

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΤΗΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ

Ελευθερία Ε. Γκαγκά

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Μ.Δ.Ε. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: elgkagka@gmail.com

Κωνσταντίνος Ε. Καλοχαιρέτης

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., M.Sc. Imperial College, Υποψήφιος Διδάκτορας

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: kalkostis@hotmail.com

Χάρης Ι. Γαντές

Αναπληρωτής Καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα καλώδια αποτελούν εφελκόμενα στοιχεία μέσω των οποίων επιτυγχάνεται πλήρης εκμετάλλευση της διατομής καθώς η μονοαξονική τους λειτουργία συνεπάγεται ομοιόμορφο διάγραμμα ορθών τάσεων σε ολόκληρη τη διατομή και δεν υφίσταται κίνδυνος λυγισμού. Η αύξηση της έντασής τους οδηγεί σε αύξηση της δυσκαμψίας τους και για την καλύτερη λειτουργία τους είναι συνήθως απαραίτητη η επιβολή προέντασης. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις, τόσο κατά τις φάσεις ανέγερσης όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Ειδικότερα στα σύγχρονα αστικά κέντρα με τις οδικές αρτηρίες μεγάλου πλάτους, τα καλώδια βρίσκουν συχνά εφαρμογή στην ανάρτηση υπέργειων διαβάσεων για τη διευκόλυνση της κυκλοφορίας των πεζών (καλωδιωτές πεζογέφυρες). Οι λύσεις αυτές προσφέρουν ικανοποιητικό αισθητικό και λειτουργικό αποτέλεσμα, ασφάλεια, ταχύτητα ανέγερσης και οικονομικότητα, κάτι που τις καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικές στη σύγχρονη κατασκευαστική αγορά.

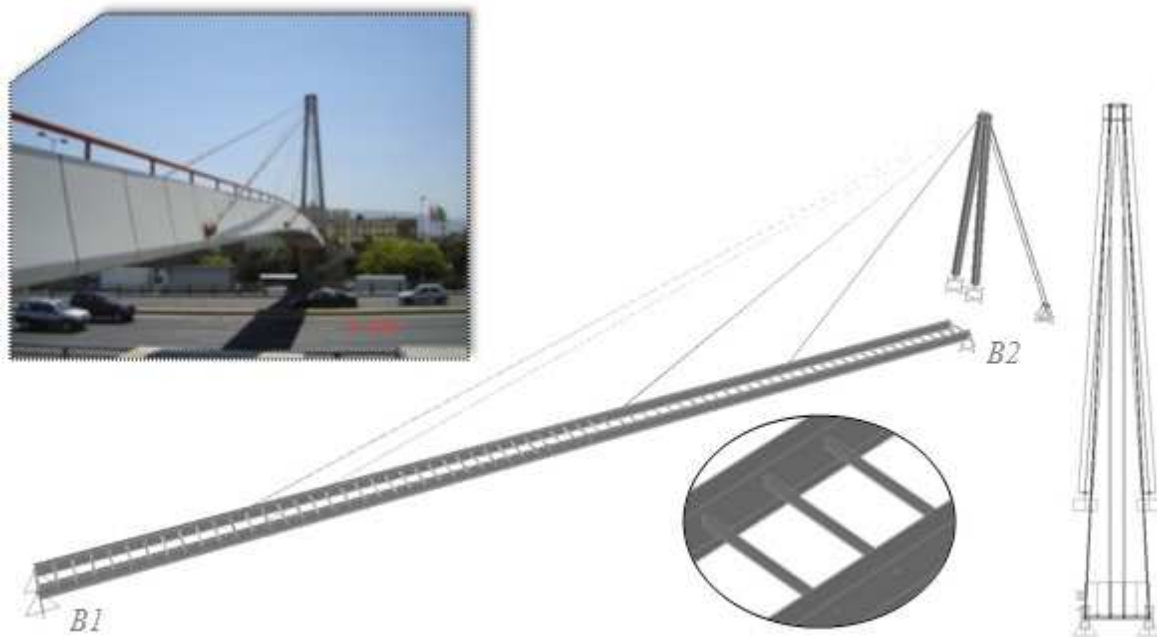
Στόχος του παρόντος άρθρου είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών στατικών λύσεων καλωδίωσης για μια πεζογέφυρα τυπικών διαστάσεων υπό την επίδραση κατακόρυφων φορτίων (μόνιμων και κινητών) σε φάση προμελέτης, ικανοποιώντας κριτήρια αστοχίας, λειτουργικότητας αλλά και οικονομίας. Το στατικό σύστημα με δύο πυλώνες και ακτινική διάταξη καλωδίων προκύπτει να παρέχει τη βέλτιστη λύση.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

