

Αναβάθμιση Υφιστάμενης Γέφυρας Ποταμού Σελινούντα στην Χ.Θ. 85+674 του Αυτοκινητοδρόμου Κόρινθος - Πάτρα

Χρήστος Κατσάρας

Πολ.Μηχανικός ΕΜΠ, M.Sc. U.C. Berkeley, ckatsaras@denco.gr

Δρ. Τηλέμαχος Παναγιωτάκος

Πολ.Μηχανικός, PhD Παν. Πάτρας, tranagiotakos@dencorc.gr

Περίληψη

Το παρόν άρθρο αναφέρεται στην Αναβάθμιση της Υφιστάμενης Γέφυρας Β289 του Ποταμού Σελινούντα στην Χ.Θ. 85+674 του Αυτοκινητοδρόμου ΕΚΠΠΤ (Ελευσίνα-Κόρινθος-Πάτρα-Πύργος-Τσακώνα) της ΟΛΥΜΠΙΑΣ ΟΔΟΥ. Η υφιστάμενη γέφυρα μελετήθηκε το 1967 και κατασκευάστηκε μεταξύ του 1968 και 1969. Η μελέτη αναβάθμισης της γέφυρας καθώς και η υποστήριξη της μελέτης κατά την κατασκευή εκπονήθηκαν από την DENCO Σύμβουλοι Μηχανικοί και DENCO Στατικές Μελέτες Ι.Κ.Ε. Οι εργασίες αναβάθμισης ξεκίνησαν το 2014. Σήμερα έχει ολοκληρωθεί και έχει δοθεί στην κυκλοφορία ο κλάδος της κατεύθυνσης προς Πάτρα και ο δεύτερος κλάδος είναι υπό κατασκευή. Η αναβάθμιση της γέφυρας Σελινούντα αποτελεί την πρώτη εφαρμογή στην Ελλάδα των παρακάτω τεχνικών αναβάθμισης υφιστάμενης κατασκευής: α) αντικατάσταση υφιστάμενων εφεδράνων με εφέδρανα σεισμικής μόνωσης, β) εφαρμογή συστήματος εξωτερικής προέντασης για την ανάληψη πρόσθετων φορτίων λόγω κατά πλάτους επέκτασης του φορέα, γ) αντικατάσταση τμήματος του επιχώματος πίσω από τα ακρόβαθρα με ελαφρύ επίχωμα από Διογκωμένη Πολυστερίνη (Expanded Polystyrene, EPS) με στόχο την μείωση των σεισμικών ωθήσεων στα ακρόβαθρα.



Σχ. 1 – Άποψη της γέφυρας ποταμού Σελινούντα πριν τις εργασίες αποκατάστασης (άνω) και μετά τις εργασίες αποκατάστασης (κάτω).

1 Περιγραφή Υφιστάμενης Κατάστασης

1.1 Υφιστάμενη κατασκευή

Η υφιστάμενη γέφυρα του αυτ/μου ΕΚΠΠΤ στην θέση του Ποταμού Σελινούντα (Σχ. 1) είναι ευθύγραμμη συνολικού μήκους 145m και αποτελείται από τρία αμφίρριστα ανοίγματα 47.0m+48.2m+47.0m. Η γέφυρα διαθέτει δύο ανεξάρτητους κλάδους πλάτους 12.4m, όπου ο κάθε ένας εξυπηρετεί μια κατεύθυνση κυκλοφορίας του αυτ/μου. Ο φορέας κάθε κλάδου αποτελείται από 5 επιτόπου χυτές προεντεταμένες δοκούς ύψους 2.65m οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με επιτόπου χυτή πλάκα πάχους 0.20m και εδράζονται στα βάθρα μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Τα μεσόβαθρα και τα ακρόβαθρα είναι τοιχοειδή στοιχεία ύψους περίπου 15m τα οποία θεμελιώνονται μέσω πεδύλων σε μεγάλο βάθος, περίπου 10m κάτω από την κοίτη του ποταμού. Η γενική κατάσταση του οπλισμένου σκυροδέματος της γέφυρας ήταν πάρα πολύ καλή.

Τα σχέδια και οι υπολογισμοί της αρχικής μελέτης είναι διαθέσιμα όμως δεν ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικά κατασκευασμένη γέφυρα. Συγκεκριμένα η γωνία λοξότητας της κατασκευασμένης γέφυρας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που προβλεπόταν στην αρχική μελέτη (39° αντί για 20°) και για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν 5 προεντεταμένες δοκοί ανά κλάδο αντί για 4 στην αρχική μελέτη. Επιπλέον η προένταση που βρέθηκε στον φορέα ήταν πολύ διαφορετική (32 προεντεταμένες ράβδοι Φ26 Y1050 αντί για 9 τένοντες 12T0.5” Y1570 στην αρχική μελέτη).

1.2 Αναγκαιότητα αναβάθμισης

Η αναγκαιότητα για αναβάθμιση της υφιστάμενης κατασκευής προέκυψε για την ικανοποίηση των δύο παρακάτω κύριων απαιτήσεων με βάση τις προγραφές του αυτοκινητοδρόμου ΕΚΠΠΤ:

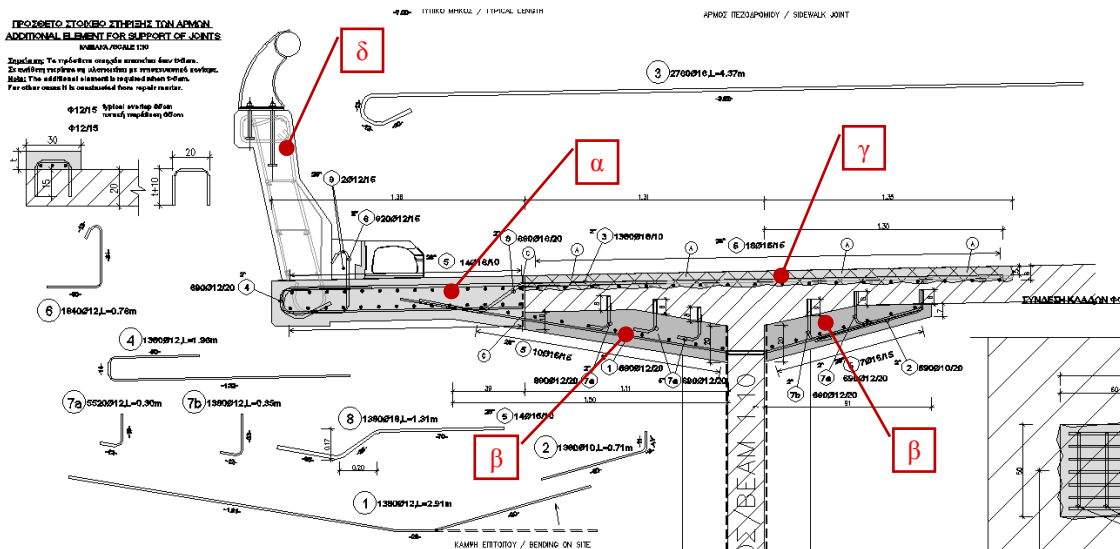
1. Η τυπική διατομή του αυτ/μου δεν μπορεί να υλοποιηθεί στο υφιστάμενο πλάτος της γέφυρας. Συγκεκριμένα απαιτείται επέκταση του πλάτους κατά 1.4m περίπου στον κάθε κλάδο της γέφυρας. Η διαθέσιμη προένταση και οι διαθέσιμοι οπλισμοί του φορέα δεν επαρκούν για τα αυξημένα φορτία που συνεπάγεται η παραπάνω επέκταση.
2. Η γέφυρα βρίσκεται σε έντονα σεισμογενή περιοχή κοντά στο Αίγιο. Λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών και την εγγύτητα της γέφυρας σε ενεργά ρήγματα η επιτάχυνση εδάφους για τον έλεγχο επάρκειας της γέφυρας προκύπτει ίση με 0.36g. Η υφιστάμενη κατασκευή δεν διαθέτει τους απαιτούμενους οπλισμούς στην βάση των βάθρων ούτε την απαιτούμενη θεμελίωση για να ικανοποιήσει την παραπάνω απαίτηση. Επιπλέον τα υφιστάμενα ελαστομεταλλικά εφεδράνα πάχους ~5cm δεν μπορούν να αναλάβουν τις σεισμικές μετακινήσεις.

