

# Μείωση των Σεισμικών Καταπονήσεων και Μετακινήσεων των Γεφυρών Μέσω της Αξιοποίησης των Ακροβάθρων ως Σεισμικών Ανασχετήρων

## Reduction of Bridge Seismic Demand with the use of Abutments as Seismic Stoppers

Όλγα ΜΑΡΚΟΓΙΑΝΝΑΚΗ<sup>1</sup>, Σεβαστή Δ. ΤΕΓΟΥ<sup>2</sup>, Ιωάννης Α. ΤΕΓΟΣ<sup>3</sup>,

*Λέξεις κλειδιά: γέφυρα, ακρόβαθρο, αντισεισμικότητα,*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα μείωσης των σεισμικών μετακινήσεων των γεφυρών μέσω της αξιοποίησης των ακροβάθρων ως τόπο εγκατάστασης σεισμικών ανασχετήρων. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω της επέκτασης της πλάκας του καταστρώματος και τη μονολιθική σύνδεση της με υποστυλώματα συμπαγούς κυκλικής διατομής, τα οποία βρίσκονται μεταξύ του ακροβάθρου και των περυγοτοιχών της γέφυρας και είναι πακτωμένα στον κεφαλόδεσμο και στην προέκταση της πλάκας καταστρώματος. Ως γέφυρα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε γέφυρα της Εγνατίας Οδού, όπου εκτελέστηκαν δυναμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας στην αρχική και την τροποποιημένη γέφυρα. Η διερεύνηση έδειξε ότι το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει, πλην της πλήρους απαλλαγής από τα εφέδρανα, σημαντική μείωση σεισμικών μετακινήσεων του καταστρώματος και συνεπώς μείωση του πλάτους των ακραίων αρμών, καθώς και κατ' επέκταση μείωση της σεισμικής καταπόνησης των μεσοβάθρων και των θεμελίων τους. Η μείωση της καταπόνησης των ανωτέρω στοιχείων οδηγεί σε αντίστοιχες μειώσεις του κόστους κατασκευής και συντήρησης των γεφυρών.

**ABSTRACT :** In the present paper the reduction of bridge seismic movements is investigated with the use of abutments as the place to install seismic stoppers. This goal is achieved with the extension of the concrete deck towards the embankments and the monolithic connection of the deck with a system of circular columns, that are placed in the area between the wingwalls and are based on the abutment pile cap. For the analysis a bridge of Egnatia Highway was used as benchmark and non-linear time-history analyses were conducted. The investigation showed that the proposed system results in large reductions in the

<sup>1</sup> Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., MSc., email: [markogiannaki.olga@gmail.com](mailto:markogiannaki.olga@gmail.com)

<sup>2</sup> Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., MSc., email: [stegou@civil.auth.gr](mailto:stegou@civil.auth.gr)

<sup>3</sup> Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: [itegos@metesysm.gr](mailto:itegos@metesysm.gr)

seismic deck displacements and the seismic demand on piers. This reduction corresponds to a respective reduction in the construction cost of the bridge.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι σύνηθες στην Γεφυροποιία να απομονώνεται το σύστημα φορέας-μεσόβαθρα από το ακρόβαθρο και το επίχωμα, με τη χρησιμοποίηση εφεδράνων εδράσεως στις ακραίες στηρίξεις του φορέα και οπωσδήποτε αρμών διαχωρισμού ακροβάθρων - φορέα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η αντιμετώπιση των εκ των συστολοδιαστολών καταναγκασμών κυρίως στις γέφυρες μεγάλου μήκους. Ωστόσο, μ' αυτόν τον τρόπο, η γεφυροποιία φαίνεται να παραιτείται από την ενδεχόμενη δυνατότητα συμβολής των ακροβάθρων και του επίχωματος στην μείωση των διαμήκων σεισμικών μετακινήσεων, μέσω της αξιοποίησης των εγκιβωτιστικών δυνατοτήτων του συστήματος ακρόβαθρο – μεταβατικό επίχωμα. (Τεγος, Τεγου, & Μητούλης, 2009).

Ο περιορισμός των σεισμικών μετακινήσεων επιδιώκεται κυρίως μέσω της τοποθέτησής ανασχετήρων στις στέψεις των μεσοβάθρων και των ακροβάθρων. Στον Ευρωκώδικα 8, (CEN[Comité Européen de Normalisation], 2003) δίνεται ιδιαίτερη μεθοδολογία υπολογισμού η οποία αξιοποιεί αυτά τα εξαρτήματα στις αντισεισμικές μελέτες των προκατ. γεφυρών, η οποία ωστόσο ελάχιστες φορές αξιοποιείται στις εφαρμογές. Η δυσκολία έγκειται στην παρουσία των λειτουργικών απαιτήσεων οι οποίες κατά κανόνα αντιμάχονται τις αντισεισμικές. Ένας μηχανισμός ανάσχεσης των σεισμικών μετακινήσεων για να είναι αποδεκτός θα πρέπει να είναι συμβατός με τη λειτουργική συμπεριφορά του φορέα η οποία περιλαμβάνει ανάγκες συστολοδιαστολών. Και στο σημείο αυτό εντοπίζεται η αποτυχία των προαναφερθέντων ανασχετήρων. Παρόλα αυτά, προσφάτως έχουν πραγματοποιηθεί προσπάθειες αξιοποίησης εναλλακτικών τύπων ανασχετήρων με ράβδους χάλυβα ή τένοντες χωρίς συνάφεια με το συνυπολογισμό της λειτουργικής και αντισεισμικής απόκρισης και αξιοσημείωτα αποτελέσματα στη μείωση των σεισμικών μετακινήσεων. (Ο. G. Markogiannaki & Tegos, 2013; Ο. Markogiannaki, Tegos, & Vasileiou, 2014)

