

ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΞΙ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΕ ΒΑΣΙΚΟΥΣ ΑΞΟΝΕΣ ΤΟΥ ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ

Νέστορας Λουκάτος

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Ν.Λουκάτος & Συνεργάτες ΑΕΜ

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: info@loukatos.com

Ηλίας Κρητικός

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc ΕΜΠ

Ν.Λουκάτος & Συνεργάτες ΑΕΜ

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: kritcv99@yahoo.com

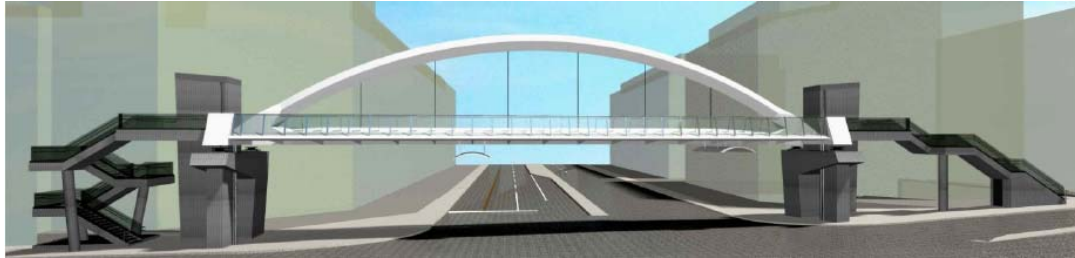
1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η μελέτη έξι νέων πεζογεφυρών που πρόκειται να κατασκευαστούν σε βασικούς άξονες του λεκανοπεδίου Αττικής. Πρόκειται για τοξωτούς μεταλλικούς φορείς με σύμμεικτο κατάστρωμα και αναρτήρες. Παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν την γενική γεωμετρία και μόρφωση του φέροντος οργανισμού των φορέων, την προσομοίωσή τους και τα ειδικά θέματα μελέτης που αντιμετωπίστηκαν, όπως οι μελέτες των κόμβων και η μελέτη των ταλαντώσεων της γέφυρας έναντι διέλευσης πεζών.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όσον αφορά την ανωδομή των γεφυρών, μελετήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι φορέων. Ο πρώτος τύπος (Φωτ. 1, 2 & Σχ. 1) ο οποίος πρόκειται να εφαρμοστεί σε τέσσερις θέσεις (Λ. Κηφισίας & Πανόρμου, Λ. Ποσειδώνος & Λ. Καλαμακίου, Λ. Μεσόγειων, Λ. Αθηνών-σχολές Προβατά), έχει άνοιγμα μεταξύ στηρίξεων 43,5m και αποτελείται από μονό κυκλικό τόξο και ελκυστήρα κοίλης συγκολλητής τετράγωνης διατομής, εξωτερικών διαστάσεων 900mm και πάχους ελασμάτων 20mm, στραμμένης κατά 45°, που συνδέονται μεταξύ τους μέσω 6 καλωδίων τύπου PFEIFER PV115. Επί της διατομής του ελκυστήρα στηρίζονται υπό τη μορφή προβόλου εγκάρσιες δοκοί μεταβλητής τραπεζοειδούς διατομής με το συνολικό ύψος της διατομής και το πλάτος του πάνω πέλματος να αυξάνονται προς τον ελκυστήρα, οι οποίες μορφώνονται μέσω 4 ελασμάτων με κεκλιμένους τους κορμούς. Στη συμβολή τόξου ελκυστήρα, κατασκευάζονται δύο κιβωτοειδείς ακραίες εγκάρσιες