2 Εργασίες Αναβάθμισης Φορέα για τα Αυξημένα Φορτία

2.1 Κατά πλάτος επέκταση του φορέα

Οι πλευρικοί πρόβολοι του φορέα επεκτείνονται κατά 1.40m για να υλοποιηθεί η νέα τυπική διατομή του αυτ/μου όπως φαίνεται στο Σχ. 2. Η επέκταση υλοποιήθηκε από πρόσθετα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος C30/37 (στοιχείο (α) στο Σχ. 2). Για να υλοποιηθεί το απαιτούμενο αυξημένο πάχος των 50cm στην ρίζα του προβόλου κατασκευάστηκαν πρόσθετα στοιχεία από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα SC30/37 στο κάτω μέρος της πλάκας του φορέα (στοιχείο (β) στο Σχ. 2). Η διατμητική σύνδεση του νέου σκυροδέματος έγινε στο κάτω τμήμα με βλήτρα Φ12. Οι εγκάρσιοι κάτω οπλισμοί

διαπερνούν τον κορμό των υφιστάμενων δοκών μέσα από οπές. Οι άνω κύριοι οπλισμοί του προβόλου αγκυρώνονται μέσω συνάφειας. Για τον σκοπό αυτό έγινε υδροκαθαίρεση στην άνω επιφάνεια της υφιστάμενης πλάκας σε πλάτος 2.66m και για πάχος περίπου 8cm. Στην καθαιρεμένη περιοχή αγκυρώθηκαν οι άνω οπλισμοί του προβόλου με χρήση επισκευαστικού κονιάματος υψηλής συνάφειας (στοιχείο (γ) στο Σχ. 2). Τέλος κατασκευάστηκε πρότυπο στηθαίο ασφαλείας τύπου ΣΤΕ-9 με βάση τις απαιτήσεις ασφάλισης του αυτ/μου (στοιχείο δ) στο Σχ. 2).



Σχ. 2 – Υλοποίηση της επέκτασης των προβόλων του φορέα κατά 1.40m.

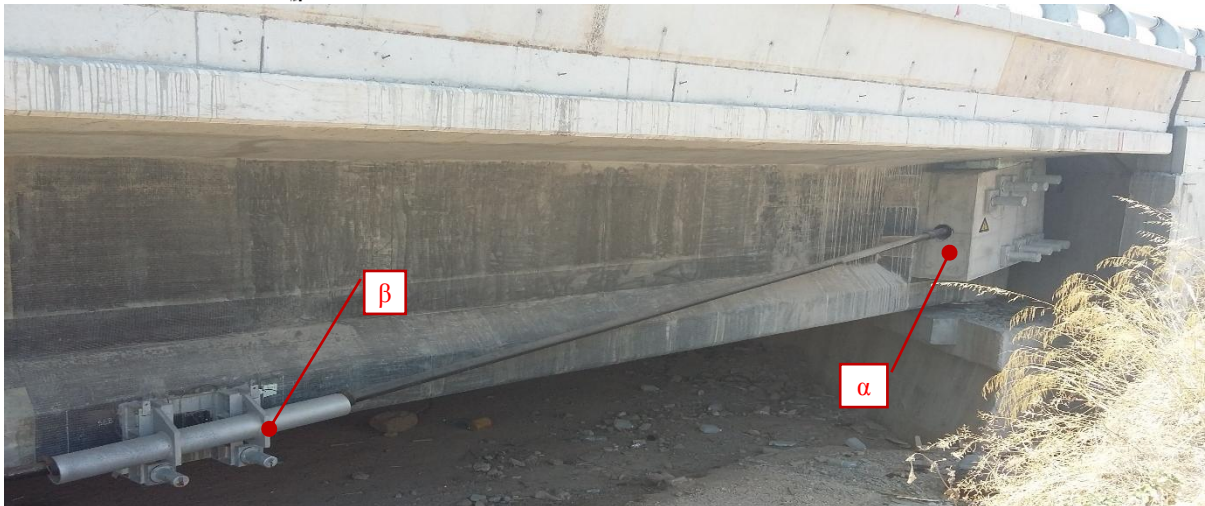
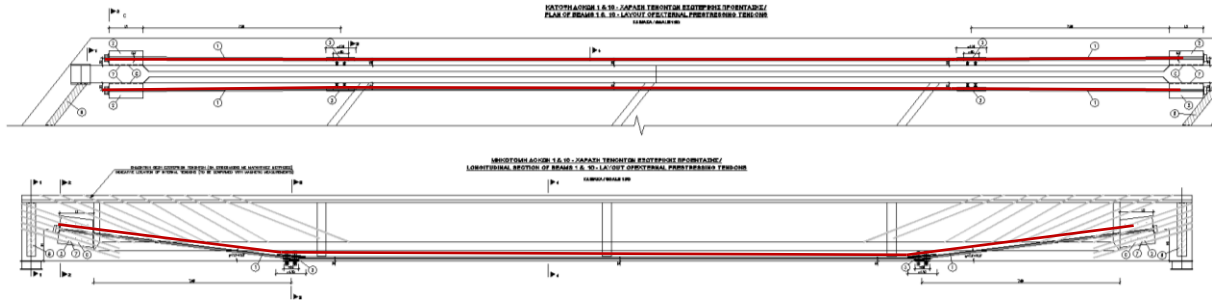
2.2 Εφαρμογή πρόσθετης εξωτερικής προέντασης

Με βάση τις επιτόπου διερευνήσεις που περιλάμβαναν μαγνητικές μετρήσεις και αποκάλυψη των αγκυρώσεων των τενόντων βρέθηκαν στις δοκούς του φορέα 32 προεντεταμένες ράβδοι με αυλακώσεις διαμέτρου Φ26 από χάλυβα ποιότητας Y1050. Η προένταση αυτή είναι επαρκής για τα φορτία του αυτ/μου μόνο για τις εσωτερικές δοκούς. Αντίθετα λόγω της επέκτασης του φορέα σημειώνεται μεγάλη υπέρβαση των επιτρεπόμενων τάσεων σύμφωνα με το DIN4227 για τις ακραίες δοκούς στις εξωτερικές οριογραμμές της γέφυρας.

Η πρόσθετη απαιτούμενη προένταση για τις ακραίες δοκούς υλοποιήθηκε μέσω εξωτερικών τενόντων τύπου EX-66Φ7 από χάλυβα ποιότητας Y1570. Τοποθετούνται δύο τένοντες σε κάθε εξωτερική δοκό, ένας για κάθε όψη της. Οι εξωτερικοί τένοντες έχουν τραπεζοειδή χάραξη με δύο μεταλλικά στοιχεία εκτροπής περίπου στα L/4 και 3L/4 (στοιχείο (β) στο Σχ. 3), θέσεις στις οποίες υπήρχαν υφιστάμενες εγκάρσιες διαδοκίδες. Τα μεταλλικά στοιχεία εκτροπής συντίθενται από χαλύβδινα ελάσματα ποιότητας S355 και εικονίζονται λεπτομερώς στο Σχ. 4. Η ευστάθεια του στοιχείου εκτροπής εξασφαλίζεται από δύο εγκάρσια προεντεταμένες ράβδους Φ26.5 ποιότητας Y1030 οι οποίες εξισορροπούν την ροπή που εισάγει η εκτροπή της δύναμης των εξωτερικών τενόντων. Όλα τα εκτεθειμένα μεταλλικά ελάσματα του στοιχείου εκτροπής είναι γαλβανισμένα για προστασία έναντι διάβρωσης.

