

# Καινοτόμος Τρόπος Αντισεισμικής Κάλυψης Προβολοδομημένων Γεφυρών

## A Novel Seismic Protection System for Bridges Constructed with the Balanced Cantilever Method

ΠΗΛΙΤΣΗΣ-Β<sup>1</sup>, ΤΕΓΟΣ-Ι.Α.<sup>2</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Γέφυρα, Ακρόβαθρο, Προβολοδόμηση, Bridge, Abutment, Balanced Cantilever Method*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας ευέλικτος φέρων οργανισμός προβολοδομημένων γεφυρών έναντι οριζοντίων σεισμικών δράσεων, ο οποίος διαθέτει δυνατότητες ενεργοποίησης των ακροβάθρων και των μεταβατικών επιχωμάτων, χωρίς κανονιστικές παρεκκλίσεις. Η ευελιξία του συνίσταται στην δυνατότητα που υπάρχει να ρυθμίζονται τα μερίδια των παραλαμβανομένων από τα μεσόβαθρα και ακρόβαθρα σεισμικών τεμνουσών και μετακινήσεων και με αυτόν τον τρόπο να επιτυγχάνεται εκτός της βελτιωμένης αντισεισμικής ασφάλειας, οικονομία και ενίοτε αισθητική αναβάθμιση της γέφυρας. Η πρόταση ανάσχεσης σεισμικών μετακινήσεων εφαρμόζεται ως εναλλακτική αντιμετώπιση σε μεγάλη οδογέφυρα της Εγνατίας Οδού, κατασκευασμένη με την μέθοδο της Προβολοδόμησης, η οποία έχει μελετηθεί και κατασκευαστεί με συμβατικό φέροντα οργανισμό. Τα συμπεράσματα από την σύγκριση των δύο λύσεων δικαιώνουν τις προσδοκίες που προέρχονται από τις καινοτόμες επιλογές που χαρακτηρίζουν τον προτεινόμενο αντισεισμικό οργανισμό.

**ABSTRACT :** In the present study a novel bearing-structure is proposed for resisting the horizontal seismic forces in bridges constructed with the Balanced Cantilever method. This mechanism is capable of engaging the abutments and approach embankments in resisting the horizontal seismic forces with no deviations from the regulatory standards. Its adjustability refers to enabling the designer to control the distribution of seismic shear force and displacement in piers and abutments which eventually leads to enhanced seismic protection, economy and occasionally to aesthetic enhancement of the bridge. The proposed seismic displacement restraining mechanism is implemented as an alternative design to a long road bridge of Egnatia Odos motorway that is constructed conventionally with the Balanced Cantilever method. The verdict of comparing the two designs attests to the benefits of the proposed novel mechanism.

---

<sup>1</sup> Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, AECOM, email: [pilitsis\\_v@hotmail.com](mailto:pilitsis_v@hotmail.com)

<sup>2</sup> Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, email: [itegos@civil.auth.gr](mailto:itegos@civil.auth.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

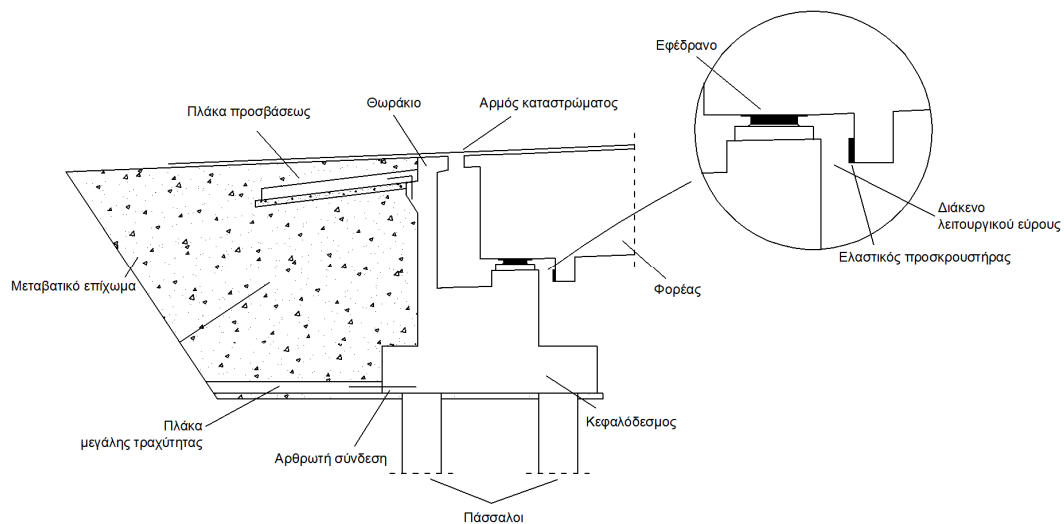
Η μονολιθικότητα στη Γεφυροποιία έχει θετική επίδραση στην αισθητική, την ανθεκτικότητα και την αντισεισμικότητα του έργου. Ωστόσο η λειτουργικότητα, η οποία απαιτεί την ελεύθερη συστολή/διαστολή του καταστρώματος κατά την διαμήκη διεύθυνση, αντιτίθεται στη μονολιθικότητα. Στις μονολιθικές γέφυρες η σεισμική ενέργεια καταναλώνεται μέσω της υστερητικής συμπεριφοράς των βάρων. Στόχος του σχεδιασμού σε μια τέτοια περίπτωση, ει δυνατόν είναι η εκμετάλλευση της δυσκαμψίας του συνόλου των βάρων της γέφυρας για τη μείωση των σεισμικών μετακινήσεων. Ωστόσο, αυτό πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να συμβεί καθώς οι απαιτήσεις λειτουργικότητας αποβαίνουν δυσμενέστερες για βάρη τα οποία έχουν μικρό ύψος (και ως εκ τούτου είναι πιο δύσκαμπτα) καθώς και για τα ακρόβαθρα τα οποία στηρίζουν την άκρη της γέφυρας, τα οποία δέχονται τους εντονότερους καταναγκασμούς από τη μεταβολή του μήκους του φορέα. Η παρουσία των εφεδράνων λύνει το πρόβλημα της ανάπτυξης υψηλών εντάσεων στην οριακή κατάσταση λειτουργίας αλλά ταυτόχρονα καθιστά ανενεργά τα εν λόγω μέλη κατά τον σεισμό. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η εμπλοκή των ακροβάθρων στην παραλαβή των οριζόντιων σεισμικών δράσεων και παράλληλα ο συμβιβασμός των λειτουργικών και αντισεισμικών απαιτήσεων στην περίπτωση των προβολοδομημένων γεφυρών.