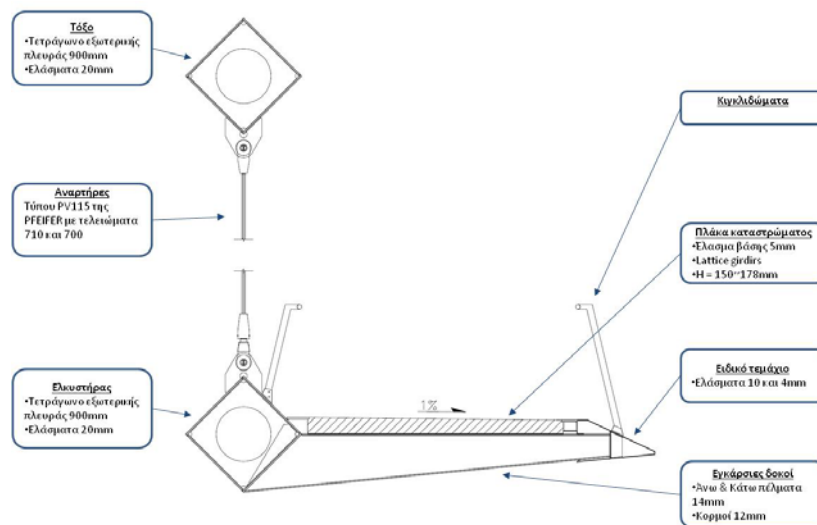
δοκοί εξωτερικών διαστάσεων 1500x636mm, πάχους ελασμάτων 40mm για τα πέλματα και 30mm για τους κορμούς, κάτω από τις οποίες τοποθετούνται 4 εφένδρανα σφαιρικού τύπου. Επί των εγκάρσιων και ακραίων δοκών στηρίζεται η πλάκα καταστρώματος ελάχιστου πάχους 150mm. Το μέγιστο ύψος μεταξύ τόξου και ελκυστήρα επιλέχθηκε 7m.



Φωτ. 1 Φωτορεαλιστική απεικόνιση φορέα μονού τόξου: Όψη



Φωτ. 2 Φωτορεαλιστική απεικόνιση φορέα μονού τόξου: Τρισδιάστατη άποψη



Σχ. 1 Τυπική τομή σε θέση αναρτήρα

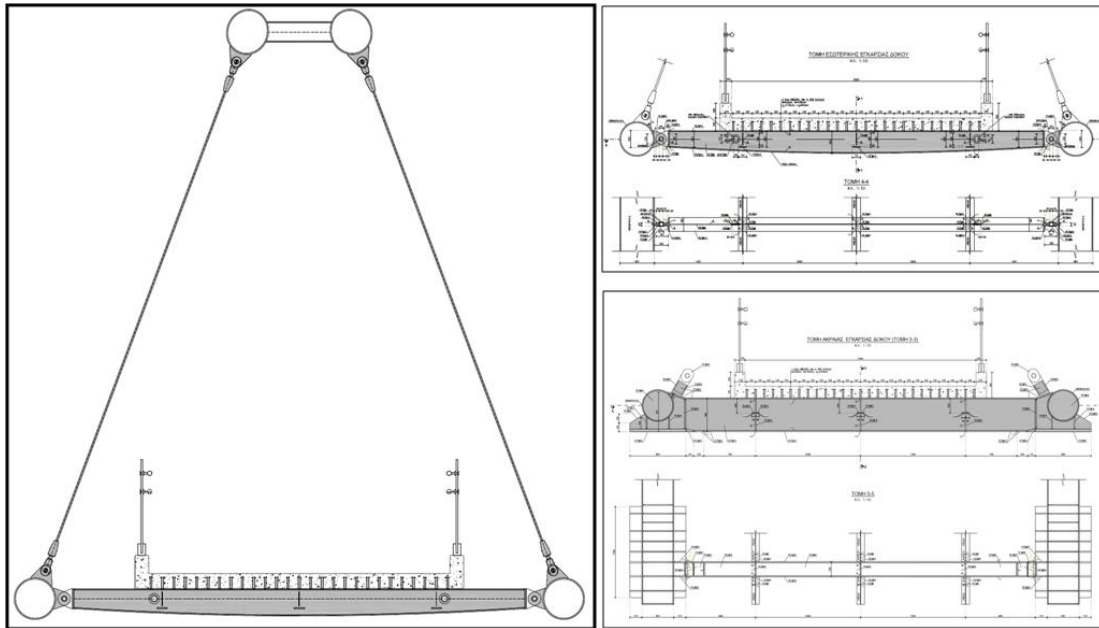
Ο δεύτερος τύπος (Φωτ. 3, 4 & Σχ. 2) ο οποίος πρόκειται να εφαρμοστεί σε δύο θέσεις (Λ. Αθηνών-Παλατάκι, Λ. Ποσειδώνος & Αφροδίτης), έχει άνοιγμα μεταξύ στηρίξεων 57μ και αποτελείται από δύο συμμετρικά παραβολικά τόξα κυκλικής διατομής CHS 457x14,2 τα οποία αποκλίνουν κατά 20° ως προς την κατακόρυφο και τέμνονται μεταξύ τους σε δύο σημεία. Τα τόξα συνδέονται μεταξύ τους με εγκάρσια στοιχεία CHS 219,1x10. Χρησιμοποιούνται ελκυστήρες διατομής CHS 457x14,2 οι οποίοι συνδέονται με τα τόξα στα άκρα τους και εσωτερικά μέσω 9 ζευγών κεκλιμένων καλωδίων PFEIFER PV40. Το μέγιστο ύψος μεταξύ τόξων και ελκυστήρων επιλέχθηκε 10m. Επί των ελκυστήρων στηρίζονται αμφιαρθρωτές εγκάρσιες δοκοί μορφής διπλού T μεταβλητού ύψους από 220 έως 300mm, επί των οποίων στηρίζονται διαμήκεις διαδοκίδες διατομής IPE220. Πάνω στην εσχάρα εγκάρσιων και διαμήκων δοκών τοποθετείται πλάκα καταστρώματος συνολικού πάχους 160mm. Στη βάση του καταστρώματος τοποθετούνται διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Στα άκρα τοποθετούνται κιβωτοειδείς εγκάρσιες δοκοί κάτω από τις οποίες τοποθετούνται τα εφέδρανα. Για τον περιορισμό ταλαντώσεων υπό τη διέλευση πεζών προβλέπεται η τοποθέτηση ταλαντούμενων μαζών (TMDs).