Η αγκύρωση των εξωτερικών τενόντων στα άκρα της δοκού πραγματοποιείται με στοιχεία αγκύρωσης οπλισμένου σκυροδέματος C40/50 (Στοιχείο (α) στο Σχ. 3) τα οποία συνδέονται μέσω τριβής με την υφιστάμενη δοκό. Η απαιτούμενη τριβή για την μεταφορά των δυνάμεων επιτυγχάνεται μέσω 8 εγκάρσιων προεντεταμένων ράβδων Φ47 ποιότητας Y1050 (Σχ. 5). Στην επιφάνεια της δοκού τοποθετήθηκαν οριζόντιες λωρίδες από ινοπλισμένα πολυμερή με στόχο την αγκύρωση του 25% της

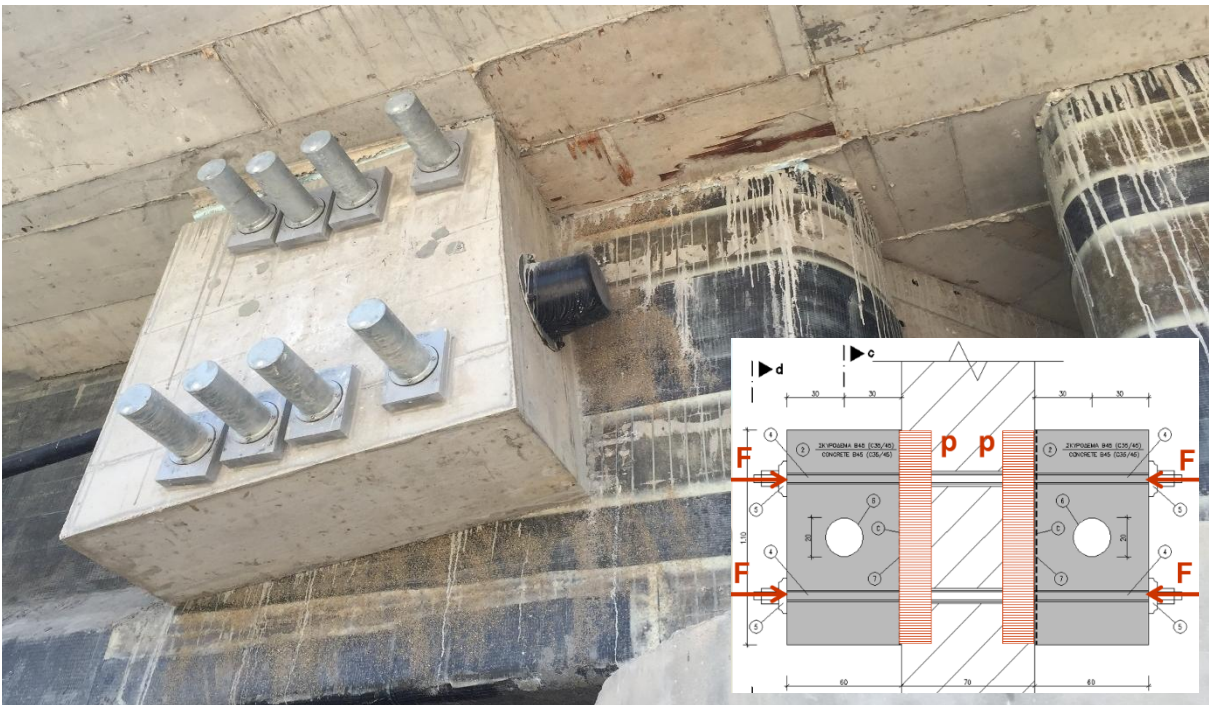
δύναμης προέντασης στο πέρας της δοκού όπως απαιτείται σύμφωνα με το DIN4227 (Σχ. 6 αριστερά). Πάνω στα πολυμερή εφαρμόστηκε χαλαζιακή άμμος για την αύξηση της τριβής στην θέση όπου κατασκευάζεται το στοιχείο αγκύρωσης. Η θέση των προεντεταμένων ράβδων και η γενικότερη γεωμετρία των στοιχείων αγκύρωσης καθορίζονται πλήρως από τις θέσεις από τις οποίες ήταν δυνατή η διάτρηση οπής στις δοκούς χωρίς να θίγονται οι υφιστάμενοι εσωτερικοί τένοντες. Οι παραπάνω θέσεις καθορίστηκαν μέσω επιτόπου μαγνητικών μετρήσεων (Σχ. 6 δεξιά).



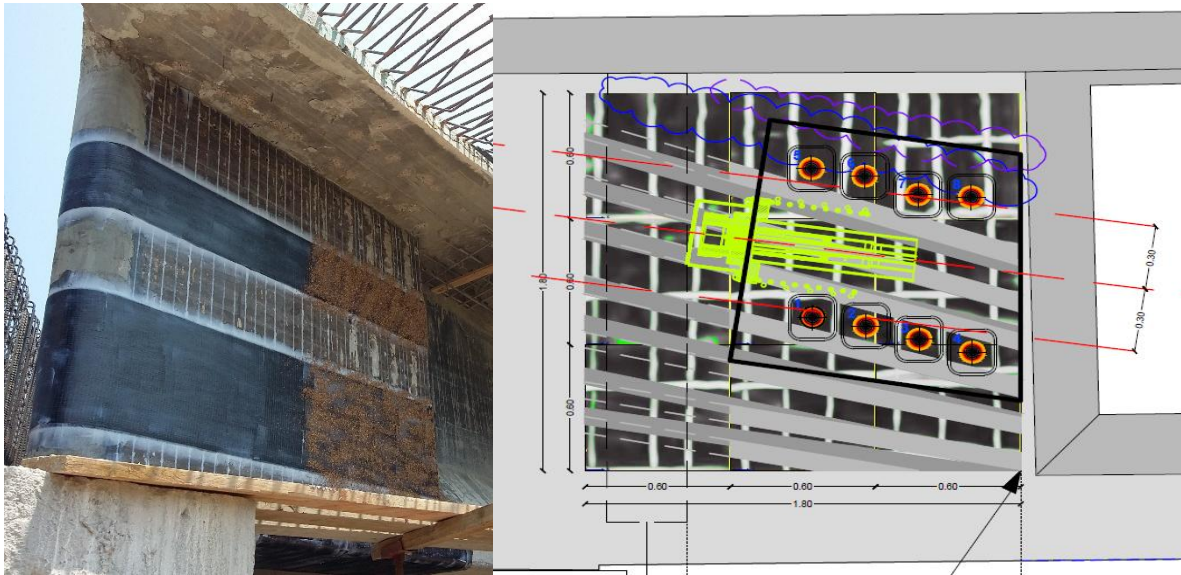
Σχ. 3 – Πρόσθετη εξωτερική προένταση στις ακραίες δοκούς. Άνω: χάραξη σε κάτοψη και μηκοτομή. Κάτω: Όψη του ακραίου τμήματος του εξωτερικού τένοντα όπου φαίνονται το μπλοκ αγκύρωσης (α) και το στοιχείο εκτροπής (β).



Σχ. 4 – Όψη του στοιχείου εκτροπής της εξωτερικής προέντασης στα $L/4$ και $3L/4$ της δοκού. Η ευστάθεια του εξασφαλίζεται από δύο εγκάρσια προεντεταμένες ράβδους $\Phi 26.5$ ποιότητας Y1030.