Τις τελευταίες δεκαετιές διεθνώς αποκτά συνεχώς μεγαλύτερη επικαιρότητα η προσπάθεια εμπλοκής στο σεισμό των ακροβάθρων και των μεταβατικών επίχωμάτων. Οι Kotsoglou και Pantazopoulou (2007) αναφέρονται ακριβώς στην ενεργοποίηση και αξιοποίηση των μεταβατικών επίχωμάτων. Η συμμετοχή των δύο αυτών στοιχείων στην απόκριση του σεισμικού πλήγματος είναι δυνατόν να μειώσει σημαντικά τις μετακινήσεις του καταστρώματος, (Mylonakis et al., 1999), (Zhang, Makris, 2001), (Zhang, Makris, 2002) και κατ' επέκταση και το αντισεισμικό κατασκευαστικό κόστος των γεφυρών, (Nutt, Mayes, 2000), καθώς και το κόστος συντηρήσεώς τους. Ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία, διεξάγεται εκτεταμένη έρευνα με κύριο στόχο μία αποτελεσματική μείωση των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού διά της εμπλοκής των ακροβάθρων και των μεταβατικών επίχωμάτων. Στη Διατριβή του Σ. Μητούλη (2007) ερευνήθηκαν τρόποι παρεμπόδισης της ελεύθερης ταλάντωσης των φορέων μέσω της εμπλοκής του

επιχώματος το οποίο αξιοποιείται, είτε ως αποδέκτης κρουστικών σεισμικών δράσεων του φορέα προς αυτό, είτε ως άμεσα συνδεδεμένο με τον φορέα της γέφυρας κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρξει βελτίωση του αποτελέσματος. Παράλληλα με την αξιοποίηση των μεταβατικών επιχωμάτων η προσοχή στρέφεται και στην κατάλληλη διαμόρφωση καινοτόμων ακροβάθρων τα οποία διαθέτουν ιδιότητες σεισμικών ανασχετήρων αφενός και, λειτουργική ευελιξία αφετέρου. (Τεγος et al., 2009).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αξιοποιούνται τα ακρόβαθρα ως τόπος εγκαταστάσεως σεισμικών ανασχετήρων. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω της επέκτασης της πλάκας του καταστρώματος προς τα μεταβατικά επιχώματα και τη μονολιθική σύνδεση αυτής με υποστυλώματα συμπαγούς κυκλικής διατομής εν επαφή, τα οποία βρίσκονται μεταξύ του των πτερυγοτοιχών της γέφυρας και είναι πακτωμένα αφενός στον κεφαλόδεσμο και αφετέρου στο άκρο του φορέα τον οποίο στηρίζουν, καθώς και σε προέκταση της κάτω πλάκας του κιβωτίου καταστρώματος. Μέσω του συστήματος επιτυγχάνεται σημαντική ανακούφιση των σεισμικώς ενεργών μελών του συστήματος της γέφυρας όπως είναι τα μεσόβαθρα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι οικονομική και αξιόπιστη και προτείνεται ως συμπληρωματική των συμβατικών αντισεισμικών προβλέψεων.

## **ΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟ**

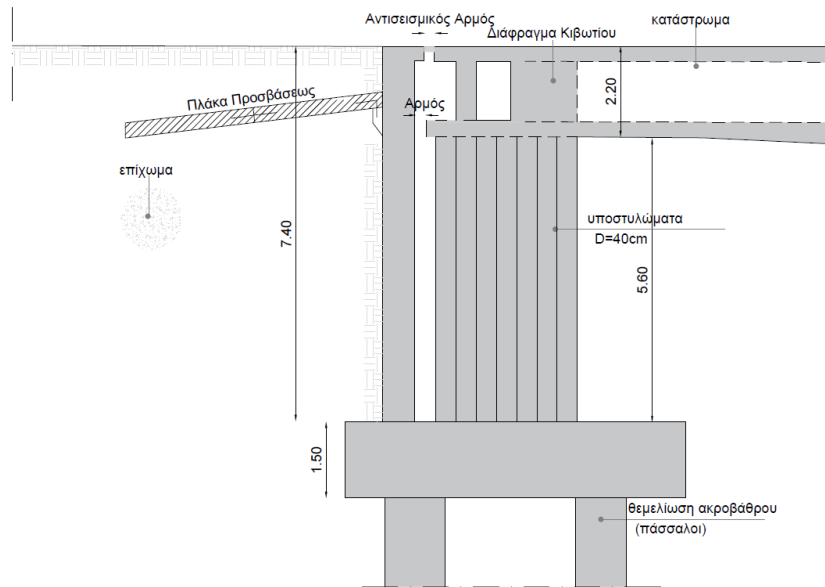
### **Γενικά**

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η αντισεισμική αποδοτικότητα ενός νέου αντισεισμικού ακροβάθρου, Σχήμα 1, συνδεδεμένου με υποστυλώματα συμπαγούς κυκλικής διατομής με το κατάστρωμα, ένα σύστημα «Στύλων – Ανασχετήρων». Τα υποστυλώματα αυτά, υποκαθιστούν τα εφέδρανα και συνδέονται μονολιθικώς με το κατάστρωμα της γέφυρας με επέκταση, προς την περιοχή του επιχώματος, της πλάκας του καταστρώματος. Τα υποστυλώματα βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, Η θέση τους είναι μεταξύ του ακροβάθρου και των πτερυγοτοιχών της γέφυρας και είναι πακτωμένα αφενός στον κεφαλόδεσμο και αφετέρου σε προέκταση της πλάκας καταστρώματος. Οι ασκούμενες στα τοιχώματα του κιβωτίου ωθήσεις των γαιών επηρεάζουν την ευστάθεια του θεωρούμενου ακλόνητου ακροβάθρου και όχι τη σεισμική απόκριση του συστήματος. Σημειώνεται ότι το προτεινόμενο σύστημα υποστυλωμάτων παρουσιάζει υψηλή ευκολία κατασκευασιμότητας με την αξιοποίηση έτοιμων φθηνών χαρτοτύπων του εμπορίου για τη διαδικασία σκυροδέτησης και τη δυνατότητα παραγγελίας έτοιμων «μανδύων», κορμού εγκάρσιων οπλισμών.