Φωτ. 3 Φωτορεαλιστική απεικόνιση φορέα διπλού τόξου: Όψη



Φωτ. 4 Φωτορεαλιστική απεικόνιση φορέα διπλού τόξου: Τρισδιάστατη άποψη



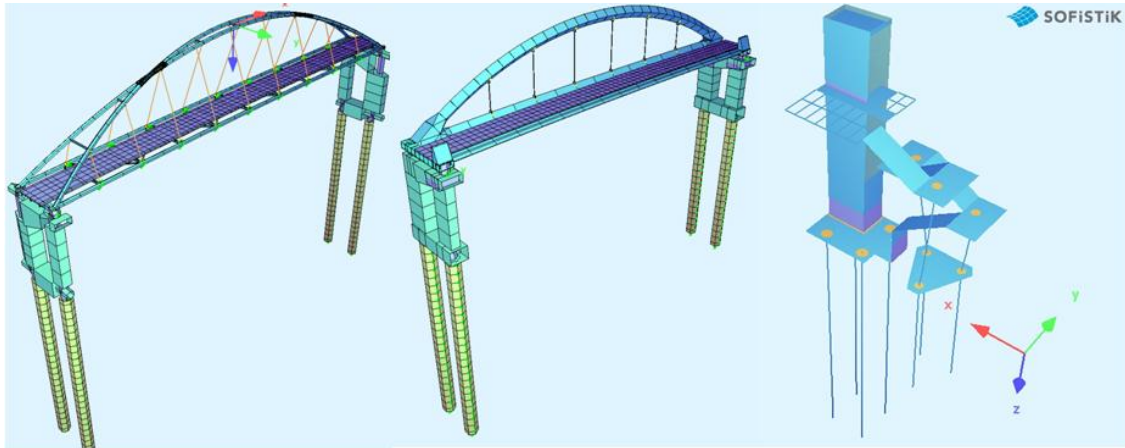
Σχ. 2 Τυπικές τομές σε θέσεις εσωτερικής και εξωτερικής εγκάρσιας δοκού

Οι γέφυρες στηρίζονται σε δίστηλα βάθρα τα οποία θεμελιώνονται στο έδαφος μέσω πασσάλων. Τα κλιμακοστάσια πρόσβασης στη γέφυρα επιλέχθηκαν στατικά ανεξάρτητα από τους κύριους φορείς της γέφυρας για την απλοποίηση και σαφήνεια των στατικών συστημάτων. Τόσο στα βάθρα όσο και στις κατασκευές πρόσβασης δόθηκαν κατάλληλες μορφές για την ανάδειξη του φορέα της γέφυρας και της κατασκευής ως σύνολο ώστε αυτές να αποτελέσουν ένα τοπόσημο για την ευρύτερη περιοχή.