Σχ. 5 – Όψη του στοιχείου αγκύρωσης της εξωτερικής προέντασης στα άκρα της δοκού. Η ευστάθεια των δύο εκατέρωθεν συμμετρικών στοιχείων αγκύρωσης εξασφαλίζεται μέσω τριβής με την υφιστάμενη δοκό με 8 εγκάρσια προεντεταμένες ράβδους $\Phi 46$ ποιότητας Y1050 όπως εικονίζεται στο ένθετο σχήμα.



Σχ. 6 – Διαμόρφωση της επιφάνειας της υφιστάμενης δοκού πριν την κατασκευή του στοιχείου αγκύρωσης (αριστερά). Οι θέσεις διάτρησης οπών για την διέλευση των εγκάρσιων προεντεταμένων ράβδων καθορίστηκαν από επιτόπου μαγνητικές μετρήσεις (δεξιά).

Η διαδικασία τάνυσης των δύο εκατέρωθεν συμμετρικών τενόντων της κάθε δοκού έγινε τμηματικά σε 10 βήματα, όπου σε κάθε βήμα τανύονται εναλλάξ οι δύο τένοντες. Με τον τρόπο αυτό το στοιχείο εκτροπής παραμένει ευσταθές αφού οι ροπές από την δύναμη εκτροπής εισάγονται συμμετρικά.

2.3 Ενίσχυση του φορέα με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)

Η εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών (Fiber Reinforced Polymers, FRP) έχει ως στόχο την αύξηση της αντοχής του φορέα στα σημεία όπου αυτό απαιτείται (Σχ. 7). Συγκεκριμένα απαιτήθηκε:

α) αύξηση της καμπτικής αντοχής στο κάτω πέλμα των εξωτερικών δοκών με εφαρμογή 5 στρώσεων ανθρακουφάσματος πάχους στρώσης 1mm και πλάτους 60cm.

β) αύξηση της διατμητικής αντοχής στα άκρα όλων των δοκών με εφαρμογή 2 στρώσεων ανθρακουφάσματος μορφής U που αγκαλιάζει το κάτω πέλμα των δοκών. Οι αποστάσεις μεταξύ των λωρίδων είναι μεταβλητές ανάλογα με την απαίτηση διατμητικής ενίσχυσης. Στις αμβλείες γωνίες οι λωρίδες αγκυρώθηκαν με διαμερή αγκύρια ινών άνθρακα. Στις θέσεις όπου κατασκευάζονται τα στοιχεία αγκύρωσης της εξωτερικής προέντασης η διατμητική ενίσχυση υλοποιήθηκε με 23 ελάσματα σύνθετου υλικού άνθρακα διατομής 20mm x 3mm ανά όψη δοκού οι οποίες εισάγονται σε κατάλληλες κατακόρυφες αυλακώσεις στην επιφάνεια της δοκού (Σχ.6 αριστερά).

γ) τοποθέτηση οριζόντων λωρίδων στις θέσεις των μπλοκ αγκύρωσης της εξωτερικής προέντασης με στόχο την αγκύρωση του 25% της δύναμης της εξωτερικής προέντασης στο πέρας της δοκού (Σχ. 6 αριστερά). Τοποθετήθηκαν λωρίδες συνολικού πλάτους 1m εκατέρωθεν των εγκάρσιων ράβδων. Χρησιμοποιήθηκαν ανθρακουφάσματα πάχους στρώσης 1mm με εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού ίση με 986MPa. Τα ελάσματα σύνθετου υλικού άνθρακα έχουν εφελκυστική αντοχή 3100MPa.

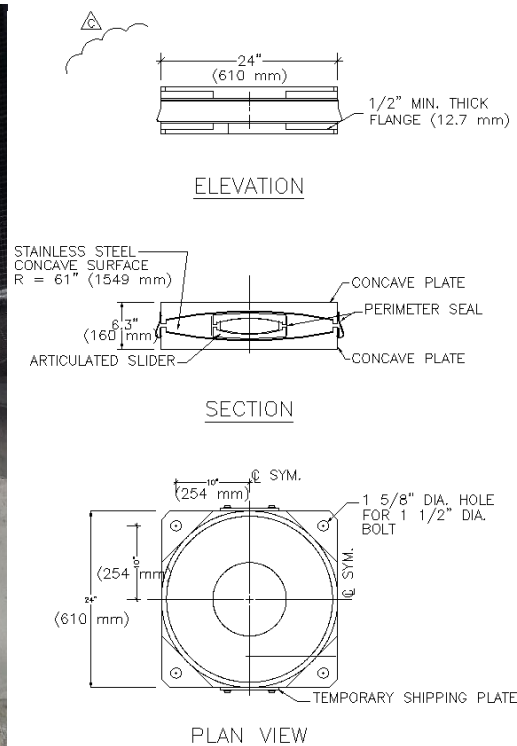


Σχ. 7 – Εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών FRP για την καμπτική και διατμητική ενίσχυση του φορέα

3 Σεισμική Μόνωση με Εφέδρανα Εκκρεμούς Τριβής (FPS)

3.1 Εφέδρανα σεισμικής μόνωσης

Το μεγάλο βάθος θεμελίωσης των βάθρων της γέφυρας, περίπου 10m εντός της κοίτης του ποταμού, καθιστά απαγορευτική οποιαδήποτε επέμβαση με στόχο την αύξηση της αντοχής της βάσης των βάθρων και της θεμελίωσης τους. Για τον λόγο αυτό προτιμάται αντί της αύξησης της αντοχής η μείωση της σεισμικής απαίτησης στα βάθρα μέσω συστήματος σεισμικής μόνωσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 60 εφέδρανα τριπλού εκκρεμούς τριβής (triple friction pendulum) τα οποία αντικατέστησαν τα ισάριθμα υφιστάμενα εφέδρανα στο άκρο κάθε δοκού. Τα εφέδρανα τριπλού εκκρεμούς τριβής (Σχ. 8) αποτελούνται από στοιχείο ολίσθησης με επικάλυψη από Teflon το οποίο ολισθαίνει σε επαφή με καμπύλες επιφάνειες από ανοξείδωτο χάλυβα.



Σχ. 8 – Εφεδρανο σεισμικής μόνωσης τύπου τριπλού εκκρεμούς τριβής (triple FPS).

Η απόκριση των εφεδράνων εκκρεμούς τριβής κατά την σεισμική διέγερση αντιστοιχεί σε ολίσθηση με χαμηλό συντελεστή τριβής σε διεπιφάνεια μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας. Η παραπάνω μη γραμμική υστερητική συμπεριφορά οδηγεί σε επιμήκυνση της ισοδύναμης ιδιοπεριόδου της κατασκευής και επιπλέον απόσβεση ενέργειας λόγω της δράσης της τριβής. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων οδηγεί σε σημαντική μείωση της σεισμικής απαίτησης στην υποδομή. Οι αυξημένες σεισμικές μετακινήσεις που αντιστοιχούν στην αύξηση της ιδιοπεριόδου περιορίζονται από την αυξημένη απόσβεση ώστε να αναλαμβάνονται με ασφάλεια από τα εφεδράνα ενώ αυτά παραμένουν ευσταθή υπό το πλήρες κατακόρυφο φορτίο.

Τα ισοδύναμα στοιχεία των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι: μέσος συντελεστής τριβής $\mu=0.09$, ακτίνα καμπυλότητας $R=2.92\text{m}$, ενεργός περίοδος $T_{\text{eff}}=2.30\text{s}$, ισοδύναμη απόσβεση $\xi_{\text{eff}}=34\%$, απαιτούμενη ικανότητα μετακίνησης $\pm 320\text{mm}$.