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

Ο προτεινόμενος μηχανισμός παραλαβής οριζόντιων σεισμικών δράσεων αποτελεί μια παραλλαγή του μηχανισμού που έχει ήδη προταθεί για γέφυρες κατασκευασμένες με μεθόδους διαφορετικές της Προβολοδόμησης (Pilitsis et al., 2013) (Pilitsis & Tegos, 2013). Στο κάτω πέλμα του φορέα καταστρώματος μορφώνεται κατάλληλη προεξοχή (**Σχήμα 1**). Αυτή η προεξοχή έχει τον ρόλο ανασχετήρα και κατασκευάζεται σε απόσταση από την στέψη του κορμού του ακροβάθρου η οποία ισούται με την μετακίνηση του καταστρώματος υπό τον λειτουργικό συνδυασμό δράσεων. Ο φορέας της γέφυρας εδράζεται στην κεφαλή του ακροβάθρου επί εφεδράνων. Κατά την κατάσταση λειτουργίας το μήκος του φορέα μεταβάλλεται χωρίς να προκαλεί εντάσεις στον κορμό του ακροβάθρου. Κατά την σεισμική κατάσταση σχεδιασμού, οι αναπτυσσόμενες σεισμικές μετακινήσεις στην διαμήκη διεύθυνση περιορίζονται από την πρόσκρουση του ανασχετήρα κατά την κίνηση του φορέα προς το ακρόβαθρο και την ενεργοποίηση αυτού και του μεταβατικού επιχώματος. Παράλληλα, με την διαμόρφωση ανασχετήρων στην εγκάρσια διεύθυνση, η οποία δεν σχετίζεται με τις λειτουργικές απαιτήσεις του προβλήματος, είναι δυνατός και ο περιορισμός των εγκάρσιων μετακινήσεων του φορέα στην θέση των ακροβάθρων. Η «ακινητοποίηση» του κεφαλόδεσμου κατά τον σεισμό, καθώς μεταφέρονται σε αυτόν ισχυρότατα φορτία, είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί με την προσάρτηση αρθρωτά όπισθεν του κεφαλόδεσμου (καθ' όμοιο τρόπο με τις πλάκες προσβάσεως) μιας λεπτής πλάκας (Tegos & Papadopoulos, 2012). Τα πέλματα αυτής της πλάκας κατασκευάζονται με κατάλληλη τραχύτητα έτσι ώστε η

δημιουργία μεγάλου συντελεστή τριβής με το υπερκείμενο επίχωμα και το υποκείμενο έδαφος να καθιστά ικανή την πλάκα να συγκρατήσει τον κεφαλόδεσμο μέσω των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται λόγω του υπερκείμενου βάρους του επιχώματος.

Ο καθορισμός των απαιτούμενων αντοχών στην περίπτωση διαμόρφωσης των εν λόγω ανασχετήρων στην διαμήκη διεύθυνση δεν απαιτεί για τη σεισμική ομάδα δράσεων συμβατική ανάλυση. Μια ικανοτική ιεράρχηση αντοχών στην οποία: (α) την κατώτερη θέση έχει η απαίτηση αντοχής λόγω της ασκούμενης αδρανειακής δράσης του σεισμού στον φορέα, υπολογιζόμενη με βάση την μάζα του και την κανονιστική τιμή της επιτάχυνσης του εδάφους  $a_g$ ; (β) την ενδιάμεση θέση η αντοχή των ανασχετήρων και (γ) την υπερκείμενη θέση αντοχής στην ιεράρχηση κατέχει η -υπό αρηγμάτωση κατάσταση- παραλαβή της έκκεντρα ασκούμενης σεισμικής δράσης στον φορέα. Οι ανασχετήρες αποτελούν βραχείς προβόλους και διαστασιολογούνται με βάση ένα μοντέλο θλιπτήρων-ελκυστήρων. Η εκκεντρότητα της αντίδρασης του ανασχετήρα (ως προς το κέντρο βάρους της διατομής του φορέα) κατά την πρόσκρουση του στην στέψη του ακροβάθρου έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αρνητικών ροπών στήριξης στον φορέα. Ο πρόσθετος οπλισμός θα προκύψει βάσει της απαίτησης για λειτουργία του φορέα υπό αρηγμάτωση κατάστασή, καθώς αυτός είναι προεντεταμένος. Βέβαια, όσον αφορά την απαίτηση οπλισμού υπάρχουν δύο ευνοϊκά δεδομένα: πρώτον ότι ταυτόχρονα με την αρνητική ροπή προσάγεται αξονική θλιπτική ορθή δύναμη και δεύτερον ότι είναι δυνατόν στο άκρο του προεντεταμένου φορέα να αποταμιευθεί, μέσω κατάλληλης εκκεντρότητας στις αγκυρώσεις των τενόντων, κάποια θετική ροπή, μέρος της οποίας θα καταναλωθεί ακινδύνως κατά τον σεισμό.