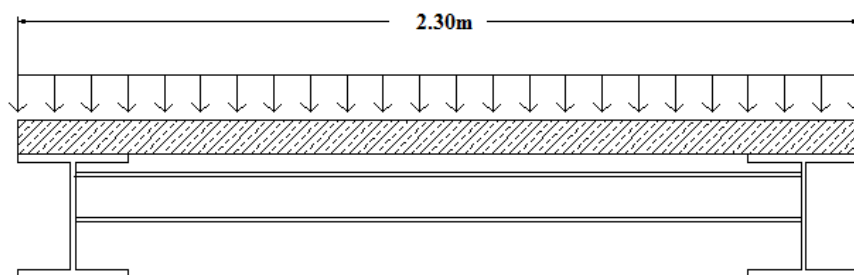
Η ανάλυση βασίστηκε στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας καλωδιωτής πεζογέφυρας, τεσσάρων ανοιγμάτων, η οποία εξυπηρετεί τη διέλευση πάνω από τη λεωφόρο «Πέτρου Ράλλη» στην Αθήνα, έχοντας συνολικό μήκος 70m και πλάτος 2,3m (βλ. Σχ. 1). Η στήριξη της στο έδαφος επιτυγχάνεται μέσω ακροβάθρων (B1, B2) και ενός πυλώνα που εδράζεται στο ένα εξ' αυτών (B2). Η στήριξη του καταστρώματος βασίζεται τόσο στα ακρόβαθρα όσο και στα καλώδια ανάρτησης που καταλήγουν στην κεφαλή του πυλώνα. Ο πυλώνας με τη σειρά του αντιστηρίζεται από τρία ζεύγη καλωδίων τα οποία αγκυρώνονται στο έδαφος όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Ο φορέας του καταστρώματος αποτελείται από δύο κύριες δοκούς στις οποίες στηρίζονται εγκάρσιες διαδοκίδες (Σχ. 2). Ο πυλώνας αποτελείται από δύο χαλύβδινα μέλη κοίλης ορθογωνικής διατομής με ελαφρά κλίση κάθετα στο διαμήκη άξονα της γέφυρας και έχει ύψος 14m (Σχ. 1). Τα φορτία ασκούνται στις διαδοκίδες και μεταφέρονται εν συνεχεία στις κύριες δοκούς του καταστρώματος. Η κατασκευή αναλύθηκε υπο την επίδραση μόνιμων και κινητών κατακόρυφων δράσεων ($g=1,0\text{kN/m}^2$ και $q=5,0\text{kN/m}^2$ αντίστοιχα), για συνδυασμούς φορτίσεων σε καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας σύμφωνα με τις εξισώσεις (1), (2) [4,5,6].

$$1,35 \cdot g + 1,50 \cdot q \quad (1)$$

$$1,00 \cdot g + 1,00 \cdot q \quad (2)$$



Σχ. 1 Πρόσπονη πεζογέφυρα και προσομοίωμα



Σχ. 2 Διατομή καταστρώματος

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

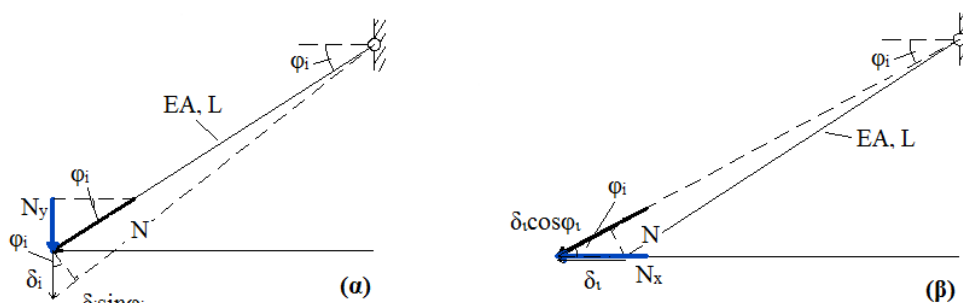
Κατασκευάστηκαν συνολικά έξι τρισδιάστατα στατικά προσομοιώματα πεζογεφυρών μεταβάλλοντας τον τύπο καλωδίωσης (ακτινική, παράλληλη και κρεμαστή) ή το συνολικό ύψος του πυλώνα. Η μέθοδος ανάλυσης και διαστασιολόγησης της κάθε πεζογέφυρας βασίστηκε σε μια τυπική διαδικασία που εφαρμόζεται σε τέτοιες περιπτώσεις [1]:

1. Σταδιακή προεκτίμηση διατομών καταστρώματος και καλωδίων μέσω γραμμικής ανάλυσης, με την επιβολή μόνο των μόνιμων φορτίων και με ενσωμάτωση ακλόνητων στηρίξεων στις θέσεις των καλωδίων και της κορυφής του πυλώνα.
2. Αντικατάσταση των ακλόνητων στηρίξεων του καταστρώματος με ελατήρια και επανεκτίμηση των διατομών του καταστρώματος. Λόγω της κλίσης των καλωδίων χρησιμοποιήθηκαν τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια ελατήρια με δυσκαμψία που υπολογίστηκε σύμφωνα με τις εξισώσεις (3), (4). Οι σχέσεις προκύπτουν από επιβολή κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων στο άκρο του καλωδίου και θεωρώντας ισορροπία στην παραμορφωμένη γεωμετρία αυτού, όπως φαίνεται στα Σχ. 3(α)-(β) [1].

$$\kappa_{yi} = (EA_i/L_i)\sin^2\varphi_i \quad (3)$$

$$\kappa_{xi} = (EA_i/L_i)\cos^2\varphi_i \quad (4)$$

3. Ενσωμάτωση των καλωδίων στο προσομοίωμα και πραγματοποίηση μη γραμμικής ανάλυσης. Η προένταση εισήχθη στα καλώδια μέσω διαφοράς θερμοκρασίας, ενώ στόχος του μεγέθους της προέντασης στο στάδιο αυτό, ήταν ο μηδενισμός των βελών του καταστρώματος στις θέσεις των καλωδίων υπό την επίδραση μόνιμων φορτίων.
4. Ολοκληρωμένη προσομοίωση της πεζογέφυρας αντικαθιστώντας στο προηγούμενο προσομοίωμα την ακλόνητη στήριξη, με τον πυλώνα και τα καλώδια αντιστήριξης. Σε αυτό το βήμα πραγματοποιείται επιβολή κατάλληλων προεντάσεων στα καλώδια, ώστε να ισχύει ο στόχος του 2^{ου} βήματος, καθώς και οι περιορισμοί που επιβάλλονται κανονιστικά για κατάσταση λειτουργικότητας, σε ότι αφορά τόσο τα βέλη του καταστρώματος όσο και τη μετακίνηση της κορυφής του πυλώνα.
5. Έλεγχος των διατομών του φορέα σε οριακή κατάσταση αστοχίας [2], [3], καθώς και έλεγχος ικανοποιητικής λειτουργίας των καλωδίων. Σε περίπτωση αστοχίας ακολουθείται επαναληπτικά η ίδια διαδικασία με αντικατάσταση των διατομών των στοιχείων που δεν επαρκούν.



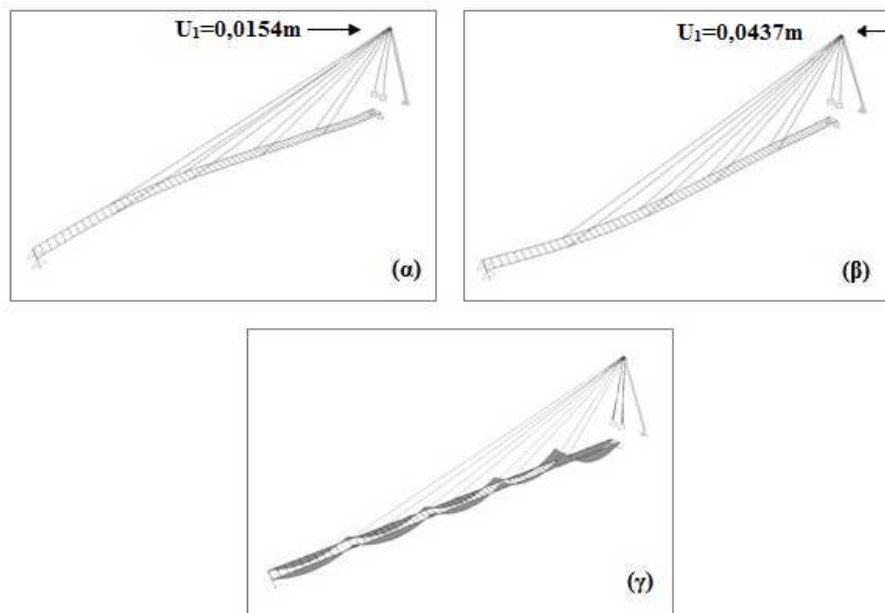
Σχ. 3 (α) Κατακόρυφη παραμόρφωση καλωδίου υπό ένταση, (β) οριζόντια παραμόρφωση καλωδίου υπό ένταση.

Η επιβολή των φορτίων σε κάθε προαναφερθείσα περίπτωση έγινε σε δύο φάσεις προκειμένου να ληφθούν υπόψη μη γραμμικά φαινόμενα που καθιστούν τη χρήση της αρχής της επαλληλίας αδύνατη:

1^η Φάση: Επιβολή μόνιμων φορτίων και προέντασης καλωδίων υπό αρχική κατάσταση μηδενικής παραμόρφωσης.

2^η Φάση: Επιβολή επιπρόσθετων μόνιμων και κινητών φορτίων χρησιμοποιώντας ως αρχική κατάσταση την τελική της 1^{ης} φάσης.

Στο Σχ. 4(α) διακρίνεται η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα με το στατικό σύστημα της πρότυπης πεζογέφυρας υπό την επίδραση μόνιμων φορτίων και προέντασης σε κατάσταση λειτουργικότητας. Διακρίνεται η μικρή ανύψωση της πεζογέφυρας. Η εφαρμογή επιπρόσθετα των κινητών φορτίων οδηγεί σε αλλαγή της κλίσης του πυλώνα, ενώ τα βέλη των κύριων δοκών του καταστρώματος έχουν τιμές που κυμαίνονται μέσα στα όρια λειτουργικότητας (Σχ 4(β)). Το διάγραμμα ροπών του καταστρώματος (Σχ. 4(γ)) έχει τη μορφή διαγράμματος ροπών δοκού πολλών ανοιγμάτων με ελαστικές στηρίξεις, που είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρατηρείται επίσης η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των πιο κατακόρυφων καλωδίων.



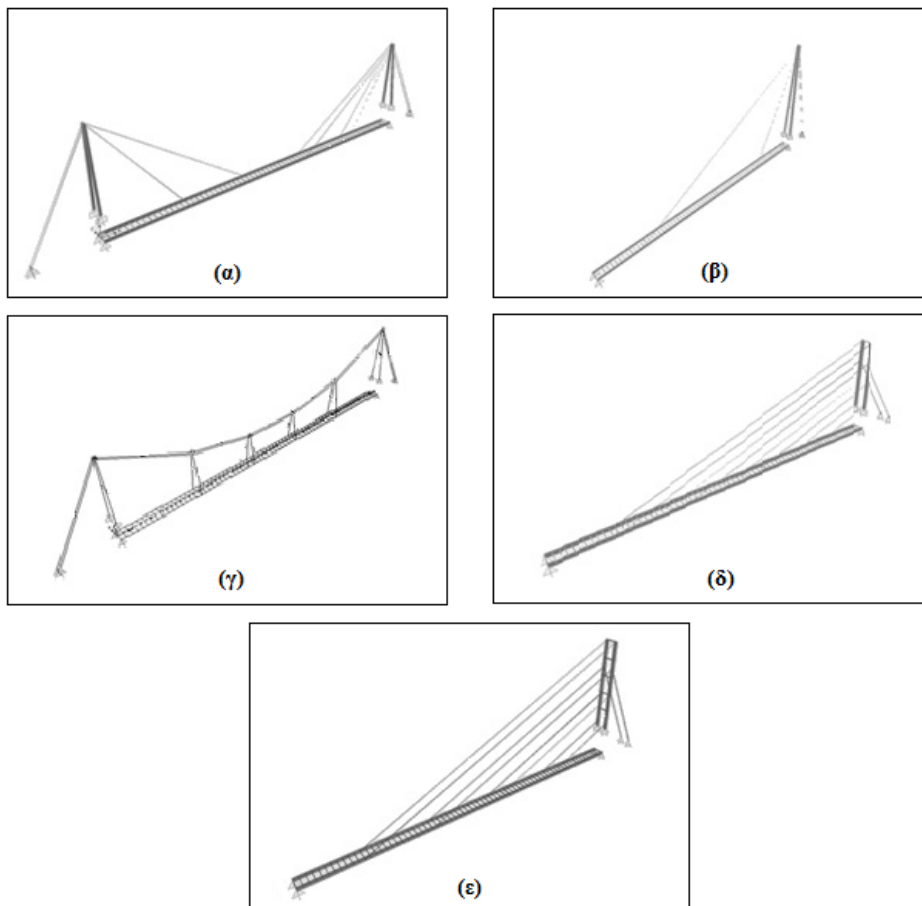
Σχ. 4 Πρότυπη πεζογέφυρα (α) Παραμορφωμένη κατάσταση υπό μόνιμα φορτία και προένταση, (β) Τελική παραμορφωμένη κατάσταση, (γ) Διάγραμμα ροπών σε οριακή κατάσταση αστοχίας.

4. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Πέραν του πρότυπου στατικού προσομοιώματος (Σ1) εξετάστηκαν 5 εναλλακτικά στατικά συστήματα πεζογεφυρών που συνοψίζονται στα εξής:

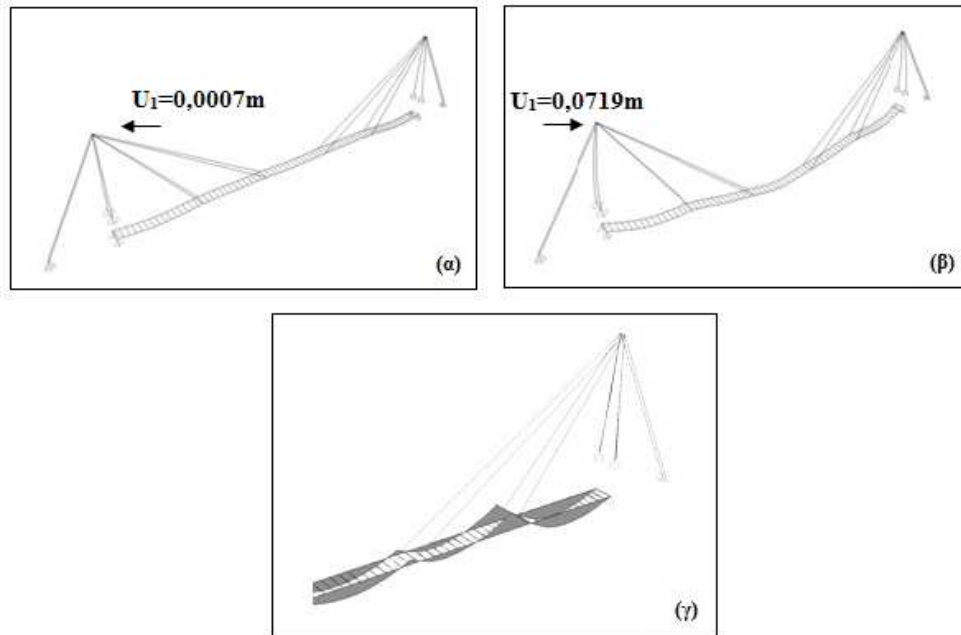
- Σύστημα συμμετρικού φορέα με 2 πυλώνες (Σ2) (Σχ. 5(α)): Προσομοίωμα με δύο όμοιους πυλώνες στα ακρόβαθρα (B1, B2). Στην κεφαλή κάθε πυλώνα αγκυρώνονται δύο ζεύγη καλωδίων ανάρτησης και μία συστοιχία καλωδίων αντιστήριξης. Επιτυγχάνεται κατ'αυτόν τον τρόπο η αντικατάσταση των καλωδίων που υπολειπονται λόγω μικρής κλίσης και μεγάλου μήκους στην πρότυπη πεζογέφυρα και συνεπώς γίνεται εφικτή η χρήση μικρότερων δυνάμεων προέντασης.

- ii) Σύστημα με μεγαλύτερο ύψος πυλώνα ($\Sigma 3$) (Σχ. 5(β)): Προσομοίωμα φορέα όμοιου με αυτόν της πρότυπης πεζογέφυρας, αλλά με διπλάσιο περίπου ύψος πυλώνα ($h=30m$). Κατ'αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η απόκριση των καλωδίων λόγω αύξησης της κλίσης τους.
- iii) Σύστημα κρεμαστής πεζογέφυρας ($\Sigma 4$) (Σχ. 5(γ)): Προσομοίωμα φορέα στο οποίο χρησιμοποιούνται αναρτήρες καταστρώματος με σχεδόν κατακόρυφη κλίση και συνεπώς βέλτιστη λειτουργία. Οι αναρτήρες στηρίζονται από ζεύγος κύριων καλωδίων που συγκρατώνται στις κεφαλές δύο όμοιων πυλώνων στα άκρα της πεζογέφυρας ύψους 14m.
- iv) Σύστημα παράλληλης καλωδίωσης ($\Sigma 5a$) (Σχ. 5(δ)): Το κατάστρωμα αναρτάται από κεκλιμένα ζεύγη καλωδίων παράλληλα μεταξύ τους, ενώ ο πυλώνας είναι τύπου "H" και ύψους 14m. Η σταθερή κλίση των καλωδίων οδηγεί σε υπο-εκμετάλλευση της διατομής τους και απαιτήθηκε χρήση συστοιχίας καλωδίων για τη βελτίωση της απόκρισης.
- v) Σύστημα παράλληλης καλωδίωσης ($\Sigma 5b$) (Σχ. 5(ε)): Όμοιο προσομοίωμα με το (iv) έχοντας ύψος πυλώνα 20,5m προκειμένου να αυξηθεί η κλίση των καλωδίων, κάτι το οποίο δεν οδήγησε σε ουσιαστική βελτίωση της στατικής συμπεριφοράς. Λόγω μεγάλου ύψους του πυλώνα, τοποθετήθηκαν εγκάρσιες δοκοί ανά 4m καθ' ύψος του για μείωση του κινδύνου εμφάνισης λυγισμού.



Σχ. 5 (α) Σύστημα συμμετρικού φορέα με 2 πυλώνες, (β) Σύστημα πεζογέφυρας με πυλώνα μεγαλύτερου ύψους, (γ) Σύστημα κρεμαστής πεζογέφυρας, (δ) Σύστημα παράλληλης καλωδίωσης με ύψος πυλώνα $h=14m$, (ε) Σύστημα παράλληλης καλωδίωσης με ύψος πυλώνα $h=20,5m$.

Η στατική απόκριση του Σ2 φαίνεται στο Σχ. 6 από όπου φαίνεται η ικανοποιητική λειτουργία των καλωδίων.

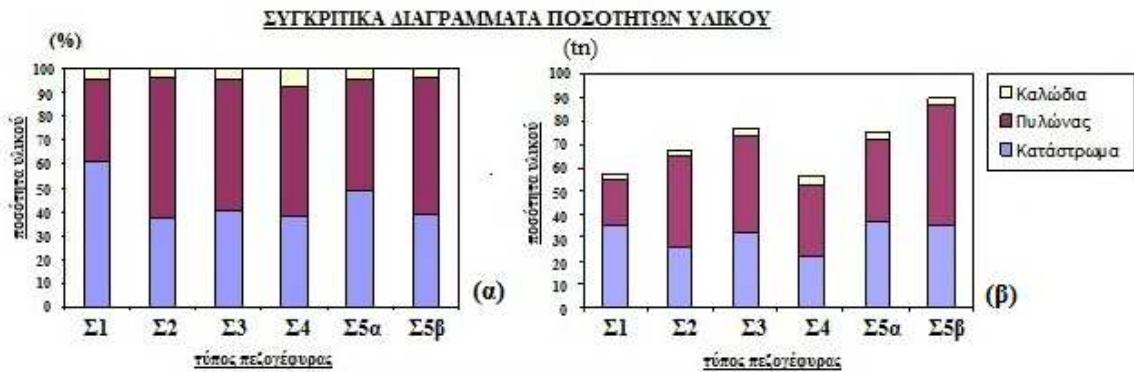


Σχ. 6 Εναλλακτική λύση πεζογέφυρας με συμμετρικό φορέα (α) Παραμορφωμένη κατάσταση υπό μόνιμα φορτία και προένταση, (β) Τελική παραμορφωμένη κατάσταση, (γ) Διάγραμμα ροπών (εικόνα μισού φορέα) σε κατάσταση αστοχίας.

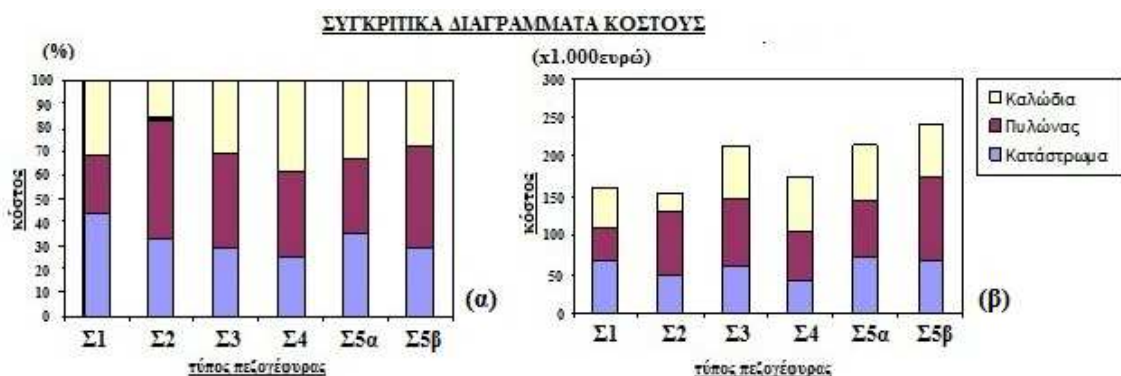
5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα Σχ. 7 και 8 φαίνονται συγκριτικά τα διαγράμματα των ποσοτήτων του υλικού και του κόστους αντίστοιχα, των εναλλακτικών λύσεων που εξετάστηκαν. Για τον υπολογισμό του κόστους θεωρήθηκε για χάλυβα S235 κόστος ίσο με 2€/kg, ενώ οι τιμές των καλωδίων υπολογίστηκαν ανά τεμάχιο συμπεριλαμβάνοντας το συνολικό μήκος και τις απολήξεις. Το κόστος της επικάλυψης και των αγκυρώσεων των καλωδίων αγνοήθηκε. Παρατηρείται ότι το βάρος των καλωδίων φτάνει μόλις το 5-7% της ποσότητας του χάλυβα της κατασκευής ενώ το κόστος τους αγγίζει το 40% του συνολικού κόστους.

Η Σ2 αποτελεί τη βέλτιστη οικονομικά λύση με προϋπολογισμό λίγο μικρότερο της πρότυπης. Η Σ4, αν και γενικά ενδείκνυται για γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων, έχει συγκρίσιμο κόστος με την πρότυπη πεζογέφυρα. Οδήγησε στη χρήση της μικρότερης ποσότητας υλικού αλλά το κόστος του κυρίου καλωδίου έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην αύξηση του προϋπολογισμού. Στη Σ3 η βελτίωση της κλίσης και συμπεριφοράς των καλωδίων δεν αντισταθμίζει το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ύψος του πυλώνα οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις διατομής για την αντιμετώπιση του κινδύνου λυγισμού. Τα στατικά συστήματα Σ5α και Σ5β αποτελούν τις δυσμενέστερες λύσεις λόγω της σταθερής κλίσης των καλωδίων, ενώ η απαραίτητη χρήση διπλών καλωδίων ανάρτησης αυξάνει το κόστος.



Σχ. 7 (α) Συγκριτικό διάγραμμα ποσοτήτων υλικών των στοιχείων των πεζογεφυρών (%), (β) Συγκριτικό διάγραμμα ποσοτήτων υλικών των στοιχείων των πεζογεφυρών.



Σχ. 8 (α) Συγκριτικό διάγραμμα κόστους υλικών των στοιχείων των πεζογεφυρών (%), (β) Συγκριτικό διάγραμμα κόστους υλικών των στοιχείων των πεζογεφυρών.

Ευχαριστούμε θερμά τους κ.κ. Σ. Ραυτόπουλο και Π. Μαμάκο της εταιρείας ΕΛΕΜΚΑ Α.Ε. για την πολύτιμη βοήθειά τους στην παροχή οικονομικών στοιχείων για τα καλώδια και τα ακραία τους τεμάχια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γαντές Χ., «Σημειώσεις για το μεταπτυχιακό μάθημα του ΕΜΠ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ».
- [2] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., «Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα», Κλειδάριθμος, 2005.
- [3] Βάγιας Ι., «Σιδηρές Κατασκευές: Ανάλυση και διαστασιολόγηση», Κλειδάριθμος, 2003.
- [4] Ερμόπουλος Ι., «Σιδηρές και σύμμικτες γέφυρες», Κλειδάριθμος, 2000.
- [5] CEN, European Committee for Standardisation (2004), "EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1: General Rules", Brussels
- [6] CEN, European Committee for Standardisation (2004), "EN 1993-2: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 2: Bridges", Brussels

COMPARISON BETWEEN ALTERNATIVE STRUCTURAL SYSTEMS FOR CABLE-SUPPORTED BRIDGES

Eleftheria E. Gkagka

Civil Engineer NTUA, MSc NTUA

Athens, Greece

e-mail: elgkagka@gmail.com

Konstantinos E. Kalochairetis

Civil Engineer NTUA, MSc Imperial College, PhD Student

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: kalkostis@hotmail.com

Charis J. Gantes

Associate Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

SUMMARY

Cables are elements submitted to uni-axial tension. Due to this property, the stress distribution over the cross section of the element is uniform, there is full exploitation of the strength of the material and the danger of buckling is eliminated. In general, they exhibit rather flexible behavior but their stiffness increases under tension. Thus, in order to take advantage of this particular behavior, pre-stress is commonly applied. Cables are often used to support the deck of long span bridges during the construction stages and the lifetime of the structure. Nowadays, cable-stayed bridges in urban areas have become a viable solution for the construction of pedestrian bridges. The results offered by such tensile structures combine aesthetic appearance, safety, erection speed and economy, in such a way that they become particularly competitive in the modern construction field.

The objective of this article is to examine alternative structural systems of a cable-stayed pedestrian bridge with a certain span under the application of vertical static loads. The alternative structural models are analyzed under serviceability and ultimate limit states and compared between each other as far as the quantity of material and final cost are concerned. The bridge with two pylons and radial cable arrangement is found to be the optimum solution.