Η ισοδύναμη ακτίνα καμπυλότητας R των μονωτήρων είναι γεωμετρική ιδιότητα και δεν υπόκειται σε μεταβλητότητα. Η ονομαστική τιμή του συντελεστή τριβής προσδιορίζεται από δοκιμές σε πρωτότυπα εφεδράνα και υπόκειται σε σημαντική μεταβλητότητα. Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε μεταβλητότητα της ονομαστικής τιμής κατά $\pm 25\%$ για την οποία προκύπτουν αντιστοίχως η ελάχιστη και η μέγιστη ονομαστική τιμή της παραμέτρου: $\min DP_{\text{nom}} = 0.0675$ και $\max DP_{\text{nom}} = 0.1125$. Ταυτόχρονα υπάρχουν πρόσθετες μεταβλητότητες του ισοδύναμου συντελεστή τριβής λόγω χρόνιων φαινομένων. Η μεταβλητότητα αυτή εκτιμάται σύμφωνα με το EN998-2, παραρτήματα J και JJ, με βάση τους συντελεστές λ οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις φαινομένων όπως η γήρανση του εφεδράνου, η θερμοκρασία, η ρύπανση του εφεδράνου και η συνολική διαδρομή που διανύει το εφεδρανο. Με βάση τα παραπάνω η συνολική μεταβλητότητα του συντελεστή τριβής λαμβάνεται υπόψη με τις δύο παρακάτω αναλύσεις:

- Ανάλυση κάτω ορίου με την κατώτατη τιμή του συντελεστή τριβής ίση με 6.7%
- Ανάλυση άνω ορίου με την ανώτατη τιμή του συντελεστή τριβής ίση με 14.6%.

Κατά κανόνα, η ανάλυση άνω ορίου οδηγεί σε μέγιστες σεισμικές δυνάμεις στην κατασκευή και η ανάλυση κάτω ορίου οδηγεί σε μέγιστες μετακινήσεις στους σεισμικούς μονωτήρες. Από την παραπάνω θεώρηση προκύπτουν οι ισοδύναμες ελατηριακές σταθερές που αντιστοιχούν στην ισοδύναμη δυσκαμψία K_{eff} και εφαρμόζονται στην συνέχεια στο χωρικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση φασματικής απόκρισης. Επιπλέον προκύπτει και η απομείωση του φάσματος για περιόδους μεγαλύτερες από $0.8T_{eff}$ η οποία αντιστοιχεί στον συντελεστή ισοδύναμης απόσβεσης ξ_{eff} .

Τα εφεδράνα σεισμικής μόνωσης συνδέθηκαν με την υφιστάμενη υποδομή και την υφιστάμενη ανωδομή μέσω ειδικής ρητίνης υψηλής συνάφειας. Η σύνδεση αυτή είναι επαρκής για την μεταφορά των οριζοντίων δυνάμεων καθώς αυτές περιορίζονται από την τιμή του συντελεστή τριβής. Το πάχος των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης είναι περίπου 25cm ενώ το πάχος των υφιστάμενων ελαστομεταλλικών εφεδράνων είναι περίπου 5cm. Συνεπώς απαιτήθηκε σημαντική ανύψωση του φορέα κατά περίπου 20cm για την τοποθέτηση των τελικών εφεδράνων σεισμικής μόνωσης. Η ανύψωση έγινε κατά φάσεις του ενός ανοίγματος πριν την κατασκευή των πλακών συνέχειας και της σύνδεσης μεταξύ των ανοιγμάτων που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

3.2 Σύνδεση κλάδων και ανοιγμάτων φορέα

Η ευκαμψία που εισάγεται από το σύστημα σεισμικής μόνωσης δημιουργεί την απαίτηση σύνδεσης των ανεξάρτητων κλάδων μεταξύ τους έτσι ώστε να έχουν ενιαία σεισμική μετακίνηση και να αποφευχθεί η μεταξύ τους πρόσκρουση. Για τον ίδιο λόγο απαιτείται η σύνδεση των τριών ανεξάρτητων μεταξύ τους ανοιγμάτων με πλάκες συνέχειας. Με τον τρόπο αυτό ο συνολικός φορέας της ανωδομής συμπεριφέρεται ως ενιαίο στερεό σώμα πάνω από το σύστημα σεισμικής μόνωσης.

Μεταξύ των ανεξάρτητων αμφιέρειστων ανοιγμάτων κατασκευάστηκαν επιτόπου χυτές πλάκες συνέχειας πάχους περίπου 0.30m. Στις θέσεις όπου κατασκευάζονται οι πλάκες συνέχειας καταργούνται οι υφιστάμενοι αρμοί οπότε δεν απαιτούνται νέοι αρμοί διαστολής. Οι δύο ανεξάρτητοι κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους με λωρίδες συνέχειας πάχους 0.20m, πλάτους 0.50m που κατασκευάζονται ανά 2.0m από οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 (Σχ. 9).

3.3 Αρμοί διαστολής

Οι υφιστάμενοι αρμοί στα άκρα της γέφυρας αντικαθίσταται με νέους αρμούς συστολής-διαστολής στα άκρα του τεχνικού με ικανότητα μετακίνησης που καλύπτει την απαίτηση μετακίνησης του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Για τον ίδιο λόγο κατασκευάζεται νέο θωράκιο στις θέσεις των ακροβάθρων το οποίο εξασφαλίζει διάκενο 0.45m μεταξύ φορέα και θωρακίου.



Σχ. 9 – Σύνδεση των κλάδων του φορέα με λωρίδες σύνδεσης πλάτους 0.50m ανά 2m (φωτογραφία πριν την κατασκευή τους, κάτοψη των λωρίδων στο ένθετο σχήμα).

4 Μείωση ωθήσεων στα ακρόβαθρα με χρήση ελαφρού επιχώματος EPS

Η κύρια απαίτηση στον κορμό και στην θεμελίωση των ακροβάθρων προκύπτει από τις σεισμικές ωθήσεις γαιών οι οποίες δεν επηρεάζονται από την σεισμική μόνωση. Επιπλέον το μεγάλο βάθος θεμελίωσης των ακροβάθρων της γέφυρας, περίπου 10m εντός της κοίτης του ποταμού, καθιστά απαγορευτική οποιαδήποτε επέμβαση με στόχο την αύξηση της αντοχής της βάσης των ακροβάθρων και της θεμελίωσης τους. Για τον λόγο αυτό προτιμάται αντί της αύξησης της αντοχής η μείωση των ωθήσεων γαιών μέσω αντικατάστασης μέρους του επιχώματος από ελαφρύ επίχωμα από Διογκωμένη Πολυστερίνη (Expanded Polystyrene, EPS) (Σχ. 10).

Η διογκωμένη πολυστερίνη έχει πολύ μικρό βάρος της τάξης των 30kg/m³ και δημιουργεί αμελητέες σεισμικές ωθήσεις στα ακρόβαθρα της γέφυρας. Λόγω των υπερκείμενων μόνιμων και κινητών φορτίων το υλικό του EPS παρουσιάζει χαμηλό συντελεστή ωθήσεων της τάξης του 0.1. Ταυτόχρονα

το EPS διαθέτει υψηλή αντοχή σε κατακόρυφα φορτία κυκλοφορίας. Μέρος του επιχώματος σε μήκος περίπου 8m και βάθος 5m αντικαταστάθηκε με διογκωμένη πολυστερίνη τύπου EPS150 με ονομαστική αντοχή σε παραμόρφωση 10% $\sigma_{10\%}=150\text{kPa}$ σύμφωνα με το EN14933.

Τα τεμάχια του EPS έχουν διαστάσεις της τάξεως του 2m x 1m x 1m και τοποθετούνται κατά στρώσεις με εναλλάξ προσανατολισμό της μεγάλης διάστασης κατά μήκος και κατά πλάτος του άξονα της οδού για την αποφυγή αρμών στην ίδια θέση όπως φαίνεται στο Σχ. 10. Πάνω από το υλικό του EPS κατασκευάζεται πλάκα προστασίας από οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25 πάχους 30cm πάνω στην οποία γίνεται η οδοστρωσία.