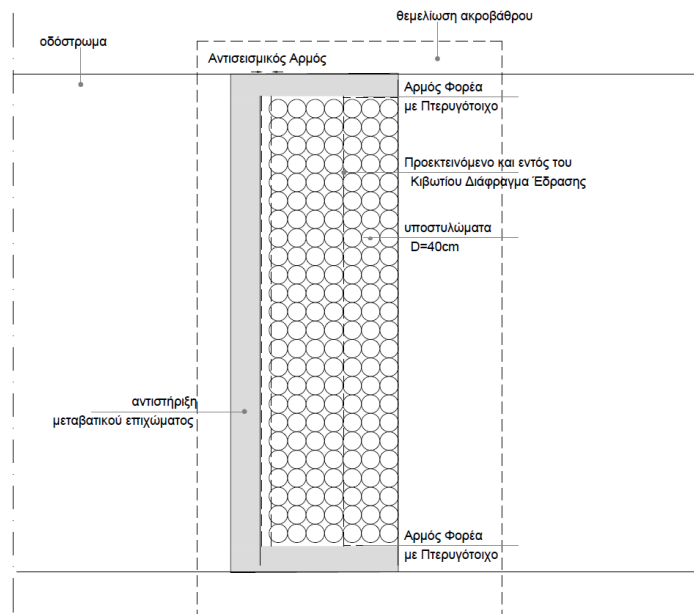
### **Υποστυλώματα**

Είναι φανερό ότι το προτεινόμενο σύστημα έχει αντικρουόμενες απαιτήσεις έναντι της λειτουργικότητας και της σεισμικότητας. Η μεν λειτουργικότητα απαιτεί εύκαμπτα υποστυλώματα, η δε αντισεισμικότητα δύσκαμπτα, προς τιθάσευση των σεισμικών μετακινήσεων του φορέα. Λαμβάνοντας υπόψη τον ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο των υποστυλωμάτων στην απόκριση του συστήματος, η

επιλογή του αριθμού, των διαστάσεων και της οπλίσεως των υποστυλωμάτων του προτεινόμενου αντισεισμικού ακροβάθρου αποτέλεσαν αντικείμενο εκτεταμένης διερευνήσεως.



(α)



(β)

**Σχήμα 1.** Το προτεινόμενο αντισεισμικό ακρόβαθρο (α) κατά μήκος τομή και (β) κάτοψη. (Σημείωση: Οι επί των σχεδίων σημειούμενες διαστάσεις αφορούν στη γέφυρα του Παραδείγματος)

Ξεκινώντας τη διαδικασία βελτιστοποίησης της αποδοτικότητας του προτεινόμενου συστήματος από τις διαστάσεις των υποστυλωμάτων, βρέθηκε ότι ένας ικανοποιητικός συμβιβασμός των απαιτήσεων λειτουργικότητας και της αντισεισμικότητας είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την επιλογή διαμέτρου 30cm ή 40cm αναλόγως και του διαθέσιμου ύψους του ακροβάθρου. Για ύψη μικρότερα των  $h_w=4,5m$  αντιστοιχεί διάμετρος 30cm και για ύψη μεγαλύτερα 40cm. Η επιλογή της διαμέτρου γίνεται μέσω της διαδικασίας περιορισμού του εύρους της λειτουργικής ρηγματώσεως τους σε αποδεκτά επίπεδα, σύμφωνα με τους Tegos et al. (2011) για την περίπτωση της μέγιστης συστολής του καταστρώματος λόγω της ομοιόμορφης θερμοκρασιακής μεταβολής, του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης. Η επιλογή της όπλισης των στύλων θα πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο της οικονομίας όχι μόνο με την ελαχιστοποίηση του αριθμού τους αλλά και με την οικονομική επιλογή του διαμήκους οπλισμού. Με βάση τους Χρυσανίδης, Πανοσκάλτσης, Ψάρρας, & Τέγος, (2016) προκύπτει ότι για τιμές μονάδας σκυροδέματος 100€/m<sup>3</sup> και χάλυβα 0.75€/kg το οικονομικότερο ποσοστό διαμήκους οπλισμού είναι το ελάχιστο επιτρεπόμενο 1%.

Η επιλογή του αριθμού των υποστυλωμάτων ανά ακρόβαθρο καθορίζεται, αφενός μεν από την επιδιωκόμενη αντισεισμική αποδοτικότητα του συστήματος μέσω της μείωσης των σεισμικών μετακινήσεων του καταστρώματος διά της δυσκαμψίας τους και της απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας και αφετέρου, από τη γεωμετρία του συστήματος καταστρώματος ακροβάθρου, καθώς τα υποστυλώματα εκτείνονται σε όλο το μήκος μεταξύ των πτερυγοτοίχων και σε πλάτος από τον άξονα του καταστρώματος έως τον τοίχο αντιστήριξης του ακροβάθρου.