Η επιλογή του υλικού του καταστρώματος και του τύπου των εφεδράνων της γέφυρας έγινε με κριτήριο την εξασφάλιση πιθανού εύρους ιδιοσυχνοτήτων της γέφυρας στην οριζόντια διεύθυνση, λαμβανομένων υπόψη όλων των πιθανών διακυμάνσεων των παραμέτρων σχεδιασμού που τις επηρεάζουν (ακαμψίες στοιχείων, στερεοί κόμβοι, ακαμψία εδάφους, συμβολή μάζας πεζών κλπ), που να μην επιτρέπει την πιθανότητα συντονισμού κατά την οριζόντια διεύθυνση κατά την διέλευση των πεζών (lock in effect).

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

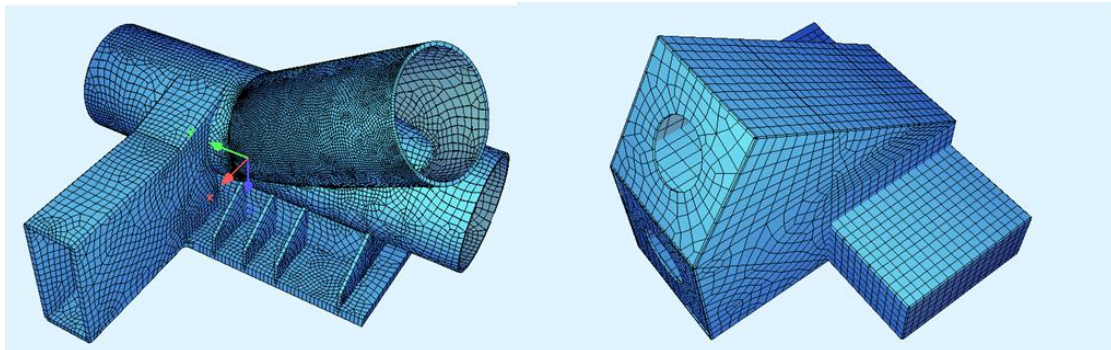
Για την προσομοίωση των κατασκευών χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά SOFISTIK και SAP. Για την βασική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι Ευρωκώδικες ενώ για την μελέτη ταλάντωσης λόγω της διέλευσης των πεζών χρησιμοποιήθηκαν οι οδηγίες SETRA [1]. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά προσομοιώματα όσον αφορά των τύπο των στοιχείων του καταστρώματος (εσχάρα δοκών ή shell elements). Επιπλέον προκειμένου να καλυφθεί κάθε αβεβαιότητα λήφθηκε υπόψη η πιθανή διακύμανση τιμών της ακαμψίας κάθε στοιχείου σκυροδέματος και του εδάφους. Κάθε φόρτιση επιβλήθηκε στο μοντέλο που αντιστοιχεί στην εκάστοτε φάση κατασκευής.



Φωτ. 5 Μοντέλα σχεδιασμού

4. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

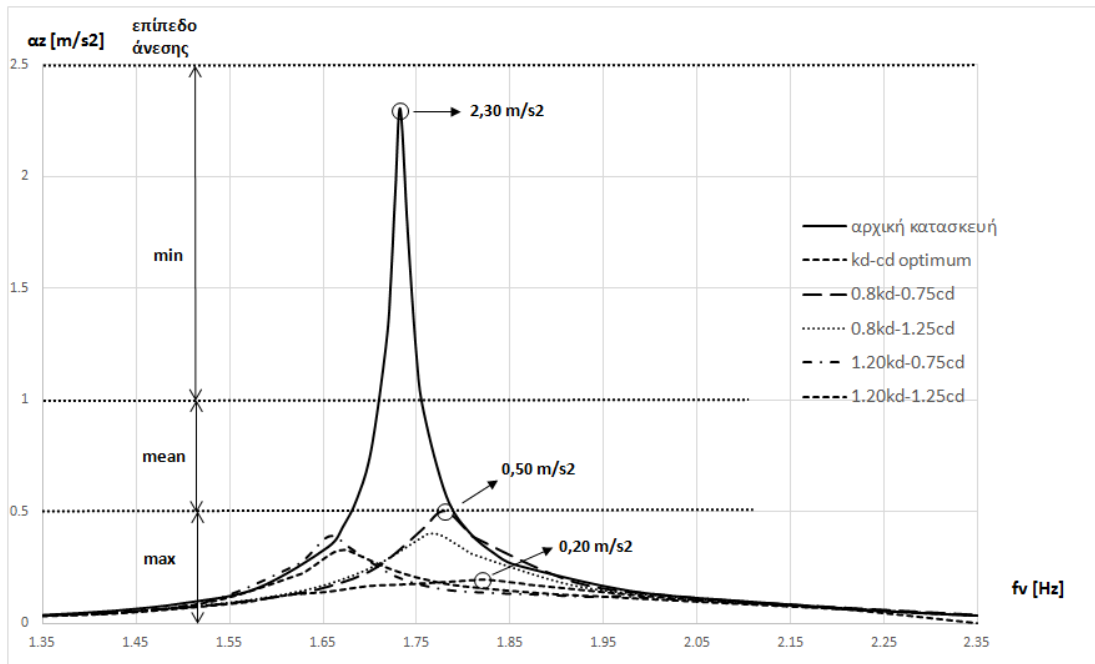
Η μελέτη περιελάμβανε σημαντικά επιμέρους θέματα όπως ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού των τόξων και άλλων θλιβόμενων στοιχείων, μη γραμμική ανάλυση 2ας τάξης με αρχικές ατέλειες, ακριβής μελέτη κύρτωσης λεπτότοιχων ελασμάτων περίπλοκης γεωμετρίας για τις πραγματικές φορτίσεις, μελέτες πολύπλοκων κόμβων (Φωτ. 6), και μελέτη δυναμικής ταλάντωσης υπό τη διέλευση πεζών.



Φωτ. 6 Μοντέλα κόμβων

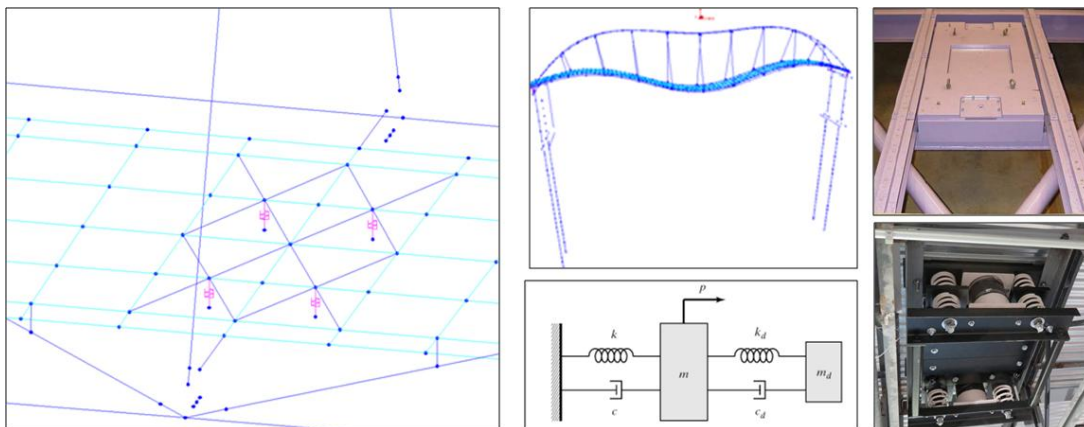
Ειδικά στις γέφυρες διπλού τόξου, απαιτήθηκε η προσθήκη ταλαντούμενων μαζών. Συγκεκριμένα οι γέφυρες παρουσίασαν ιδιομορφή της τάξης των 1,7 Hz (Φωτ.7), εντός δηλαδή του εύρους τιμών υψηλού ρίσκου συντονισμού 1,7 έως 2,1 Hz κατά SETRA [1], για την οποία υπολογίστηκε μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση της γέφυρας $2,30 \text{ m/s}^2$ στο μέσο του καταστρώματος για ταλάντωση που προκαλείται από αριθμό 0,6 πεζοί/ m^2 , αρκετά μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη 1 m/s^2 . Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε η τοποθέτηση 4 συσκευών ταλαντούμενων μαζών (λόγω γεωμετρικών περιορισμών) συνολικού βάρους 1000kg στο μέσο του καταστρώματος, σημείο που ταυτίζεται με την θέση μέγιστης τιμής κατακόρυφης βύθισης του σχήματος της κρίσιμης ιδιομορφής. Η συνολική μάζα των ταλαντούμενων μαζών αντιστοιχεί περίπου στο 2% της τιμής της ιδιομορφικής μάζας της κατασκευής όπως αυτή υπολογίζεται για τα αδιάστατα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ιδιομορφή ($\varphi_n^T M \varphi_n$). Οι βέλτιστες παράμετροι σχεδιασμού των TMDs υπολογίστηκαν κατά Den-Hartog [2]. Η μέγιστη εμφανιζόμενη επιτάχυνση για τις βέλτιστες παραμέτρους σχεδιασμού ακαμψίας και

σταθεράς απόσβεσης των TMDs (k_d & c_d optimum values) μειώθηκε σε $0,20 \text{ m/s}^2$. Ωστόσο οι πρόσθετες αναλύσεις για πιθανή απόκλιση τιμών $\pm 20\%$ για την ακαμψία k_d και $\pm 25\%$ για την σταθερά απόσβεσης c_d των TMDs είχαν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μέγιστης επιτάχυνσης $0,50 \text{ m/s}^2$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί ακριβώς στο όριο μέγιστου και μέσου επιπέδου άνεσης των πεζών και είναι σαφώς χαμηλότερη από την τιμή 1 m/s^2 που είχε τεθεί αρχικά ως όριο και επομένως ο σχεδιασμός της γέφυρας όσον αφορά το επίπεδο άνεσης πεζών μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστος. Όλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται στο γράφημα που ακολουθεί, όπου απεικονίζεται η μέγιστη επιτάχυνση στο μέσο του καταστρώματος υπό τη διέλευση πεζών που διέρχονται με συχνότητα διεγέρσεως f_v , για την κατασκευή πριν και μετά την τοποθέτηση των TMDs, λαμβανομένης υπόψη της διακύμανσης των παραμέτρων k_d και c_d (Σχ. 3).



Σχ. 3 Διάγραμμα επιτάχυνσης μέσου καταστρ. για διάφορες τιμές συχνότητας διεγέρσεως

Για την ανάλυση των ταλαντώσεων υπό τη διέλευση πεζών, χρησιμοποιήθηκε αναλυτικό πολυβάθμιο προσομοίωμα του οποίου η συμπεριφορά επιβεβαιώθηκε μέσω απλούστερων προσομοιωμάτων 2 βαθμών ελευθερίας (Φωτ. 7).



Φωτ. 7 Προσομοιώματα ανάλυσης φορέων με TMDs και φωτογραφίες τυπικών TMDs

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι τελικές παράμετροι ακαμψίας και σταθεράς απόσβεσης των τοποθετούμενων TMDs θα προκύψουν μετά από τον επιτόπου προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών των πεζογεφυρών κατά την φάση των δοκιμών – ελέγχου της κατασκευής (πραγματικές τιμές ιδιοσυχνοτήτων και λόγων απόσβεσης).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πεζογέφυρες αποτελούν κατά βάση ελαφριές κατασκευές καθώς φέρουν σχετικά μικρά ωφέλιμα φορτία. Αυτό επιτρέπει την επιλογή περισσότερων και πιο τολμηρών λύσεων σε σχέση με άλλου τύπου γέφυρες. Η στατική αφήνει χώρο στη αισθητική με αποτέλεσμα καλαίσθητες και στέρεες κατασκευές. Ωστόσο η γεωμετρική πολυπλοκότητα και η ευαισθησία των ελαφρών κατασκευών σε φαινόμενα συντονισμού αυξάνει την δυσκολία μελέτης. Κάθε τύπος γέφυρας φαίνεται να κινδυνεύει από φαινόμενα συντονισμού όταν εφαρμόζεται για συγκεκριμένα ανοίγματα. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με τη χρήση TMDs. Η προσπάθεια “ρύθμισης” των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων των γεφυρών μέσω αλλαγής της ακαμψίας των στοιχείων ή της γεωμετρίας δεν είναι δόκιμη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος καθώς οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση των κατασκευών σε σχέση με την λύση που αρχικά μελετάται. Η μελέτη ταλαντώσεων έναντι διέλευσης πεζών γίνεται σε προχωρημένο στάδιο της μελέτης. Ωστόσο από τις εμφανιζόμενες ιδιοσυχνότητες είναι εφικτό από τα σχετικά πρώιμα στάδια να εκτιμηθεί εάν θα υπάρξουν προβλήματα συντονισμού. Η τελική εκτίμηση σχετικά με την ευαισθησία ή όχι των πεζογεφυρών έναντι ταλαντώσεων και η τελική απόφαση για την χρήση μέτρων θα πρέπει να λαμβάνεται μετά το πέρας της κατασκευής και τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών τους σε συνδυασμό με επιτόπου πειραματικές μετρήσεις.

6. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Το σύνολο της μελέτης του έργου εκπονήθηκε από την εταιρεία Ν. Λουκάτος και Συνεργάτες Α.Ε.Μ. Η ομάδα μελέτης αποτελείτο από τον Νέστορα Λουκάτο Πολ. Μηχ. ΕΜΠ ως Υπεύθυνο και Συντονιστή της μελέτης, τον Ηλία Κρητικό Msc Πολ. Μηχ. ΕΜΠ ως Υπεύθυνο των Μεταλλικών Κατασκευών, τον Παναγιώτη Θεοδωρόπουλο Msc Πολ. Μηχ. ΕΜΠ ως Υπεύθυνο των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τον Σωτήρη Οικονόμου Πολ. Μηχ. ΑΠΘ ως Αναπληρωτή Συντονιστή της μελέτης και Υπεύθυνο των Τευχών Δημοπράτησης του έργου και τον Μίνωα Παταπατίου Αρχιτέκτονα Μηχανικό ΕΜΠ ως Υπεύθυνο της Αρχιτεκτονικής Μελέτης του έργου. Η συμβολή των μελών και των συνεργατών της εταιρείας υπήρξε ανεκτίμητη κατά την διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης χωρίς την συμμετοχή των οποίων θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση του έργου. Θα θέλαμε επίσης να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας και στα μέλη της Δ.Ο.Υ. (γ) που συμμετείχαν ως επιβλέποντες στο εν λόγω έργο και ήταν ο κ. Μουζάκης Νικόλαος Πολ. Μηχ. ΕΜΠ Προϊστάμενος Διευθύνουσας Υπηρεσίας Δ.Ο.Υ (γ) και την κ. Παπαθεοδώρου Μαριάνθη Πολ. Μηχ. ΕΜΠ Υπεύθυνη για το σύνολο του έργου.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] SETRA/AFGC, Footbridges: Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, October 2006.
- [2] Mechanical vibrations, J.P. Den Hartog, Mc Graw Hill, 1940, 4th edition

DESIGN FOR THE CONSTRUCTION OF SIX FOOTBRIDGES IN THE MAIN AXES OF ATHENS TOWN

Nestoras Loukatos

Civil Engineer NTUA

N. Loukatos & Associates SA

Athens, Greece

e-mail: info@loukatos.com

Ilias Kritikos

Civil Engineer NTUA, MSc NTUA

N. Loukatos & Associates SA

Athens, Greece

e-mail: kritcv99@yahoo.com

SUMMARY

This article presents the design of six new footbridges that are going to be constructed in key axes of the basin of Attica. Two different types of steel arch bridges with composite deck and cables have been designed. The first type is comprised of a single cyclic arch and a tie of square section rotated by 45°, connected with cables. The tie supports cross girders of variable section that supports the deck. In the area of the arch and tie joint, two end cross beams are constructed for the bearings placement. The second type is comprised of two symmetric parabolic inclined arches of tubular section intersecting in two points. The arches are connected with cross tubes. Ties of similar section are connected with the arches at their ends and at intermediate points with inclined cables. The ties support cross girders of double T sections with variable height that support longitudinal beams. The deck is connected with the cross and longitudinal beams. Diagonal bracings are placed below the deck. In the edges, two rectangular end cross beams are constructed for the bearings placement. Tuned mass dumpers are placed for the limitation of human induced vibrations. The bridges are supported in piers. The staircases' structural systems have been chosen to be statically independent from the main structural systems. The shapes of piers and the access structures were chosen in order to highlight the superstructures and the structure as a whole so that the bridges would become landmarks in their regions.

The key point of the design is the phenomenon of the induced human vibrations for large spans footbridges, the method of calculation and the manner of preventing the large displacements of this phenomenon according to the last knowledge in this area.