Το υλικό EPS διαβρώνεται έντονα από οργανικούς διαλύτες όπως η βενζίνη. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η προστασία του μέσω ειδικής προστατευτικής μεμβράνης που περικλείει το υλικό.

Η κατασκευή του ελαφρού επιχώματος έγινε ανεξάρτητα για κάθε κλάδο με την χρήση μεταλλικών πασσαλοσανίδων για την προσωρινή αντιστήριξη του επιχώματος του διπλανού κλάδου όταν αυτός κυκλοφορείται.



Σχ. 10 - Αντικατάσταση επιχώματος πίσω από τα ακρόβαθρα με ελαφρύ επίχωμα EPS. Η κατασκευή πραγματοποιείται ανεξάρτητα για κάθε κλάδο με χρήση αντιστήριξης μεταλλικών πασσαλοσανίδων.

5 Ανάλυση και διαστασιολόγηση

5.1 Προσομοιώματα

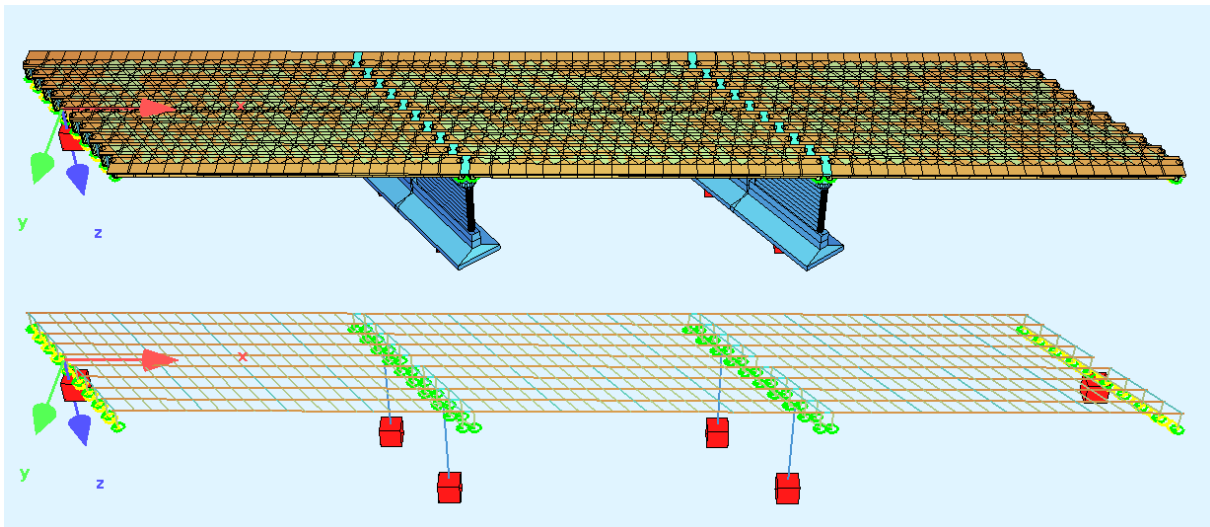
Η ανάλυση και διαστασιολόγηση του φορέα της ανωδομής, των μεσοβάθρων, των ακροβάθρων και της θεμελίωσης τους γίνεται με κατάλληλα χωρικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία αποδίδουν με ικανοποιητική προσέγγιση την κατανομή των δυσκαμμιών, των μαζών και των συνθηκών στήριξης.

Η ανωδομή (κατάστρωμα και βάθρα) κάθε κλάδου προσομοιώνεται με γραμμικά στοιχεία δοκού. Ο φορέας της ανωδομής (επιτόπου χυτές δοκοί, πλάκα και διαδοκίδες) προσομοιώνεται μέσω συστήματος εσχάρας δοκών. Προσομοιώνονται και οι δύο κλάδοι του καταστρώματος καθώς και η σύνδεση μεταξύ τους. Τα μεσόβαθρα προσομοιώνονται με κατακόρυφα στοιχεία δοκού τα οποία πακτώνονται στην βάση τους. Κατά την ανάλυση λαμβάνονται υπόψη αναλυτικά οι φάσεις εργασιών. Η απόκριση των εφεδράνων σεισμικής μόνωσης προσομοιώνεται μέσω κατάλληλων ελατηρίων τα οποία αντιστοιχούν στην ενεργό δυσκαμψία των εφεδράνων για τις ιδιότητες σχεδιασμού Κάτω Ορίου και Άνω Ορίου.

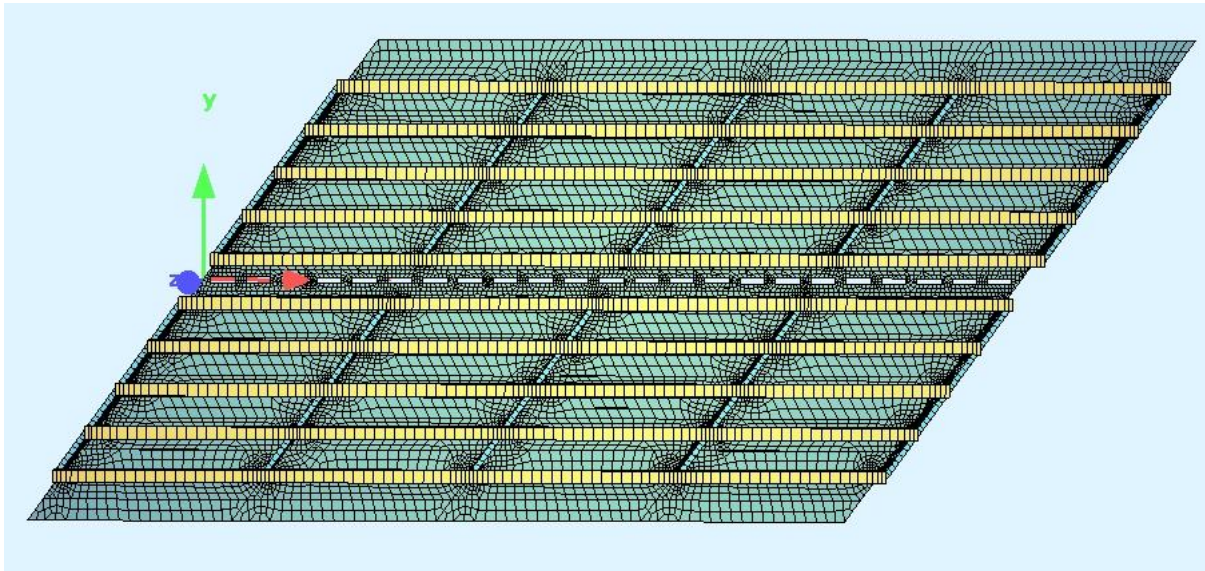
Για την ανάλυση της εγκάρσιας κάμψης του φορέα χρησιμοποιείται πιο ακριβές προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο εξετάζει ένα άνοιγμα του φορέα. Η πλάκα του καταστρώματος και οι δοκοί προσομοιώνονται με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Η προσομοίωση αυτή λαμβάνει υπόψη την επίδραση της εγκάρσιας κάμψης τόσο στην πλάκα καταστρώματος τόσο και στους κορμούς των δοκών. Η σύνδεση των δύο κλάδων του καταστρώματος προσομοιώνεται με κατάλληλες λωρίδες επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων οι οποίες ακολουθούν την πραγματική γεωμετρία.