### **Θεμελίωση**

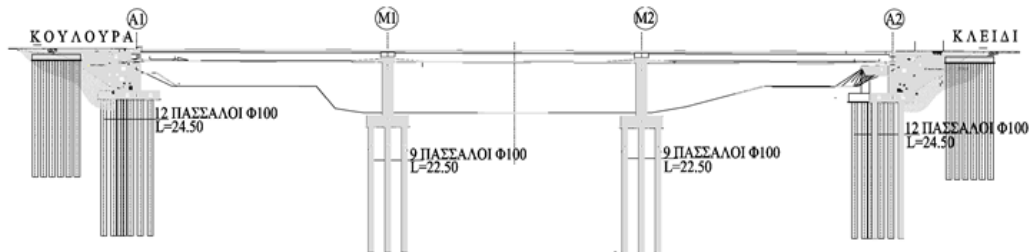
Ο πόδας των υποστυλωμάτων συνδέεται μονολιθικά με την ακλόνητη, επιφανειακή ή βαθειά, θεμελίωση του ακροβάθρου. Η στερεή και ακλόνητη θεμελίωση του προτεινόμενου αντισεισμικού ακροβάθρου διασφαλίζει την εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στον πόδα των υποστυλωμάτων. Η επιλογή του είδους της θεμελίωσης του ακροβάθρου στηρίζεται αφενός μεν στον τύπο του εδάφους και αφετέρου, στο μέγεθος και στο είδος των μεταβιβαζόμενων, στο ακρόβαθρο, δράσεων.

Σε περιπτώσεις εδάφους ικανοποιητικής αντοχής, είναι δυνατόν να επιλεγεί επιφανειακή θεμελίωση του ακροβάθρου. Σ' αυτήν την περίπτωση ο σχεδιασμός της θεμελίωσης ικανοποιεί τις ακόλουθες τρεις απαιτήσεις: (1) παρέχει επαρκή ασφάλεια έναντι ανατροπής και ολίσθησης, (2) εξασφαλίζει επαρκή φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης με επαρκή ασφάλεια έναντι οριακής αστοχίας και (3) οι ολικές ή οι διαφορικές καθιζήσεις βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων. Όταν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις σχεδιασμού των επιφανειακών θεμελιώσεων οδηγούν σε μεγάλες διαστάσεις του θεμελίου με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους κατασκευής του.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

### Προσομοίωση της Γέφυρας Αναφοράς

Η αποτίμηση της αποδοτικότητας του προτεινόμενου αντισεισμικού ακροβάθρου έγινε αξιοποιώντας μία γέφυρα της Εγνατίας Οδού η μελέτη της οποίας έχει πραγματοποιηθεί από το Μελετητή Μηχανικό Ι. Τέγο της εταιρείας ΜΕΤΕ – ΣΥΣΜ Α.Ε. Η γέφυρα αυτή δίνεται σε κατά μήκος τομή στο Σχήμα 2 και αξιοποιήθηκε ως γέφυρα- αναφοράς στην παρούσα έρευνα. Το συνολικό της μήκος είναι  $L=135,8\text{m}$  και αποτελείται από τρία ανοίγματα, δύο ακραία μήκους  $45,10\text{m}$  και το μεσαίο  $45,6\text{m}$ . Η διατομή του καταστρώματος είναι κιβωτιοειδής, ύψους  $2,2\text{m}$  και μέγιστου πλάτους  $13,5\text{m}$ . Η έδραση του καταστρώματος στα μεσόβαθρα, κυκλικής διαμέτρου  $2,0\text{m}$  είναι μονολιθική. Η θεμελίωση τους γίνεται σε ομάδα  $3 \times 3$  πασσάλων των οποίων η διάμετρος είναι  $1,0\text{m}$ . Στις θέσεις των ακροβάθρων, το κατάστρωμα εδράζεται επί ελαστομεταλλικών εφεδράνων.. Η γέφυρα είναι θεμελιωμένη σε έδαφος κατηγορίας Β και σε Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Ι ( $\alpha_g=0,16g$ ).

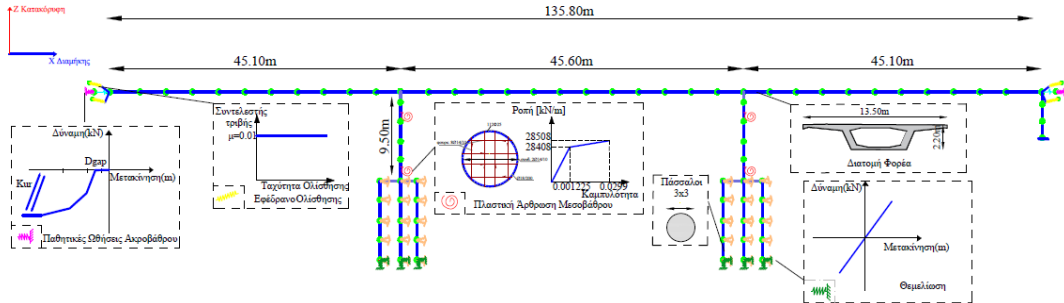


Σχήμα 2. Κατά μήκος τομή της γέφυρας - αναφοράς

Στην παρούσα έρευνα μελετάται παραμετρικώς η αποδοτικότητα του προτεινόμενου συστήματος περιορισμού των σεισμικών μετακινήσεων που περιγράφηκε παραπάνω και δίνεται στο Σχήμα 1.

Η προσομοίωση του καταστρώματος της γέφυρας – αναφοράς έγινε με στοιχεία δοκού με ιδιότητες διατομής αυτές του καταστρώματος, Σχήμα 2. Το προσομοίωμα της γέφυρας- αναφοράς δίνεται στο Σχήμα 3. Η ενεργός δυσκαμψία του προεντεταμένου καταστρώματος θεωρείται ίση με αυτή της αρηγμάτωτης διατομής. Η έδραση του καταστρώματος στα ακρόβαθρα γίνεται μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Η προσομοίωση της μεταφορικής και στροφικής δυσκαμψίας των εφεδράνων έγινε με χρήση κατάλληλων στοιχείων σύνδεσης (ZL elements) οι ιδιότητες των οποίων υπολογίστηκαν σύμφωνα με το προσομοίωμα των Naeim et al., (Naeim et al., 1999). Η προσομοίωση των μεσοβάθρων έγινε επίσης με στοιχεία δοκού. Η δυνατότητα σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στον πόδα και την κεφαλή των μεσοβάθρων λαμβάνεται υπόψη μέσω της θεώρησης μη γραμμικών στροφικών ελατηρίων στη βάση των στοιχείων αυτών. Η ενεργός δυσκαμψία των στοιχείων αυτών λαμβάνεται ίση με  $EI_{\text{eff}}=M_y/\varphi_y$ , όπου  $M_y$  είναι η ροπή διαρροής και  $\varphi_y$  η καμπυλότητα διαρροής, όπως έχουν προκύψει από την ανάλυση των διατομών με το πρόγραμμα AnySection, (Paranikolaou,