**Σχήμα 1.** Σχηματική τομή διάταξης του προτεινόμενου μηχανισμού ανασχέσεως σεισμικών μετακινήσεων.

Ως μειονεκτήματα του παρόντος μηχανισμού μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

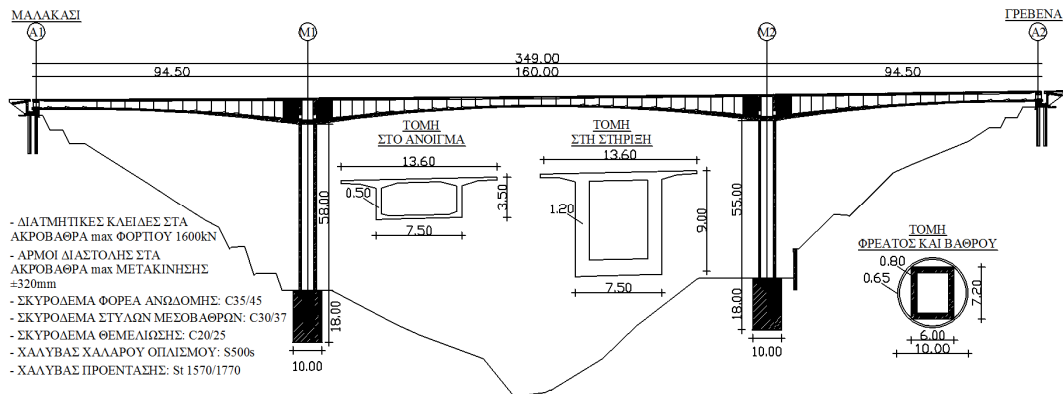
- Όταν κλείνει το διάκενο λειτουργικού εύρους και έρχεται σε επαφή ο ανασχετήρας με την στέψη του ακρόβαθρου, τότε ολόκληρη η εναπομείνουσα αδρανειακή δύναμη του φορέα (αν αφαιρεθεί από την συνολική αδρανειακή σεισμική δύναμη η συνεισφορά της δυσκαμψίας των μεσοβάθρων) καταλήγει στο ακρόβαθρο.
- Η λειτουργία του μηχανισμού ενεργοποιείται μόνο για κίνηση του φορέα προς το ακρόβαθρο. Αυτό σημαίνει πως σε κάθε διεύθυνση ενεργοποιείται ένα μόνο ακρόβαθρο. Η αδυναμία κατανομής της αδρανειακής δύναμης του φορέα και στα δύο ακρόβαθρα οδηγεί στην αυξημένη απαίτηση οπλισμού τόσο για τον κάθε ανασχετήρα όσο και για το άνω πέλαμα του φορέα στην θέση στήριξης στο ακρόβαθρο.
- Η αντίδραση κατά την πρόσκρουση του ανασχετήρα στη στέψη του ακρόβαθρου προκαλεί πρόσθετη ροπή ανατροπής στην βάση του ακρόβαθρου η οποία πρέπει να παραληφθεί από τους πασσάλους θεμελίωσης.
- Τμήμα της προαναφερθείσας ροπής καταναλώνεται από την αντίσταση του επιχώματος, το οποίο όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ανέκδοτο.
- Η ενδοσιμότητα του επιχώματος σε συνδυασμό με τα έντονα κρουστικά φαινόμενα που αναπτύσσονται (τα οποία μπορούν να μετριαστούν με την χρήση κατάλληλων προσκρουστήρων στις επιφάνειες επαφής του ανασχετήρα και της στέψης ακρόβαθρου) καθιστούν το πρόβλημα μη-γραμμικό και πολύπλοκο.

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

### Γέφυρα Αναφοράς της Διερεύνησης

Γεφυρα αναφοράς αποτελεί η οδογέφυρα τριών ανοιγμάτων που βρίσκεται στο τμήμα Παναγιά-Γρεβενά της Εγνατίας Οδού. Η γέφυρα αποτελείται από δύο όμοιους κλάδους, στατικά ανεξάρτητους μεταξύ τους, οι οποίοι κατασκευάστηκαν με την μέθοδο της Προβολοδόμησης στο οδικό τμήμα μεταξύ Μαλακασίου και Γρεβενών. Στην παρούσα διερεύνηση αξιοποιείται ο δεξιός κλάδος του οποίου λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2**.

Το έργο βρίσκεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I ( $a = 0.16g$ ). Το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού που λήφθηκε υπόψη κατά την διαστασιολόγηση της γέφυρας έναντι οριακής κατάστασης αστοχίας υπό τον σεισμικό συνδυασμό δράσεων είναι σύμφωνο με τους ισχύοντες κανονισμούς της χρονικής περιόδου κατασκευής του έργου (ΥΠ.Ε.ΧΩ.Δ.Ε., 2003). Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής θεμελίωσης λήφθηκε ίσος με  $\theta = 1.0$  και ο συντελεστής σπουδαιότητας του έργου ίσος με  $\gamma_1 = 1.30$ . Η γέφυρα βρίσκεται σε έδαφος κατηγορίας Β κατά Ε.Α.Κ.2000 ( $T_1 = 0.15$  και  $T_2 = 0.60$ ). Η μελέτη της γέφυρας πραγματοποιήθηκε με συντελεστές μετελαστικής συμπεριφοράς  $q_x = q_y = 3.50$  και  $q_z = 1.00$ .



