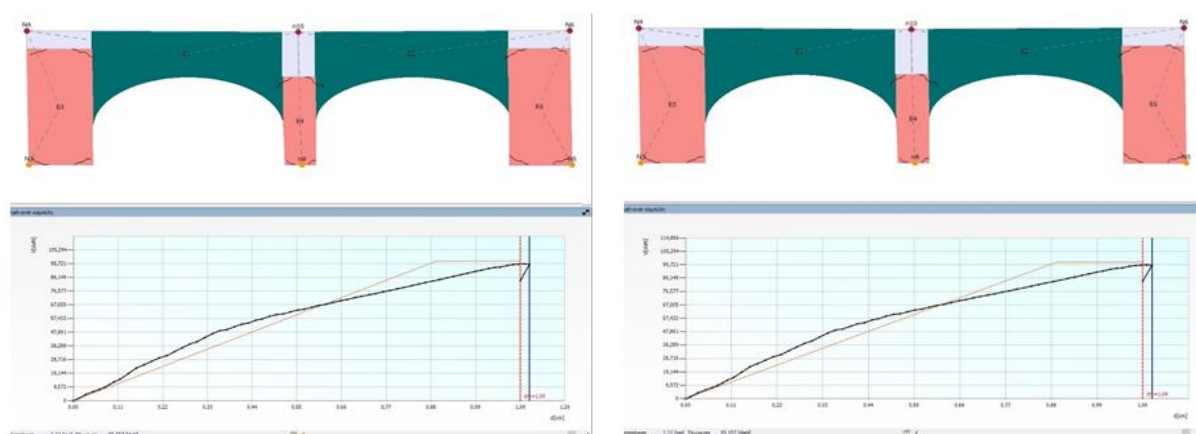
Η γέφυρα προσομοιώθηκε αναλυτικά (ελαστικά και ανελαστικά) μέσω επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, καθώς και κατάλληλων μακροστοιχείων (ραβδωτών στοιχείων με συγκεντρωμένη ανελαστικότητα για τη σεισμική απόκριση). Επιβλήθηκαν τα μόνιμα φορτία, τα φορτία κυκλοφορίας και η σεισμική δράση ($\alpha_g=0.24$).



Εικόνα 12: Τάσεις σ_{11} από μόνιμα και κινητά φορτία



Εικόνα 13: Τάσεις σ_{22} από μόνιμα και κινητά φορτία



Εικόνα 14: Αποτίμηση για σεισμική δράση

Οι δείκτες ανεπάρκειας (κάμψης και διάτμησης) είναι αρκετά υψηλότεροι της μονάδας.

4.3 Επεμβάσεις

Οι επεμβάσεις περιλαμβάνουν:

- καθαίρεση των πολλαπλών στρώσεων ασφάλτου
- ενέσεις εμποτισμού του εδάφους θεμελίωσης
- ομογενοποίηση μάζας
- βελτίωση του εδάφους μέσω μικροπασσάλων (έναντι ρευστοποίησης)
- κατασκευή δύσκαμπτου καταστρώματος

5 ΑΝΤΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Η ειδοποιός διαφορά της Αποτίμησης με βάση την Επιτελεστικότητα, σε σχέση με την εφαρμογή επιμέρους διατάξεων που αφορούν «νέα Τεχνικά Έργα», οφείλεται στην ικανότητα της μεθόδου να κρίνει το τελικό αποτέλεσμα και την ποριζόμενη διακινδύνευση (δομική ή σεισμική) χωρίς να προϋποθέτει την τήρηση όλων των (επιμέρους) «προληπτικών» διατάξεων που εφαρμόζονται στις «νέες Κατασκευές».

Συνήθως, οι δομητικές επεμβάσεις γεφυρών περιλαμβάνουν, πέραν της σεισμικής αναβάθμισης, και βελτίωση της ικανότητας ανάληψης κατακορύφων δράσεων ή/και μέτρα για την εξασφάλιση ανθεκτικότητας σε διάρκεια.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bardakis, V., Fardis M.N., “A displacement-based seismic design procedure for concrete bridges having deck integral with the piers”. Bul. of Earthquake Engineering, Vol. 9, Issue 2 (2011) pp 537-560
2. Priestley M.J.N., Seible F., Calvi G.M., “Seismic Design & Retrofit of Bridges”, Wiley, 1996
3. Final Draft EN 1998-3 NEN SC8 PT3, 2017
4. EN 1998-3:2005. CEN, 2008
5. Κανονισμός Επεμβάσεων, 3η Αναθεώρηση ΚΑΝ.ΕΠΕ., Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, 2022
6. Κανονισμός Δομητικών Επεμβάσεων Τοιχοποιίας, Σχέδιο ΚΑ.Δ.Ε.Τ., Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, 2021