Τα ακρόβαθρα αναλύονται με ανεξάρτητα προσομοιώματα όπου εισάγονται ως φορτίσεις οι αντιδράσεις της ανωδομής. Ο κορμός και το πέδιλο της θεμελίωσης του ακροβάθρου προσομοιώνονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Η στήριξη των πεδίων των ακροβάθρων επί του εδάφους προσομοιώθηκε με ελαστική έδραση σε κατακόρυφα ελατήρια που αντιστοιχούν σε δείκτη εδάφους σύμφωνα με της ιδιότητες της στρωματογραφίας όπως προκύπτουν από την γεωτεχνική αξιολόγηση.

Για την στατική ανάλυση χρησιμοποιείται το πρόγραμμα SOFiSTiK. Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και την διαστασιολόγηση παρουσιάζονται στα Σχ. 11 ως Σχ. 13



Σχ. 11 - Προσομοίωμα εσχάρας δοκών για τον φορέα και τα μεσόβαθρα



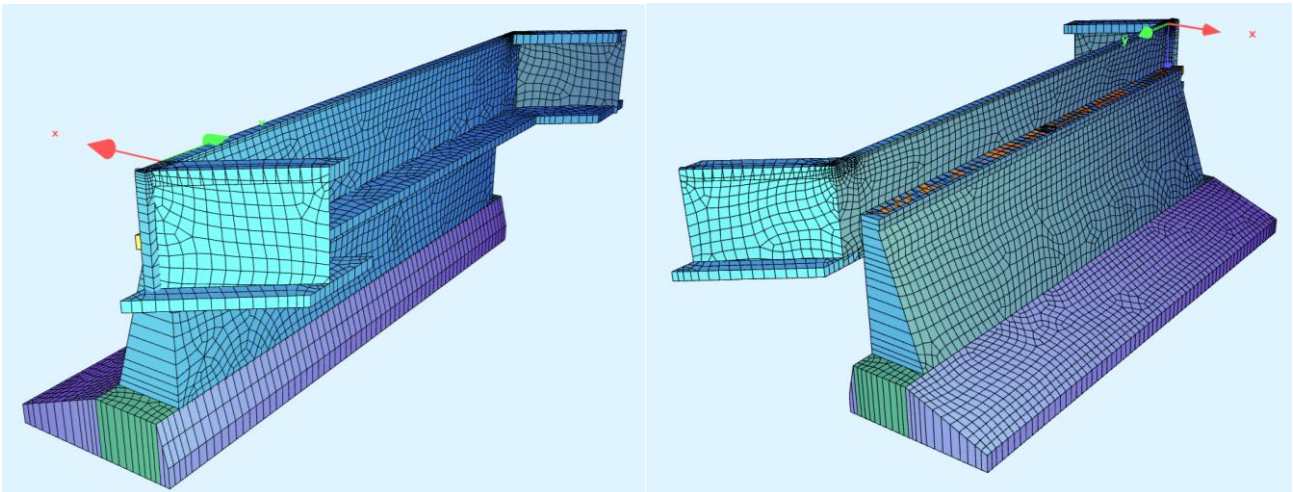
Σχ. 12 - Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την εγκάρσια κάμψη του φορέα

5.2 Μέθοδος ανάλυσης

Η σεισμική ανάλυση της ανωδομής (κατάστρωμα και βάθρα) πραγματοποιείται στο παραπάνω προσομοίωμα σύμφωνα την μέθοδο της δυναμικής φασματικής ανάλυσης με χρήση του φάσματος σχεδιασμού που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 8 (EN1998-1 και EN1998-2). Η επίδραση της αυξημένης απόσβεσης του συστήματος σεισμικής μόνωσης λαμβάνεται υπόψη με τροποποίηση του φάσματος σχεδιασμού για περιόδους μεγαλύτερες από $0.8T_{\text{eff}}$ όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.5.5 του EN1998-2, όπου T_{eff} η ενεργός περίοδος του συστήματος σεισμικής μόνωσης στην εξεταζόμενη διεύθυνση. Οι κύριες ιδιομορφές του συστήματος λόγω της επίδρασης της σεισμικής μόνωσης είναι της τάξης των 2.3s όπως φαίνεται στο Σχ. 14. Επισημαίνεται ότι για τα εφόδρανα εκκρεμούς τριβής η οριζόντια δύναμη είναι γενικά ανάλογη του εφαρμοζόμενου κατακόρυφου φορτίου. Κατά συνέπεια το κέντρο βάρους του φορέα βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο ελαστικής στροφής του συστήματος σεισμικής μόνωσης. Αυτό συνεπάγεται ότι η στρεπτική ιδιομορφή όπως φαίνεται στο Σχ. 14 διεγείρεται ελάχιστα.

Ο συντελεστής μετελαστικής συμπεριφοράς λαμβάνεται ίσος με $q=1.5$ για τα μεσόβαθρα και $q=1$ για τον φορέα, τα ακρόβαθρα και την θεμελίωση σύμφωνα με την παράγραφο 7.6.3 του EN1998-2. Η ανάλυση για σεισμικές φορτίσεις γίνεται γενικά με τη πλήρη δυσκαμψία των στοιχείων (δυσκαμψία σταδίου I). Εκτός από την μάζα της γέφυρας λαμβάνεται υπόψη πρόσθετη μάζα που αντιστοιχεί στο 20% του ομοιόμορφου φορτίου κυκλοφορίας.

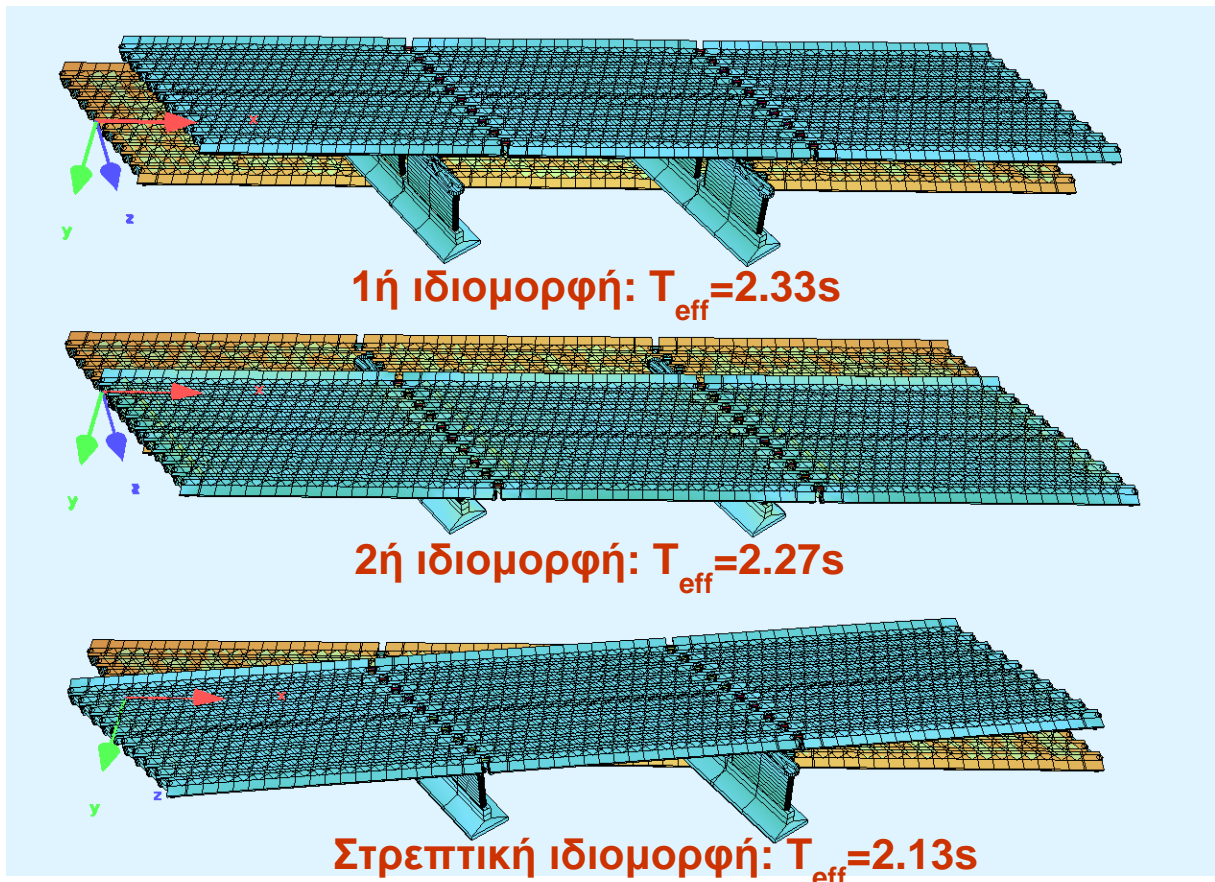
Στην μέθοδο φασματικής ενίσχυσης εξετάζονται όλες οι ιδιομορφές που έχουν σημαντική συμμετοχή στην συνολική απόκριση. Η επαλληλία των επιπονήσεων και των μετακινήσεων των ιδιομορφών γίνεται με εφαρμογή της μεθόδου πλήρους τετραγωνικής επαλληλίας (CQC). Για την σεισμική ανάλυση των ακροβάθρων χρησιμοποιούνται οι αντιδράσεις της ανωδομής που αντιστοιχούν στον σεισμικό συνδυασμό καθώς και η αδράνεια των αντίστοιχων στοιχείων των ακροβάθρων.