**Σχήμα 2.** Κατά μήκος τομή του δεξιού κλάδου της γέφυρας Παναγιά–Γρεβενά (Τεχνικό Γ2).

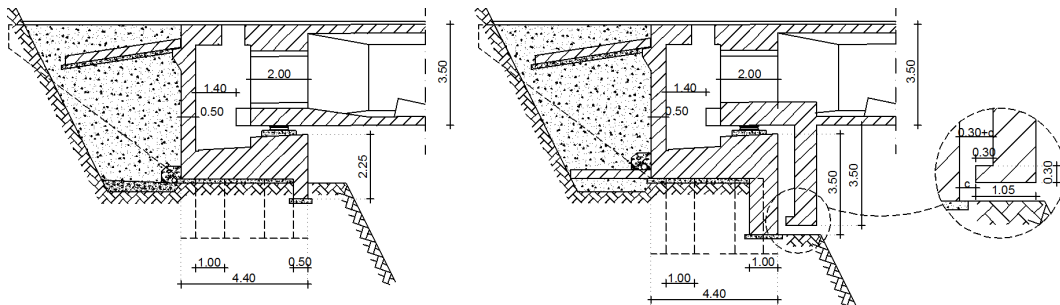
### Εφαρμογή του Προτεινόμενου Μηχανισμού στην Γέφυρα Αναφοράς και Υπολογιστική Προσομοίωση

Προεκτείνεται ένας πρόβολος ορθογωνικής διατομής από το κάτω πέλαμα της διατομής του φορέα (**Σχήμα 3**). Κατά την κίνηση του φορέα προς το ακρόβαθρο ο πρόβολος ενεργοποιείται προσδίδοντας στο σύστημα δυσκαμψία. Κατά την απομάκρυνση του φορέα από το ακρόβαθρο ο πρόβολος αυτός παραμένει ανενεργός ενώ ενεργοποιείται ο αντίστοιχος πρόβολος του άλλου ακροβάθρου. Το εύρος του διάκενου που πρέπει να αφεθεί μεταξύ του κεφαλόδεσμου και του προβόλου εξαρτάται από την λειτουργική απαίτηση της διαστολής του φορέα κατά τον πρώτο καιρό μετά την κατασκευή του, λόγω ομοιόμορφης αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Με την πάροδο των ετών και όσο τα φαινόμενα του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης εξελίσσονται, το διάκενο, που έχει αφεθεί αρχικά για να ικανοποιεί τις προαναφερθείσες λειτουργικές απαιτήσεις, μεγαλώνει επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση του Μηχανισμού.

Η επιρροή του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης στην συστολή του καταστρώματος αντιστοιχεί με μια ισοδύναμη ομοιόμορφη μείωση της θερμοκρασίας κατά 25°C. Αυτό αντιστοιχεί σε μια μετακίνηση του καταστρώματος στις θέσεις των ακροβάθρων προς την μέση του καταστρώματος κατά 4.4cm. Ομοίως, η ομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος λήφθηκε υπόψη ίση με ±25°C.

Δύο εύλογα κριτήρια για την επιλογή του πάχους του προβόλου καθώς και του εύρους του διάκενου μεταξύ προβόλου και κεφαλοδέσμου του ακροβάθρου είναι η μη-καταπόνηση του κορμού υπό τον λειτουργικό συνδυασμό δράσεων και η ορθολογική κατανομή της σεισμικής τέμνουσας στα βάθρα της γέφυρας και τους πρόβλους στις θέσεις των ακροβάθρων. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε κατά την κατασκευή να αφεθεί διάκενο εύρους 3.0cm, το οποίο είναι μικρότερο από τη λειτουργική απαίτηση του προβλήματος, με σκοπό την ενίσχυση της απόδοσης του Μηχανισμού αφού όπως προαναφέρθηκε η απόδοση του μειώνεται

με το πέρασμα του χρόνου και την εξέλιξη των φαινομένων του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης.



**Σχήμα 3.** Ακρόβαθρο υφιστάμενης γέφυρας (αριστερά), Ακρόβαθρο με τον προτεινόμενο μηχανισμό ανάσχεσης σεισμικών μετακινήσεων (δεξιά).

Αρχικά επιλέχθηκε ένα πάχος προβόλου ίσο με 1.15m, το οποίο όμως δεν ήταν δυνατόν να παραλάβει την λειτουργική παραμόρφωση των 1.4cm διαστολής του καταστρώματος. Ο απαιτούμενος οπλισμός κατά ο EC2-Part 1 (CEN, 2004) έναντι περιορισμού της ρηγμάτωσης ήταν πολύ μεγαλύτερος του μέγιστου επιτρεπόμενου από τον EC8-Part 1 (CEN, 2003a) για στοιχεία κυρίως καμπτόμενα. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην επιλογή ενός πάχους προβόλου ίσο με 0.75m. Σημειώνεται πως οι ανασχετήρες με αυτή την γεωμετρία δεν αποτελούν βραχείς προβόλους. Η διάσταση του προβόλου κατά την εγκάρσια διεύθυνση ισούται με 7.50m, ίδια δηλαδή με το πλάτος του κάτω πέλματος της κιβωτιοειδούς διατομής του φορέα.

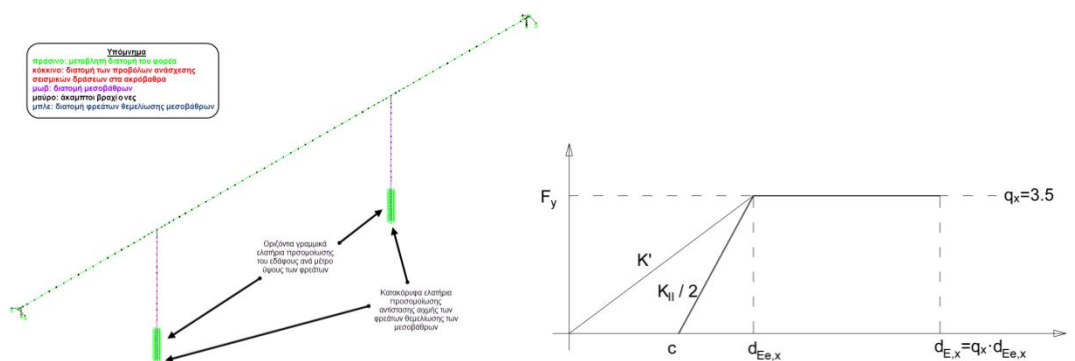
Ο πρόβλος-προσκραστήρας ενεργοποιείται μόνο κατά την κίνηση του φορέα της γέφυρας προς το ακρόβαθρο. Οι δράσεις που δέχεται ο κεφαλόδεσμος του κάθε ακροβάθρου είναι οριζόντιες δυνάμεις προς το επίχωμα. Σε αυτή την περίπτωση, ο σχεδιασμός της τραχιάς πλάκας ακινητοποιήσεως του κεφαλόδεσμου θα μπορούσε να γίνει λαμβάνοντας υπόψη ένα μέρος και όχι ολόκληρη την ικανοτική δράση (τέμνουσα αντοχής του προβόλου) καθώς σε αυτή την περίπτωση μέρος των καταπονήσεων του ακροβάθρου παραλαμβάνονται από τις παθητικές ωθήσεις του επίχωματος.

Το πρόβλημα προσομοιώθηκε στον υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος SAP2000 v.11.0.4 (CSI, 2007) με γραμμικά στοιχεία frame element μεταβλητής διατομής. Διενεργήθηκαν δυναμικές φασματικές αναλύσεις για τον φορέα της γέφυρας αναφοράς και για τον φορέα με τον προτεινόμενο μηχανισμό ανάσχεσης σεισμικών μετακινήσεων. Η σχέση της ισοδύναμης δυσκαμψίας των προβόλων προκύπτει από το σχήμα **Σχήμα 4** (αριστερά) και είναι η εξής:

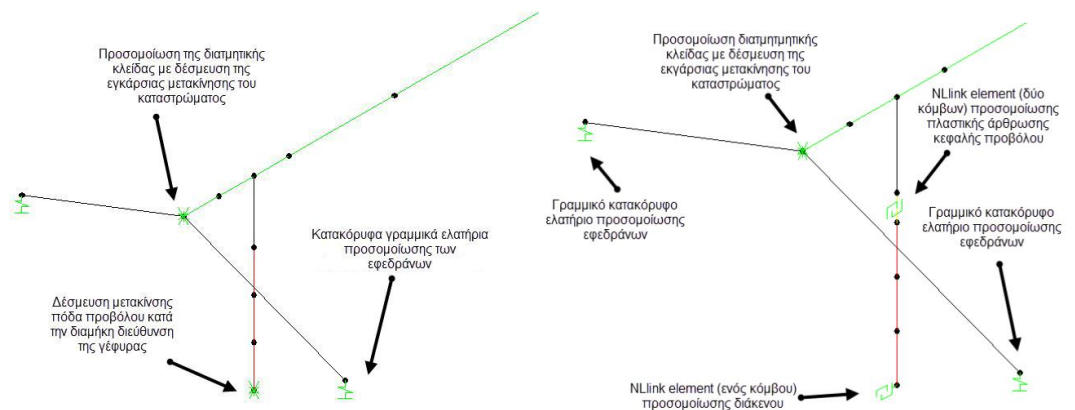
$$K' = \frac{K_{II}}{2} \cdot \left( 1 - \frac{c}{d_{Ee,x}} \right) \quad (1)$$

όπου:  $c$  είναι το εύρος του διάκενου,  $d_{Ee,x}$  η ελαστική σεισμική μετακίνηση κατά την διαμήκη διεύθυνση της γέφυρα,  $K_{II}$  η ενεργός δυσκαμψία Σταδίου II των προβόλων και  $K'$  η ισοδύναμη ενεργός δυσκαμψία στο προσομοίωμα. Σημειώνεται πως η δυσκαμψία των εφεδράνων ολίσθησης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα ποσότητα.

Η δυσκαμψία Σταδίου II των προβόλων λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς μειωμένη κατά 50% καθώς οι πρόβολοι δεν ενεργοποιούνται αμφίπλευρα αλλά μονόπλευρα. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν οι σωστές σεισμικές μετακινήσεις του καταστρώματος. Για να ληφθούν υπόψη η πραγματικές εντάσεις που αναπτύσσονται στους πρόβλους κατά την διαστασιολόγηση αυτών, λαμβάνεται υπόψη η πραγματική δυσκαμψία Σταδίου II. Για την διενέργεια δυναμικής φασματικής ανάλυσης ο κάθε πρόβολος έχει δεσμευμένη την μετακίνηση του πόδα του κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

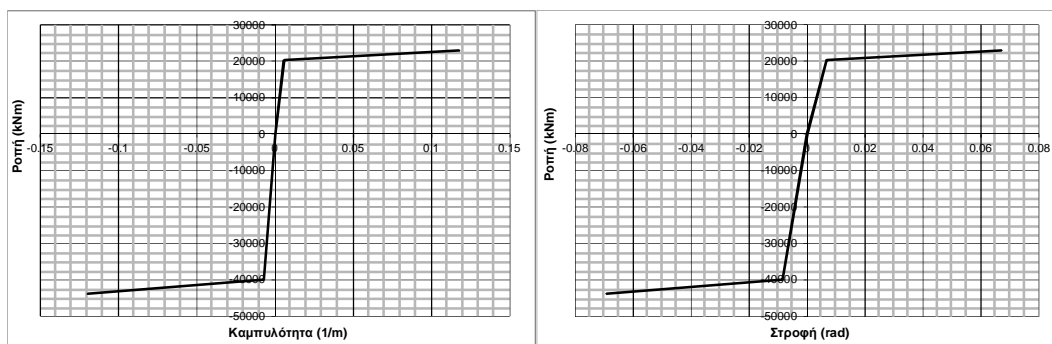


**Σχήμα 4.** (αριστερά) Προσομοίωμα με τον προτεινόμενο μηχανισμό, (δεξιά) Σχέση δύναμης-μετακίνησης του μηχανισμού ανάσχεσης σεισμικών μετακινήσεων.



**Σχήμα 5.** (αριστερά) Λεπτομέρεια γραμμικού προσομοιώματος, (δεξιά) λεπτομέρεια μη-γραμμικού προσομοιώματος ακροβάθρων.

Ακολούθως διενεργήθηκαν μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας για τον φορέα της γέφυρας αναφοράς και για τον φορέα με τον προτεινόμενο μηχανισμό και για διάφορες αποστάσεις των προβόλων από τους κεφαλόδεσμούς. Λεπτομέρεια του μη γραμμικού προσομοιώματος με τον προτεινόμενο μηχανισμό φαίνεται στο **Σχήμα 5** (δεξιά). Τα διαγράμματα ροπών-στροφών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα για τον καθορισμό της συμπεριφοράς των στοιχείων Nlink των περιωχών πιθανής πλαστικής άρθρωσης υπολογίστηκαν βάσει των διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων που παράχθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος AnySection v.4.0.4 (Papanikolaou, 2012), θεωρώντας τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών και για σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος (CEN, 2003b). Στο **Σχήμα 6** παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων και ροπών-στροφών για την περιοχή πιθανής πλαστικής άρθρωσης στην κεφαλή των προβόλων-ανασχετήρων που αντιστοιχούν στη διάταξη όπλισης του **Σχήματος 7**. Χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνητό επιταχυνσιογράφημα το οποίο ανταποκρίνεται στα σεισμικά δεδομένα του προβλήματος και το οποίο δημιουργήθηκε με χρήση του προγράμματος SeismoArtif v.2.1 (SeismoSoft, 2012). Η περιβάλλουσα συνάρτηση σεισμικής εντάσεως-χρόνου που λήφθηκε υπόψη ήταν αυτή των Saragoni & Hart (1973).



**Σχήμα 6:** (αριστερά) Διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων και (δεξιά) διάγραμμα ροπών-στροφών στην περιοχή πιθανής πλαστικής άρθρωσης στην κεφαλή των προβόλων.

Οι περιπτώσεις μη-γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας που διενεργήθηκαν για τον φορέα της γέφυρας με τον προτεινόμενο μηχανισμό ανάσχεσης σεισμικών μετακινήσεων από τα ακρόβαθρα περιλαμβάνουν τις καθοριζόμενες από τον σεισμικό συνδυασμό δράσεων καταστάσεις (αρχικό εύρος διάκενων που αντιστοιχεί στα  $G + 0.2Q + C + S + 0.5\Delta T_{pos}$  και  $G + 0.2Q + C + S + 0.5\Delta T_{neg}$ ) καθώς και σε χαρακτηριστικές καταστάσεις κατά την διάρκεια ζωής του έργου (π.χ. κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής του έργου και κατά την ολοκλήρωση των φαινομένων του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης με ταυτόχρονη μέγιστη αρνητική θερμοκρασιακή διαφορά). Οι περιπτώσεις αυτές ουσιαστικά οριοθετούν την περιβάλλουσα του μεγέθους του εύρους των διάκενων κατά την διάρκεια ζωής του έργου.



## Αποτελέσματα των Αναλύσεων

Κρίσιμη δράση για την όπλιση των μεσοβάθρων στην περίπτωση της γέφυρας αναφοράς προκύπτει η δράση του ανέμου. Ο έλεγχος έναντι οριακής κατάστασης αστοχίας στον σεισμικό συνδυασμό δράσεων έδειξε ότι για τα μεσόβαθρα επαρκεί το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού. Αντιθέτως τα μεσόβαθρα της γέφυρας αναφοράς είναι οπλισμένα με ένα ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με  $\rho_l = 1.30\%$ . Ο οπλισμός αυτός τοποθετήθηκε και στα μεσόβαθρα της γέφυρας με τον προτεινόμενο μηχανισμό καθώς το στατικό σύστημα της γέφυρας στην εγκάρσια διεύθυνση δε μεταβάλλεται με την παρουσία του.

Στην περίπτωση της γέφυρας με τον προτεινόμενο μηχανισμό ανάσχεσης σεισμικών μετακινήσεων, ο οπλισμός των προβόλων-ανασχετήρων προκύπτει από τον έλεγχο έναντι οριακής κατάστασης λειτουργικότητας. Επειδή η καταπόνηση αυτών των στοιχείων είναι μονόπλευρη και όχι αμφίπλευρη, τόσο στις λειτουργικές δράσεις όσο και στις σεισμικές δράσεις, επιλέχθηκε η διάταξη οπλισμών του **Σχήματος 7**, με οπλισμό θλιβόμενης ζώνης ο οποίος ικανοποιεί τις διατάξεις του EC8-Part 2 για δοκούς πλαστικής συμπεριφοράς. Το συνολικό ποσοστό οπλισμού αυτών των στοιχείων ανέρχεται σε  $\rho_{l,tot} = 2.68\%$ .

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά των φορέων της γέφυρας αναφοράς και της γέφυρας με τον προτεινόμενο μηχανισμό καθώς επίσης και η σεισμική μετακίνηση σχεδιασμού κατά τη διαμήκη διεύθυνση όπως αυτή προέκυψε από τη δυναμική φασματική ανάλυση στα γραμμικά προσομοιώματα. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα αποτελέσματα, επιτυγχάνεται μια σημαντική μείωση των διαμήκων σεισμικών μετακινήσεων, ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση, όπως ήταν αναμενόμενο, ο προτεινόμενος μηχανισμός δεν έχει συνεισφορά.

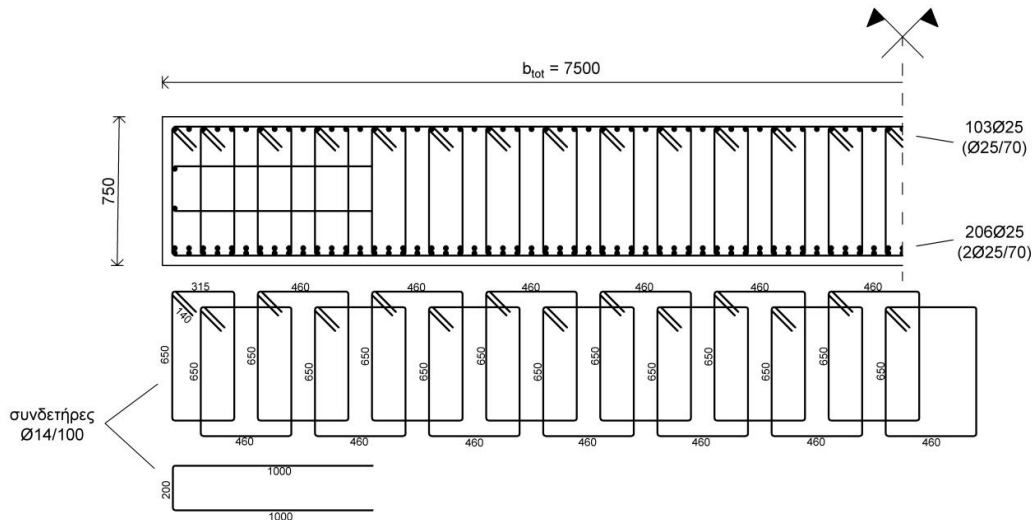
Στο **Σχήμα 8** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των διαμήκων μετακινήσεων του καταστρώματος για τη γέφυρα αναφοράς καθώς και για τις έξι ελεγχθείσες περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν για τη γέφυρα με τον προτεινόμενο μηχανισμό. Η απαίτηση πλαστιμότητας στροφών των πλαστικών αρθρώσεων των προβόλων δεν ξεπέρασε σε καμία περίπτωση τη διαθέσιμη πλαστιμότητα, ενώ κρίσιμη περίπτωση με τη μεγαλύτερη απαιτούμενη πλαστιμότητα στροφών για τους προβόλους είναι αυτή κατά την οποία ο σεισμός σχεδιασμού γίνεται όταν οι πρόβολοι βρίσκονται εν επαφή με τους κεφαλόδεσμούς των ακροβάθρων (Πίνακας 2). Το ποσοστό μείωσης των διαμήκων σεισμικών μετακινήσεων σε σχέση με τη γέφυρα αναφοράς κυμαίνεται μεταξύ 34.5% και 53.7%, ανάλογα με το εύρος των διάκενων την στιγμή έναρξης του σεισμικού φαινομένου.

**Πίνακας 1.** Αποτελέσματα δυναμικής φασματικής ανάλυσης για τα δύο συγκρινόμενα συστήματα.

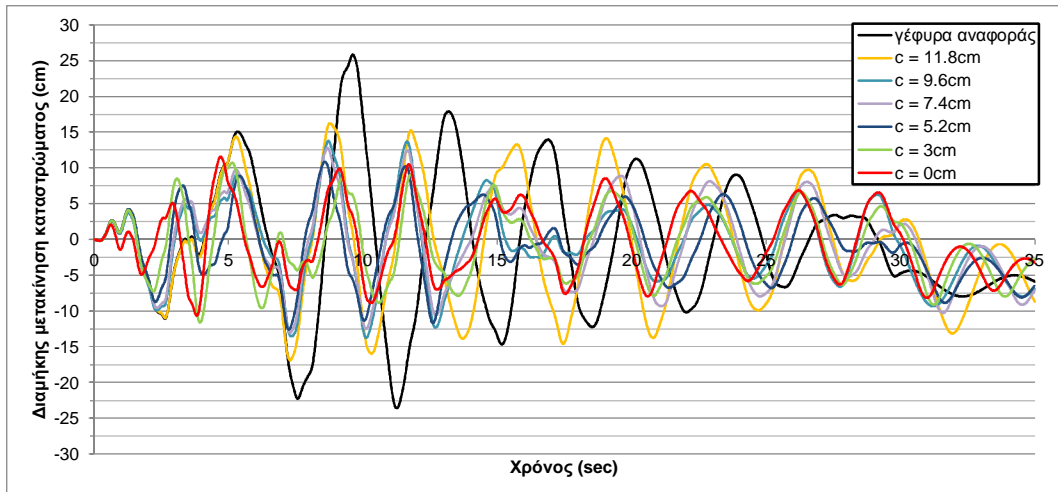
	$T_x$ (sec)	$T_y$ (sec)	$d_{E,x}$ (cm)	$\max d_{E,y}$ (cm)
Γέφυρα αναφοράς	2.69	3.61	26.9	47.2
Γέφυρα με το προτεινόμενο σύστημα	1.79		14.2	

**Πίνακας 2.** Μέγιστες εμφανιζόμενες διαμήκειες μετακινήσεις καταστρώματος και μέγιστες στροφές πλαστικής άρθρωσης προβόλων-ανασχετήρων.

εύρος διάκενου $c$ (cm)	Γέφυρα με τον προτεινόμενο μηχανισμό						Γέφυρα αναφοράς
	0	3	5.2	7.4	9.6	11.8	
$\max d_x$ (cm)	11.58	11.62	12.61	13.07	13.76	16.92	25.84
$\max$ στροφή πλαστικής άρθρωσης προβόλων ( $10^{-3}$ rad)	23.54	17.22	13.65	9.14	6.83	8.20	-



**Σχήμα 7.** Διάταξη διαμήκους οπλισμού και οπλισμού περίσφιξης της κρίσιμης περιοχής στην κεφαλή των προβόλων.



**Σχήμα 8.** Χρονοϊστορίες διαμήκων μετακινήσεων καταστρώματος για την γέφυρα αναφοράς και τις διάφορες περιπτώσεις της γέφυρας με τον προτεινόμενο μηχανισμό.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα εφαρμογής του προτεινόμενου μηχανισμού ανάσχεσης των οριζόντιων σεισμικών δράσεων σε μια μεγάλου μήκους οδογέφυρα, κατασκευασμένη με τη μέθοδο της Προβολοδόμησης. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση είναι τα εξής:

- Η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού κρίνεται ικανοποιητική συγκριτικά με την απόδοση ενός πολυδάπανου συστήματος απόσβεσης σεισμικής ενέργειας.
- Η μη-αμφίπλευρη ενεργοποίηση των προβόλων-ανασχετήρων οδηγεί στη μη-συμμετρική απαίτηση όπλισης. Η όπλιση θα πρέπει να γίνεται βάση των διατάξεων του κανονισμού για στοιχεία δοκών με απαιτήσεις πλαστιμότητας.
- Ο προτεινόμενος μηχανισμός έχει το μειονέκτημα της απώλειας απόδοσης με την πάροδο του χρόνου λόγω εξέλιξης των φαινομένων του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης, τα οποία λόγω του μεγάλου μήκους του φορέα οδηγούν σε σταδιακή με τον χρόνο διεύρυνση του διακένου μεταξύ κεφαλόδεσμου και προβόλου-ανασχετήρα. Βεβαίως, το μειονέκτημα αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με την τοποθέτηση μεταλλικών παρεμβλημάτων μεταξύ των προβόλων-ανασχετήρων και των παρειών των κεφαλόδεσμων (των προς το εσωτερικό της γέφυρας) καταλλήλου πάχους και σε κατάλληλη χρονική στιγμή ώστε να διατηρείται το εύρος των διακένων σε επιθυμητά επίπεδα.
- Για την αύξηση της απόδοσης του Μηχανισμού σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να δεχθούμε το αρχικό εύρος του διάκενου να μην καλύπτει ολόκληρη τη λειτουργική απαίτηση, υπό τον όρον βεβαίως, ότι πληρούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις περί ανεκτού εύρους ρηγματώσεως.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Οι συγγραφείς επιθυμούν να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη τους στο γραφείο μελετών ΜΕΤΕ-ΣΥΣΜ για την διάθεση της μελέτης της γέφυρας για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

Comité Européen de Normalisation (CEN - European Committee for Standardization) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (2003a)

Comité Européen de Normalisation (CEN - European Committee for Standardization) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges (2003b)

Comité Européen de Normalisation (CEN - European Committee for Standardization) Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings (2004)

CSI (Computers and Structures Inc.) SAP2000 V.11.-Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual (2007)

Papanikolaou, V. K., “Analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load”. Computers & Structures, Vol.98 (2012) 33-54

Pilitsis, V., Skordeli, M. & Tegos, I., “A suggestion for adjustment of the load-bearing structure of bridges with antiseismic, economic and aesthetic benefits”, in Proceedings of the 2013 fib Symposium (Tel Aviv Israel April 22-24, 2013), IACIE, Tel Aviv, Israel (2013) 431-431

Pilitsis, V. & Tegos I., “Employment of Abutments and Approach Embankments for Seismic Protection of Bridges”, in Proceedings of the 2013 International Van Earthquake Symposium (Van Turkey October 23-25, 2013)

Saragoni, R.G. & Hart, G. C., “Simulation of artificial earthquakes”. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 2, No 3 (1973) 249-267

SeismoSoft, SeismoArtif - A computer program for generation of artificial accelerograms (2012)

Tegos, I. & Papadopoulos, I., “An Innovative Friction-based Seismic Restrainer Utilizing Bridge Approach Embankments”, in Proceedings of 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE) (Lisbon Portugal September 24-28, 2012)

ΥΠ.Ε.ΧΩ.Δ.Ε. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Ε.Α.Κ. 2000) (amended in 2003) (2003)