2015). Η ευκαμψία της θεμελίωσης των μεσοβάθρων λαμβάνεται υπόψη με χρήση των ελατηριακών σταθερών που προέβλεπε η μελέτη εφαρμογής.

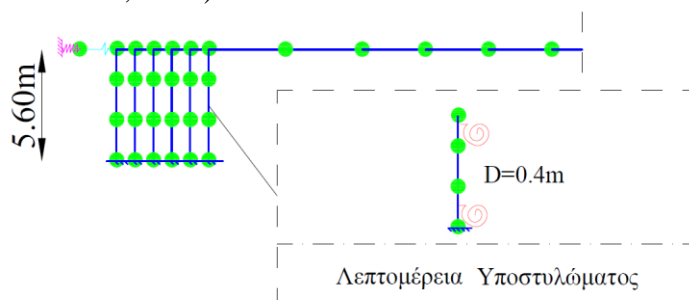


Σχήμα 3. Προσομοίωμα της γέφυρας – αναφοράς.

### Προσομοίωση της προτεινόμενης γέφυρας

Η προσομοίωση της τροποποιημένης, βάση της πρότασης της παρούσας, γέφυρας αξιοποίησε την προσομοίωση της γέφυρας – αναφοράς. Η λεπτομέρεια του προτεινόμενου ακροβάθρου δίνεται στο Σχήμα 4 σε τομή. Ο συνολικός κάρναβος των στύλων είναι 7x26. Η προσομοίωση των υποστυλωμάτων έγινε με γραμμικά στοιχεία. Η δυνατότητα σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στην κεφαλή και τον πόδα των υποστυλωμάτων λαμβάνεται υπόψη μέσω της θεώρησης συγκεντρωμένων σημειακών πλαστικών αρθρώσεων, Λεπτομέρεια στο Σχήμα 4, όπως προέκυψαν από την ανάλυση διατομής με το πρόγραμμα AnySection, (Paranikolaou, 2015) .

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα OpenSees, (F. McKenna, 2005). Τα προκύψαντα συστήματα γεφυρών θεωρήθηκε ότι διεγείρονται με σεισμικές επιταχύνσεις σχεδιασμού  $a_g=0,16g, 0,24g$ . Τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν, (7 ανά διεύθυνση σχεδιασμού), αντιστοιχούν στα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού κατηγορίας εδάφους B του Ευρωκώδικα 8, Μέρος 1, (Eurocode 8- Part 1, 2003).



Σχήμα 4. Λεπτομέρεια Προσομοίωσης της τροποποιημένης γέφυρας.

## Αποτελέσματα Αναλυτικής Διερεύνησης

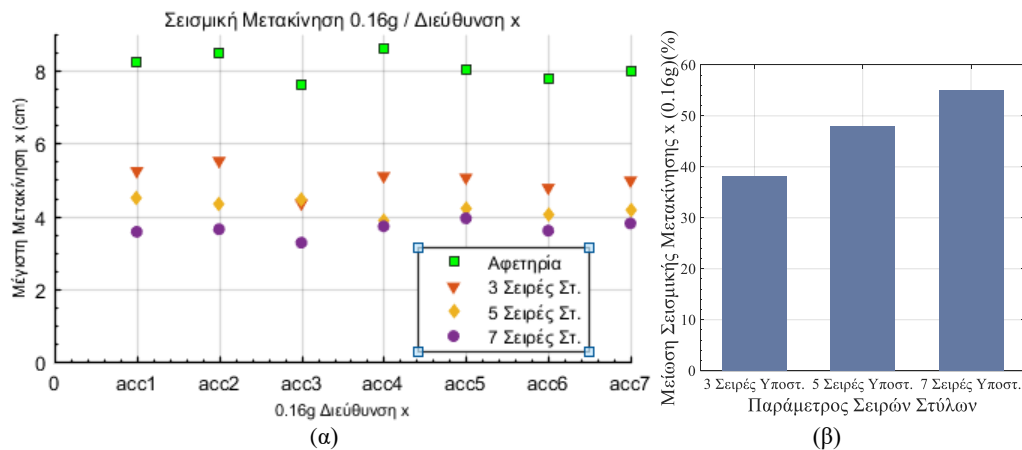
Η αποδοτικότητα της προτεινόμενης διάταξης των υποστρωμάτων ανασχέσεως του σεισμού αξιολογήθηκε με βάση την προκύπτουσα ποσοστιαία μείωση των μετακινήσεων του καταστρώματος και των μεγεθών έντασης και της καμπυλότητας των μεσοβάθρων κατά τον διαμήκη και τον εγκάρσιο σεισμό σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η μείωση των μεγεθών μεταξύ των προσομοιωμάτων της γέφυρας αναφοράς και της τροποποιημένης γέφυρας. Η διερεύνηση έγινε για τρεις διαφορετικές λύσεις αριθμού σειρών στύλων. Οι 3 σειρές που αποτελούν την ελάχιστη δυνατότητα στήριξης, οι 5 σειρές και οι 7 που αποτελούν τη μέγιστη δυνατότητα τοποθέτησης στύλων. Στα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αναλυτικής διερεύνησης για τις διαμήκεις και εγκάρσιες σεισμικές μετακινήσεις για 0.16g για την παράμετρο διαφορετικού αριθμού στύλων ανά ακρόβαθρο ύψους 5.60m τα οποία υποκαθιστούν τον κορμό του συμβατικού ακροβάθρου και συνδέονται μονολιθικά με το κατάστρωμα της γέφυρας. Το Σχήμα 5(α) δίνει τις τιμές των διαμήκων σεισμικών μετακινήσεων για τα 7 επιταχυνσιογραφήματα στο μέσο της γέφυρας και το Σχήμα 5(β) δίνει τις ποσοστιαίες μειώσεις της μέσης τιμής διαμήκων μετακινήσεων του καταστρώματος στη θέση αυτή. Αντίστοιχα στο Σχήμα 6 δίνονται οι εγκάρσιες μετακινήσεις. Από την παρατήρηση των προαναφερθέντων διαγραμμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη διάταξη των τοιχωμάτων μείωσης των σεισμικών μετακινήσεων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των μετακινήσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση έως και 50+% και κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε μικρότερο ποσοστό έως 10%. Παρατηρείται μάλιστα ότι για την περίπτωση των 3 σειρών στύλων υπάρχει και μια μικρή αύξηση των μετακινήσεων λόγω της απουσίας των εγκάρσιων stoppers της γέφυρας αναφοράς, η οποία όμως δεν είναι αποτρεπτική για τη χρήση και της λύσης αυτής.

Στο Σχήμα 7 δίνονται οι ποσοστιαίες μειώσεις των αναπτυσσόμενων καμπυλοτήτων στη βάση των μεσοβάθρων για τη γέφυρα συνολικού μήκους 135,6m, η οποία αξιοποιεί τον προτεινόμενο τύπο ακροβάθρου. Το Σχήμα 7(α) δίνει τις ποσοστιαίες μειώσεις για την περίπτωση του διαμήκους σεισμού σχεδιασμού, ενώ, το Σχήμα 7(β) δίνει τις ποσοστιαίες μειώσεις για την περίπτωση του εγκάρσιου σεισμού σχεδιασμού. Από την παρατήρηση των προαναφερθέντων διαγραμμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη διάταξη των στύλων-ανασχετήρων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των καμπυλοτήτων-ροπών στο διαμήκη σεισμό σε ποσοστό έως 60%, ενώ στην εγκάρσια παρατηρείται μια μικρή αύξηση για τις δύο λύσεις, η οποία όμως δεν είναι αποτρεπτική για τη χρήση τους καθώς οι τιμές των σεισμικών μεγεθών στη διαμήκη διεύθυνση είναι οι κρίσιμες. Επίσης από τις αναλύσεις παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι αναπτυσσόμενες καμπυλότητες δεν υπερέβησαν την καμπυλότητα διαρροής των μεσοβάθρων.

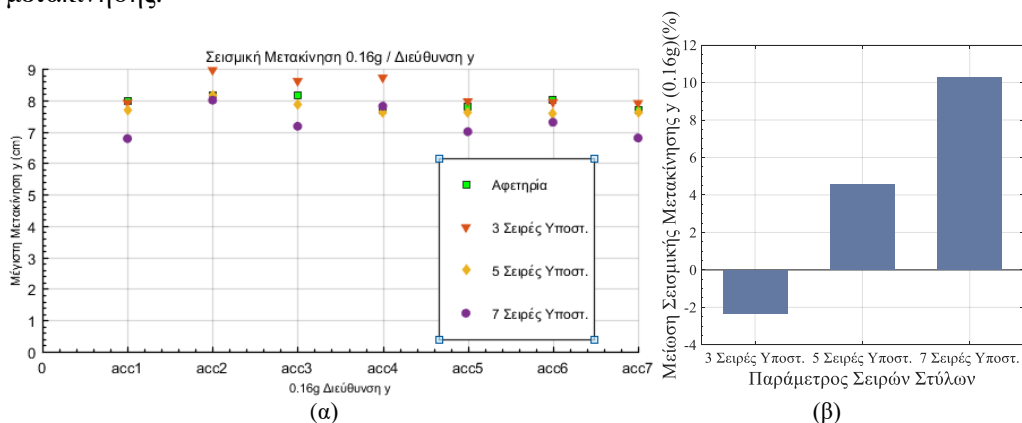
Αντίστοιχη διερεύνηση πραγματοποιήθηκε και για αυξημένο σεισμό σχεδιασμού σε 0.24g, όπου διαπιστώθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης των ίδιων χαρακτηριστικών της γέφυρας σε συνδυασμό με το προτεινόμενο σύστημα



Στύλων – Ανασχετήρων. Ενδεικτικά στο Σχήμα 8 δίνονται οι μειώσεις μετακινήσεων στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση.

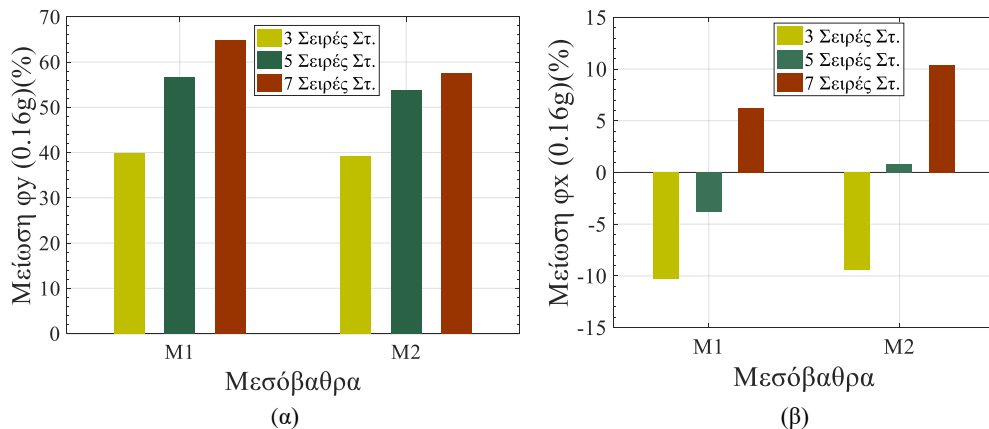


Σχήμα 5. Διαμήκεις μετακινήσεις στο μέσο του καταστρώματος 0.16g (α) Τιμές μέγιστων μετακινήσεων των επιταχυνσιογραφημάτων, (β) Μειώσεις Μέγιστης μετακίνησης.

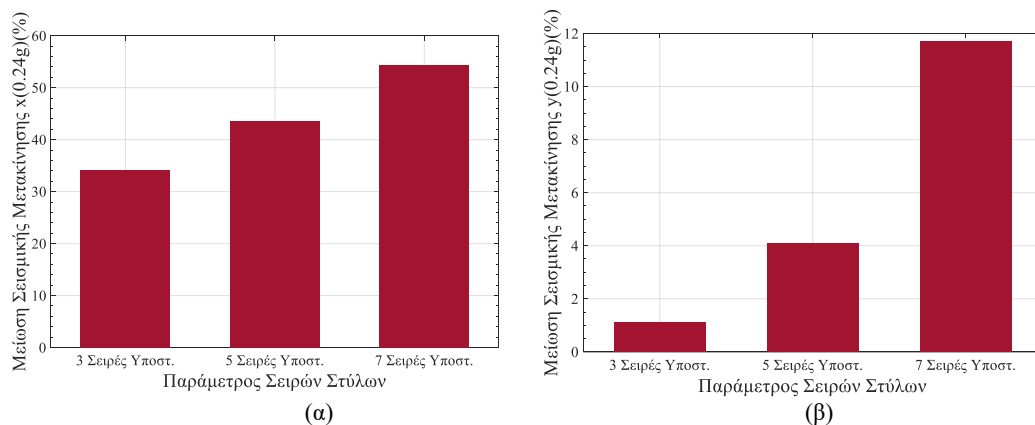


Σχήμα 6. Εγκάρσιες μετακινήσεις στο μέσο του καταστρώματος 0.16g (α) Τιμές μέγιστων μετακινήσεων των επιταχυνσιογραφημάτων, (β) Μειώσεις Μέγιστης μετακίνησης.

Στην περίπτωση που θα αντιμετωπιζόταν σε επίπεδο μελέτης η γέφυρα με βάση την προτεινόμενη αντισεισμική πρόβλεψη τίθεται το πρόβλημα της ορθολογικής χρησιμοποίησης της τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς  $q$ . Εκ πρώτης όψεως είναι επιτρεπτή η μέγιστη τιμή  $q=3.5$  καθόσον όλα τα εμπλεκόμενα στο σεισμό μέλη είναι πλαστικά. Ωστόσο στην περίπτωση που η διάταξη των στύλων-stoppers δεν επιτρέπει την επισκευσιμότητα μετά το σεισμό τότε είναι δυνατό να γίνει προσφυγή στο σχετικό άρθρο του EC8 που επιβάλλει στην περίπτωση αυτή τη μείωση της τιμής του  $q$  στο 60%.



**Σχήμα 7.** Ποσοστιαία μείωση καταπόνησης μεσοβάθρων για τη γέφυρα με μήκος  $L=135.5$ : (α) διαμήκης σεισμός (β) εγκάρσιος σεισμός ( $a_g=0.16g$ ).



**Σχήμα 8.** Μειώσεις Μέγιστης μετακίνησης (α) διαμήκεις μετακινήσεις (β) εγκάρσιες μετακινήσεις.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας νέος τύπος ακροβάθρου με αντισεισμικά χαρακτηριστικά. Ο προτεινόμενος τύπος ακροβάθρου αποτελείται από ένα σύστημα Στόλων-Ανασχετήρων εν επαφή που συνδέονται μονολιθικά με το κατάστρωμα της γέφυρας. Το προτεινόμενο σύστημα αποδίδει μείωση των σεισμικών μετακινήσεων του καταστρώματος και των εντατικών μεγεθών των μεσοβάθρων χωρίς επιδείνωση των λειτουργικών προβλημάτων. Η διερεύνηση της αποδοτικότητας του προτεινόμενου τύπου ακροβάθρου κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η κατασκευή του προτεινόμενου τύπου ακροβάθρου κρίνεται σχετικώς εύκολη και λογικού κατασκευαστικού κόστους συγκριτικώς με την προκύπτουσα οικονομία λόγω της διαθεσιμότητας έτοιμων χαρτοτύπων και κλωβών οπλισμού για τη σκυροδέτηση.

- Η προτεινόμενη αντισεισμική διάταξη είναι δυνατό να μειώσει τις διαμήκεις σεισμικές μετακινήσεις σε ποσοστά έως και 50% στην περίπτωση γεφυρών μέσου μήκους (περίπου 135m).
- Στην εγκάρσια διεύθυνση, η δέσμευση του καταστρώματος, που επιτυγχάνεται μέσω των στύλων, είναι δυνατό να αποδώσει μείωση των σεισμικών μετακινήσεων του καταστρώματος σε μικρότερα ποσοστά χωρίς εν γένει να επιβαρύνει τη γέφυρα της οποίας κρίσιμη διεύθυνση είναι η διαμήκης.
- Οι μειώσεις των σεισμικών μετακινήσεων του καταστρώματος οδηγούν σε ανάλογη αποφόρτιση των μεσοβάθρων και κατ' επέκταση των θεμελιώσεων τους. Το πλέον εντυπωσιακό συμπέρασμα είναι ότι με τις αναλύσεις ακόμη και με την ελάχιστη πρόβλεψη γραμμών στύλων δεν εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις για σεισμικότητα I, γεγονός που υποκαθιστά την απόκριση τύπου rocking, καθόσον το σύστημα διαθέτει ισχυρές δυνάμεις επαναφοράς στην προσεισμική του θέση.
- Παρέχεται η δυνατότητα ευελιξίας ανάλογα με τις σεισμικές απαιτήσεις καθώς ανάλογα με τις σειρές των στύλων που αξιοποιούνται αυξάνεται αντίστοιχα και η αποδοτικότητα του συστήματος.
- Η αύξηση της σεισμικής επιτάχυνσης σχεδιασμού δείχνει τη δυνατότητα αναβάθμισης της γέφυρας σε Σεισμικότητα II.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας ευχαριστούν θερμά τη μελετητική εταιρεία METE - ΣΥΣΜ Α.Ε. για την παραχώρηση της άδειας να χρησιμοποιηθεί η μελέτη γέφυρας της Εγνατίας Οδού.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

CEN [Comité Européen de Normalisation], “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions”, Final Draft prEN1991-1-5, (2003).

CEN [Comité Européen de Normalisation], “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”, (2003).

CEN [Comité Européen de Normalisation], “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 2: Bridges”, (2004).

CEN [Comité Européen de Normalisation], “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, January (2003).

CEN [Comité Européen de Normalisation], “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges”, (2003).

Computers and Structures Inc.SAP 2000 Nonlinear Version 9.0.3. “User’s Reference Manual”, Berkeley, California (2004).

Horvath J.S., “The compressible-inclusion function of EPS Geofom: Analysis and design methodologies”, Manhattan College Research Report No. CE/GE-98-2, New York, USA (1998).

F. McKenna, G. L. F. (2005). Open System for Earthquake Engineering Simulation Pacific Earthquake Engineering Research Center, Version 2.4.0.

Horvath J.S., "The compressible-inclusion function of EPS Geofoam: An overview of concepts, Applications and Products", Manhattan College Research Report No.CE/GE-98-1, New York, USA (1998).

Kappos, A.J., "Analytical Prediction of the Collapse Earthquake for R/C Buildings: Suggested Methodology", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, No. 2 (1991), 167-176.

Kotsoglou A., Pantazopoulou S., "Bridge-embankment interaction under transverse ground excitation", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Volume 36, Issue 12 (2007), 1719-1740.

Markogiannaki, O. G., & Tegos, I. A. (2013). Parametric Investigation for the Optimization of a Longitudinal Seismic Restraining System Consisting of Struts-Ties for Concrete Bridges. In COMPDYN 2013 4th ECCOMAS.

Markogiannaki, O., Tegos, I., & Vasileiou, S. (2014). The Use of Unbonded Tendons on Bridges in Seismic Regions. In IBSBI. Athens, Greece.

Mylonakis, G, Simeonov, V.K., Reinhorn, A.M., and Buckle, I.G., "Implications of Spatial Variation of Ground Motion on the Seismic Response of Bridges: Case Study," ACI International - Special Publication SP-187 (K. Krishnan Editor) (1999), 299-327.

Naeim F, Kelly JM. "Design of seismic isolated structures, From theory to practice", John Wiley and Sons Inc. (1999).

Nutt R.V. and Mayes R.L., "Comparison of Typical Bridge Columns Seismically Designed With and Without Abutment Participation Using AASHTO Division I-A and Proposed AASHTO LRFD Provisions", Task F3-1(a), (2000).

Papanikolaou, V. K. (2015). AnySection : Software for the analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load. Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

PCI, Precast, prestressed concrete bridges, the high performance solution, Comprehensive Bridge Design Manual, Available via DIALOG. [www.pci.org/publications/bridge](http://www.pci.org/publications/bridge) Accessed: 21 Nov 2008.

Tegos I.A., Mitoulis S.A., "Seismic response analysis of highway bridges, including backfill- deck interaction, through improved participation of backfills", ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynam

Tegos I. A, Giannakas N. C, C. T. A. (2011). Serviceability cracking check of circular section piers. *Bridge Structures*, 7(1), 43–52.ics and Earthquake Engineering, Rethymno (2007).

Zhang, J. and Makris, N., Seismic Response Analysis of Highway Overcrossings Including Soil-Structure Interaction, PEER Report 2001/02 (2001).

Zhang, J., and Makris, N., "Kinematic response functions and dynamic stiffnesses of bridge embankments", Earthquake Eng. Struct. Dyn., 31 (2002), 1933–1966.

Μητούλης Σ.Α., "Μείωση των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού των γεφυρών μέσω της παρεμπόδισης της ελεύθερης ταλάντωσης δια της εμπλοκής του ακροβάθρου και του μεταβατικού επιχώματος", Διδακτορική διατριβή που

υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη (2007).

ΟΑΣΠ, “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Ε.Α.Κ.)” (2003).

ΟΑΣΠ, “Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος”(Ε.Κ.Ω.Σ.)” (2000).

Τεγος, Ι. Α., Τεγου, Σ. Δ., & Μητουλης, Σ. Α. (2009). Αναλυτική διερεύνηση επί ενός νέου τύπου με αντισεισμική συμβολή ακροβάθρου. In *16ο Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ*. Πάφος, Κύπρος.

Χρυσανίδης, Θ., Πανοσκάλτσης, Β., Ψάρρας, Κ., & Τέγος, Ι. (2016). Το πρόβλημα της οικονομικότητας των δομικών στοιχείων και συστημάτων κατά την διαστασιολόγηση των φερόντων οργανισμών πολυώροφων οικοδομών. In *17ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος «Κατασκευές από Σκυρόδεμα»*.