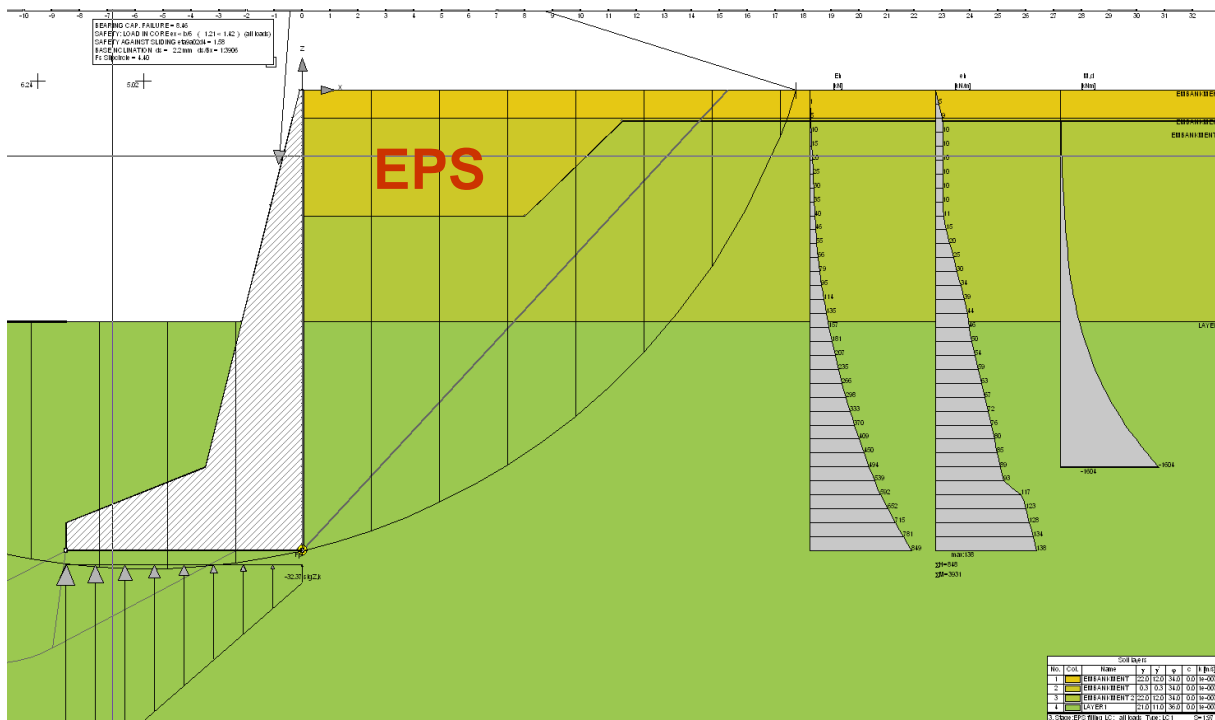
Σχ. 13 - Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για τα ακρόβαθρα

5.3 Ωθήσεις γαιών πίσω από τα ακρόβαθρα

Λαμβάνονται οριζόντιες ωθήσεις ηρεμίας με ειδικό βάρος εδάφους $\gamma=22\text{kN/m}^3$. Ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας λαμβάνεται ως $k_0=1-\sin(\varphi)=0.4408$ όπου $\varphi=34^\circ$ η δυσμενέστερη γωνία εσωτερικής τριβής του υφιστάμενου επιχώματος πίσω από το ακρόβαθρο. Η επίδραση της αντικατάστασης μέρους του επιχώματος με την πρακτικά αβαρή διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) λαμβάνεται υπόψη μέσω ειδικής ανάλυσης της στρωματογραφίας εδάφους με την μέθοδο δοκιμαστικών πρισμάτων cullmann χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FIDES. Η επίδραση του πρακτικά αβαρούς EPS λαμβάνεται υπόψη με υλικό χαμηλού ειδικού βάρους το οποίο μειώνει τις ωθήσεις όταν βρίσκεται εντός του σχηματιζόμενου ενεργητικού πρίσματος. Το προφίλ των αναπτυσσόμενων ωθήσεων γαιών πίσω από το ακρόβαθρο εικονίζεται στο Σχ. 15.



Σχ. 14 - Κύριες ιδιομορφές συστήματος



Σχ. 15 - Εκτίμηση της επίδρασης του ελαφρού επιχώματος EPS στην μείωση των σεισμικών ωθήσεων πίσω από τα ακρόβαθρα.

6 Συμπεράσματα

Για πρώτη φορά στην Ελλάδα μελετάται και κατασκευάζεται αναβάθμιση μεγάλου τεχνικού για να καλύψει απαιτήσεις από αυξημένα σεισμικά φορτία και φορτία λειτουργίας. Η βελτιστοποίηση της επέμβασης για ικανοποίηση όλων των συμβατικών απαιτήσεων με προτάσεις εφαρμογής κατά κύριο λόγο από το εγχώριο δυναμικό απετέλεσε πρόκληση για την μελέτη του έργου.

Συντελεστές Έργου – Ευχαριστίες

Η στατική μελέτη του έργου εκπονήθηκε από την μελετητική εταιρεία DENCO (DENCO Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. & DENCO Στατικές Μελέτες Ι.Κ.Ε.). Ο έλεγχος της μελέτης έγινε από τον Ανεξάρτητο Μηχανικό του Έργου SETEC TPI/SALFO SA (κ.κ. Α. Κοντιζάς, Ι. Πολυζωγόπουλος, Ο. Φιλίππα, Ν. Κοκολιός, V. Meyer). Η κατασκευή του έργου εκτελείται από την ΑΚΤΩΡ Α.Ε υπό τη διεύθυνση του κ. Α. Τσάκαλη. Από την πλευρά των συγγραφέων του άρθρου εκφράζονται οι θερμότερες ευχαριστίες προς όλους τους συντελεστές του έργου.

Βιβλιογραφία

prEN 14933:2006: Thermal insulation and light weight fill products for civil engineering applications – Factory made products of expanded polystyrene (EPS) – Specification

EN 1998-1:2004: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings

EN 1998-2:2005+A2009: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges