

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΩΝ

Δημήτριος Ζαχαράκης
Διπλωματούχος πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: jim_zax@yahoo.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η συγκριτική διερεύνηση διαφόρων τύπων σύμμικτων πεζογεφυρών. Η σύγκριση αφορά το σχεδιασμό και το κόστος του κάθε τύπου γέφυρας. Οι τύποι πεζογεφυρών όπου εξετάστηκαν είναι απλές αμφιέρειστες, αμφιέρειστες με σύστημα άντωσης και αμφιέρειστες με καλωδιωτή υποστήριξη, με διάφορες παραλλαγές σε κάθε τύπο. Σε όλες τις περιπτώσεις, για να είναι συγκρίσιμες οι λύσεις, εξετάστηκε φορέας κάτοψης $35 \times 8 \text{ m}^2$. Η ανάλυση και διαστασιολόγηση των φορέων έγινε για στατικά και δυναμικά φορτία (ανάλυση χρονοϊστορίας) σε ΟΚΑ και ΟΚΛ. Τα στατικά φορτία είναι τα ίδια βάρη για τα μόνιμα και ομοιόμορφο $5,0 \text{ kPa}$ για τα κινητά. Σαν δυναμικό φορτίο λήφθηκε μία ημιτονοειδής φόρτιση, όπου προσομοιώνει την καταπόνηση του φορέα λόγω συγχρονισμένου βάρδην των χρηστών της, έτσι ώστε να εξεταστεί η απόκρισή του στις αναπτυσσόμενες ταλαντώσεις (περίπτωση συντονισμού κλπ.). Τέλος γίνεται προμέτρηση και προϋπολογισμός του κάθε φορέα, σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα, όσον αφορά το σχεδιασμό και το κόστος.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

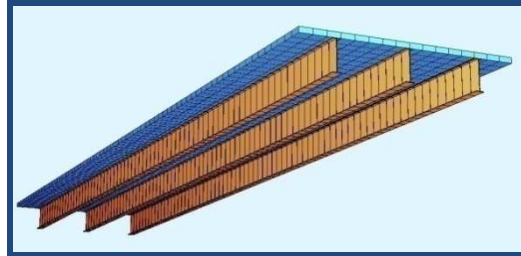
Η συνεργασία οπλισμένου σκυροδέματος και δομικού χάλυβα, προσφέρει τη δυνατότητα για τη δημιουργία των πλέον οικονομικών και κατασκευαστικά ταχείων λύσεων στις μεταλλικές κατασκευές. Η εφαρμογή της σύμμικτης λειτουργίας στις γέφυρες, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτότερων φορέων όπου καλύπτουν μεγαλύτερα ανοίγματα από ότι οι αμιγώς μεταλλικές γέφυρες.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία συγκριτική διερεύνηση διαφόρων τύπων σύμμικτων πεζογεφυρών, ξεκινώντας από απλούς και καταλήγοντας σε πιο σύνθετους φορείς, με σκοπό να εξαχθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τύπου, ως προς το σχεδιασμό και το κόστος. Προτιμήθηκε ο τύπος της γέφυρας να μην είναι οδική, λόγω των πολλών περιπτώσεων φόρτισης των κινητών φορτίων, που κανονιστικά μπορεί να είναι απαραίτητος, αλλά απαιτεί μεγάλο όγκο υπολογισμών, έστω και για τον απλούστερο φορέα.

3. ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

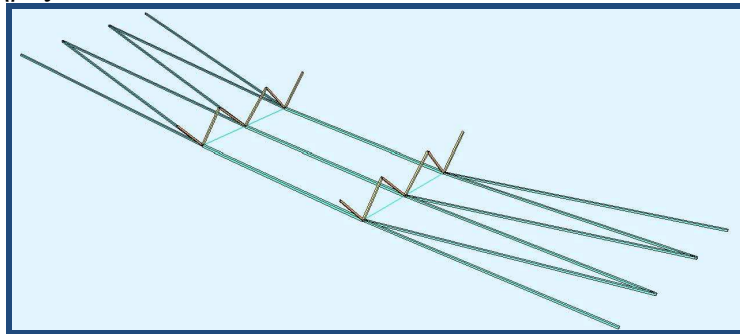
Η διερεύνηση των διαφόρων τύπων συμμίκτων πεζογεφυρών, αφορά εναλλακτικές λύσεις για την κάλυψη ενός αμφιέριστου ανοίγματος μήκους $L=35,0m$. Το πλάτος της πεζογέφυρας ορίστηκε στα $b=8,0m$. Συνοπτικά οι μορφές φορέων που εξετάστηκαν, είναι αμφιέριστες πεζογέφυρες με διαμήκεις σύμμικτες δοκούς, με σύστημα άντωσης και καλωδιωτές.

Εξετάστηκαν 4 περιπτώσεις αμφιέριστων πεζογεφυρών. Με 2,3 (Σχ. 1) και 4 σύμμικτες δοκούς. Πρόκειται για την απλούστερη των περιπτώσεων.



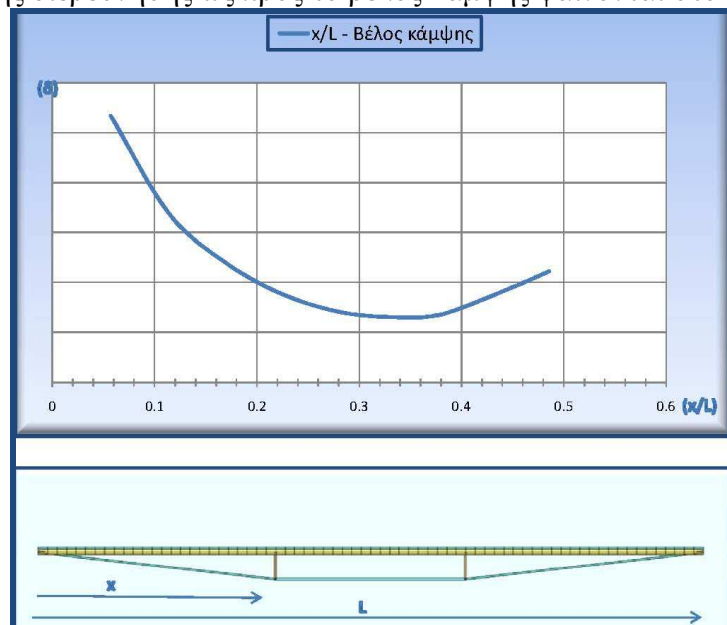
Σχ. 1. Αμφιέριστη με 3 δοκούς

Εξετάστηκαν 2 περιπτώσεις πεζογεφυρών με σύστημα άντωσης. Με 2 και 3 (Σχ. 2) κύριους ελκυστήρες.



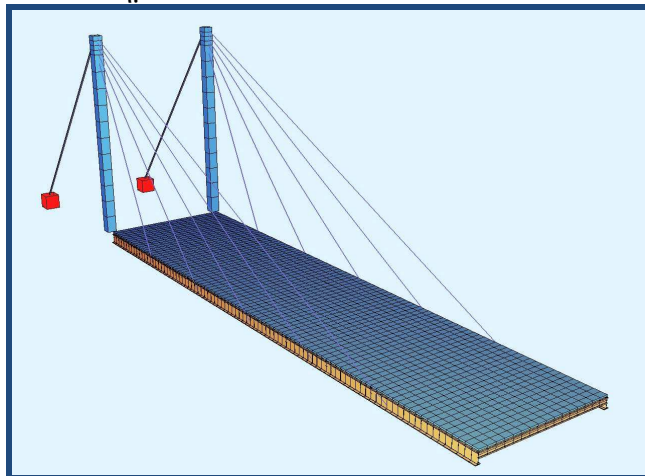
Σχ. 2. Σύστημα άντωσης με 3 κύριους ελκυστήρες

Έγινε διερεύνηση για τη θέση των ορθοστατών σε συγκεκριμένο φορέα, καθώς η σωστή τοποθέτησή τους έχει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς τη δυσκαμψία του φορέα. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης ως προς το βέλος κάμψης φαίνονται στο Σχ. 3.



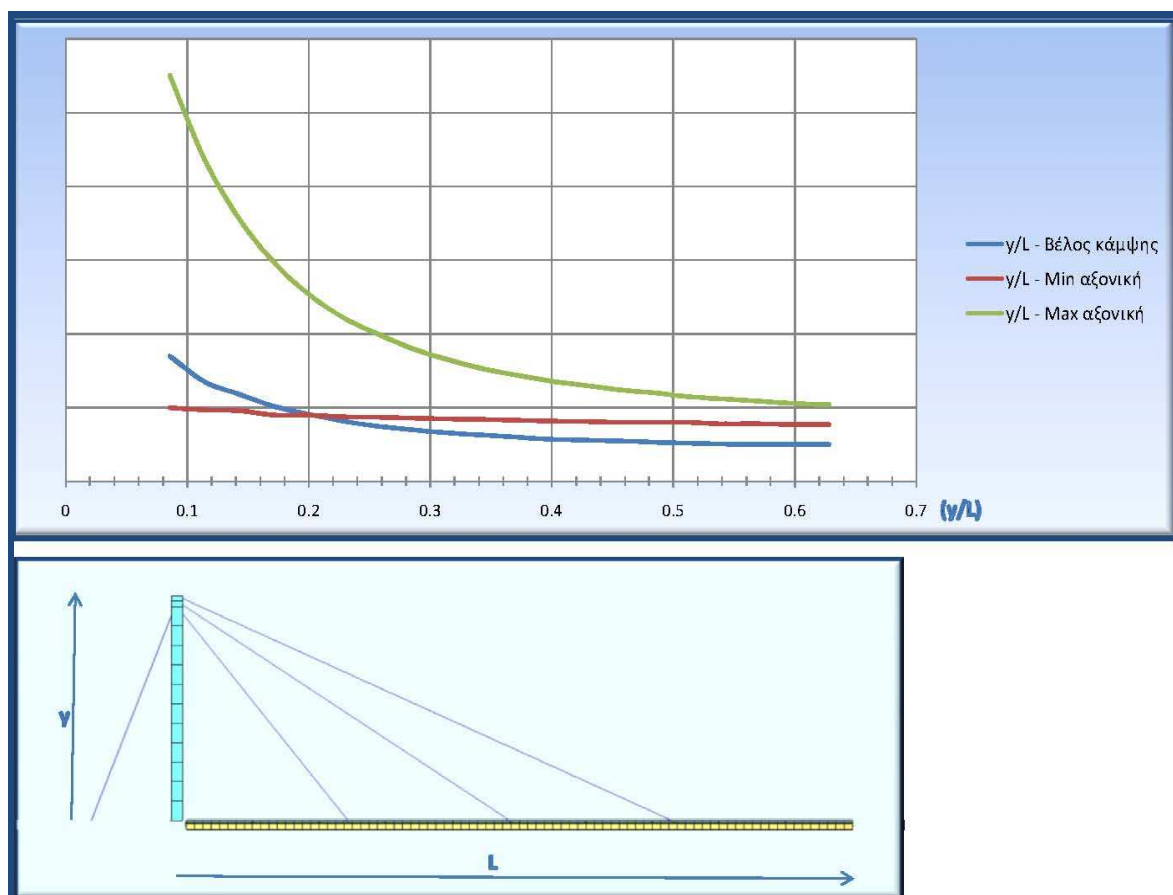
Σχ. 3. Επιρροή θέσης ορθοστατών στα αναπτυσσόμενα βέλη

Εξετάστηκαν 2 περιπτώσεις καλωδιωτών πεζογεφυρών. Με 2 και με 5 (Σχ. 4) καλώδια ανά παρειά σε ακτινικό σύστημα.



Σχ. 4 Καλωδιωτή με 5 καλώδια ανά παρειά

Το ύψος των πυλώνων είναι βασική παράμετρος ως προς την απόδοση των καλωδίων, την δυσκαμψία του φορέα, αλλά και την οικονομία των υλικών. Έγινε διερεύνηση ως προς την επιρροή του ύψους αυτών στο μέγιστο και ελάχιστο αξονικό φορτίο καλωδίων, καθώς και στα βέλη κάμψης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχ 5.



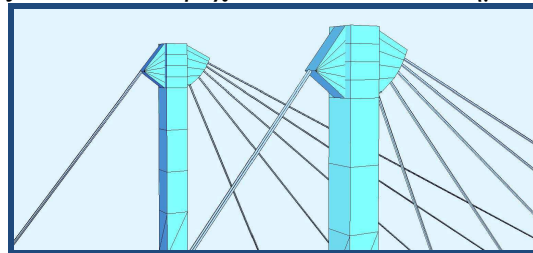
Σχ. 5 Επιρροή ύψους πυλώνων ως προς τα αναπτυσσόμενα βέλη κάμψης και την μέγιστη και ελάχιστη αξονική δύναμη των καλωδίων

Οι πυλώνες διαστασιολογούνται έναντι διαξονικής κάμψης και ορθής θλιπτικής δύναμης. Τα εντατικά μεγέθη προκύπτουν από ανάλυση με θεωρία 2ας τάξης, έτσι ώστε να ελεγχθεί

και η ευστάθειά τους. Σαν γεωμετρική ατέλεια των πυλώνων, ορίζεται μία απόκλιση από την κατακόρυφο και στις 2 διευθύνσεις (εξ. 1), σύμφωνα με τον κανονισμό, όπου l_0 το μήκος λυγισμού ανά διεύθυνση.

$$a = \frac{l_0}{100 * \sqrt{h} * 2} \text{ rad} \quad (1)$$

Στην στέψη των πυλώνων διατάσσονται ενισχύσεις (Σχ. 6) για τα καλώδια, έτσι ώστε είναι δυνατή η αγκύρωσή τους, καθότι συντρέχουν όλα στο ίδιο σημείο.



Σχ. 6. Ενισχύσεις στη στέψη των πυλώνων

Η απαιτούμενη προένταση των καλωδίων εξαρτάται κυρίως από την προβολή των καλωδίων στο οριζόντιο επίπεδο, σύμφωνα με τη εξ. (2):

$$E = \frac{E_0}{\left(1 + \frac{G^2 L^2 E_0}{12 \sigma^3}\right)} \quad (2)$$

όπου προκύπτει ένα παραβολικό διάγραμμα που τείνει ασυμπτωτικά στο ονομαστικό μέτρο ελαστικότητας E_0 .

4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ, ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ, ΦΟΡΤΙΑ

Οι φορείς σχεδιάζονται με βάση το πλέγμα των Ευρωκωδίκων και ικανοποιούν όλους τους ελέγχους έναντι αστοχίας και λειτουργικότητας.

Οι ποιότητες υλικών με τις οποίες έγινε ο σχεδιασμός των φορέων είναι:

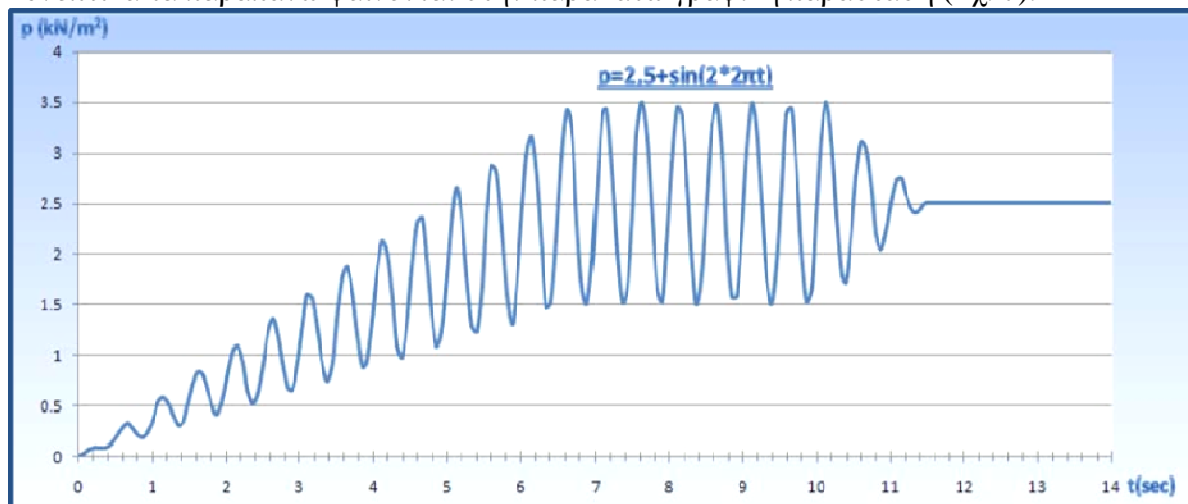
- S355 για τους κύριους φορείς της γέφυρας
- C35/45 για το σκυρόδεμα της πλάκας και των πυλώνων
- S1570/1760 για τα καλώδια ανάρτησης μέτρου ελαστικότητας $E=165\text{GPa}$
- S350 για το χαλυβδοέλασμα τραπεζοειδούς μορφής SYMDECK 73
- B500c για τον συνελκόμενο χάλυβα.

Σύμφωνα με τον EC3, εφαρμόζεται ομοιόμορφο κινητό φορτίο 5kN/m^2 . Σαν μόνιμο φορτίο λαμβάνεται μόνο το ίδιον βάρος της κατασκευής.

Για τον έλεγχο του φορέα υπό δυναμικά φορτία, έγινε ανάλυση χρονοϊστορίας (εν χρόνω ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης), κατά την οποία ο φορέας υποβάλλεται σε μία ημιτονοειδής διέγερση. Τα χαρακτηριστικά της ημιτονοειδούς διέγερσης είναι:

- Κυκλική ιδιοσυχνότητα $\omega=2\text{Hz}$, όπου αντιστοιχεί στην συχνότητα κανονικού βάρην (2 βήματα/δευτερόλεπτο)
- Βασικό ομοιόμορφο φορτίο διέγερσης $p_0=2,5\text{kN/m}^2$ με εύρος $\pm 1\text{kN/m}^2$
- Εξίσωση ημιτονοειδούς διέγερσης $p=2,5+\sin(2*2\pi t)$

Συνοπτικά τα παραπάνω φαίνονται στην παρακάτω γραφική παράσταση (Σχ. 7):



Σχ. 7 Ημιτονοειδής διέγερση

5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Για τον υπολογισμό σύμμικτων διατομών δοκών σύμφωνα με τον EC4, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό όπου συντάχθηκε με τη βοήθεια του Microsoft Office Excel από τον γράφοντα.

Για τις αναλύσεις σύνθετων φορέων για στατικά και δυναμικά φορτία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SOFiSTiK. Χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά μέλη για την προσομοίωση δοκών, πυλώνων, ελκυστήρων και καλωδίων, ενώ η προσομοίωση της πλάκας σκυροδέματος έγινε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Έγιναν αναλύσεις με θεωρία 2ας τάξης και 3ης τάξης, σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε φορέα.

Για την ανάλυση και διαστασιολόγηση σύμμικτων πλακών με το χαλυβδόφυλλο SYMDECK 73, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SymDeck Designer όπου αναπτύχθηκε στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΟΡΕΩΝ

Η μεθοδολογία σχεδιασμού για τους διαφορετικούς φορείς, ακολουθεί σε γενικές γραμμές τα εξής βήματα:

- Διάταξη κύριων δοκών και διαδοκίδων όπου υπάρχουν
- Έλεγχος σύμμικτης πλάκας σε ΟΚΛ και ΟΚΑ στη φάση λειτουργίας
- Επιλογή διατομών (σιδηρών δοκών, ορθοστατών, ελκυστήρων, καλωδίων κλπ)
- Εφαρμογή κατάλληλης προέντασης στα καλώδια (για τις καλωδιωτές γέφυρες)
- Έλεγχος διατομών στην ΟΚΛ υπό στατικά και δυναμικά φορτία
- Έλεγχος διατομών στην ΟΚΑ
- Έλεγχος ευστάθειας ορθοστατών και πυλώνων οπλισμένου σκυροδέματος (για τους φορείς με σύστημα άντωσης και καλώδια αντίστοιχα)
- Έλεγχος χαλυβδόφυλλου σε ΟΚΛ και ΟΚΑ στη φάση κατασκευής

Για τις απλές αμφιέριστες πεζογέφυρες, η διατομή των σιδηρών δοκών επιλέγεται να είναι συγκολλητή με άνισα πέλματα κατηγορίας 2, ώστε να υπάρχει μεγάλος μοχλοβραχίονας και ικανοποιητική δυσκαμψία.

Για τους φορείς με σύστημα άντωσης επιλέγονται πρότυπες διατομές για τις κύριες δοκούς και τις διαδοκίδες, καθώς ο μοχλοβραχίονας και η δυσκαμψία εξασφαλίζεται κυρίως από τη θέση των ελκυστήρων. Για τις κύριες δοκούς εφαρμόζεται πλαστική ανάλυση για ανακατανομή των ροπών από τις στηρίξεις στα ανοίγματα.

Για τις καλωδιωτές πεζογέφυρες, επιλέγονται συγκολλητές διατομών σιδηρών δοκών για τις κύριες δοκούς και πρότυπες διατομές για τις διαδοκίδες, ενώ οι πυλώνες είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Λόγω της μη ικανοποίησης του περιορισμού βελών κάμψης για τα φορτία λειτουργικότητας (G+Q) και για τα δυναμικά φορτία, είναι απαραίτητη η εισαγωγή αντιβέλους. Έτσι είναι προτιμότερο να εισάγεται αντιβέλος (μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο) τέτοιο ώστε υπό μόνιμα φορτία το βέλος κάμψης να είναι μηδενικό. Το αντιβέλος στις καλωδιωτές πεζογέφυρες εξασφαλίζεται από την απαραίτητη προένταση των καλωδίων.

Οι απλές αμφιέριστες και οι αμφιέριστες με σύστημα άντωσης είναι πιο επιρρεπείς σε ταλαντώσεις λόγω κινητού φορτίου από ότι οι αρκετά πιο εύκαμπτες καλωδιωτές, καθώς η ιδιοσυχνότητά τους είναι κοντά στην ιδιοσυχνότητα της διέγερσης.

7. ΠΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα συνολικά κόστη όλων των τύπων πεζογεφυρών όπου εξετάστηκαν.

ΦΟΡΕΑΣ / ΥΛΙΚΑ	Δομικός χάλυβας S355 (t)	Καλώδια 1570/1760 (t)	Σκυρόδεμα C35/45 (m ³)	Χαλ/φυλλο t(mm)	Υποστήριξη χαλ/φυλλου	Κόστος υλικών (€)	Εργασία (€)	Συνολικό Κόστος (€)
2 ΔΟΚΩΝ	17.7	-	41.70	1.25	ΝΑΙ	61,031	-	61,031
3 ΔΟΚΩΝ	21.1	-	47.30	1.00	ΟΧΙ	70,029	-	70,029
4 ΔΟΚΩΝ	22.7	-	50.10	0.75	ΟΧΙ	74,143	-	74,143
ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ 2 ΚΥΡΙΟΥΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ	13.9	-	19.30	1.00	ΟΧΙ	43,718	-	43,718
ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΩΣΗΣ ΜΕ 3 ΚΥΡΙΟΥΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ	14.1	-	19.30	1.00	ΟΧΙ	44,218	-	44,218
ΚΑΛΩΔΙΩΤΗ ΜΕ 5 ΚΑΛΩΔΙΑ ΑΝΑ ΠΑΡΕΙΑ	9.8	2.8	31.5	1.25	ΟΧΙ	120370	49,500	169,870
ΚΑΛΩΔΙΩΤΗ ΜΕ 2 ΚΑΛΩΔΙΑ ΑΝΑ ΠΑΡΕΙΑ	11.0	2.1	34.3	1.25	ΟΧΙ	105095	37,800	142,895

Για τις απλές αμφιέριστες, παρατηρούμε πως η αύξηση του αριθμού των δοκών, οδηγεί σε αύξηση του κόστους του φορέα. Το αυξημένο κόστος, έγκειται στην αύξηση της ποσότητας του δομικού χάλυβα και στην αύξηση του σκυροδέματος λόγω της ανάγκης παχύτερων συμμίκτων πλακών. Παράλληλα οι περισσότερες δοκοί έχουν και υψηλότερο κόστος εργατικών. Οι περιπτώσεις των 3 και 4 δοκών υπερτερούν μόνο στο ότι δεν απαιτούν υποστήριξη του χαλυβδόφυλλου στη φάση κατασκευής. Όσον αφορά τους φορείς με το σύστημα άντωσης οι δύο λύσεις είναι πρακτικά ισοδύναμες, με το σύστημα των 2 ελκυστήρων να υπερτερεί στο ότι έχει μικρότερο κόστος εργατικών λόγω λιγότερων συνδέσεων. Τέλος στις καλωδιωτές πεζογέφυρες, παρατηρούμε πως παρά την σχεδόν ίδια συνολική ποσότητα χάλυβα, η μεγαλύτερη ποσότητα του χάλυβα καλωδίων στον ένα

φορέα οδηγεί σε αρκετά αυξημένο κόστος. Αυτό οφείλεται στην υψηλή τιμή των καλωδίων (~30€/kg), αλλά και στο υψηλό κόστος τοποθέτησης και προέντασής τους (~18€/kg), όπου δίνουν ένα συνολικό κόστος καλωδίων 48€/kg, σε σχέση με τα περίπου 2,5€/kg του απλού δομικού χάλυβα.

Συνοπτικά, την οικονομικότερη λύση αποτελούν οι πεζογέφυρες με το σύστημα άντωσης. Αυτό οφείλεται στην πλήρη εκμετάλλευση των αντοχών των μελών όπου χρησιμοποιήθηκαν και στην στατική της λειτουργία όπου καθιστά δυνατή την βελτιστοποίησή της για όλα τα μέλη. Οι καλωδιωτές πεζογέφυρες, παρότι απαιτούν συνολικά την λιγότερη ποσότητα χάλυβα, έχουν πολύ αυξημένο κόστος λόγω των καλωδίων και της εργασίας τους, αλλά και της δυσκολίας να επιτευχθεί μία λύση όπου εξαντλεί τα περιθώρια αντοχής όλων των μελών λόγω των πολλών παραμέτρων που επηρεάζουν το σχεδιασμό.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Οι απλές αμφιέριστες και οι πεζογέφυρες με το σύστημα άντωσης, έχουν σαν χαρακτηριστικό την εύκολη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και ως εκ τούτου την επίτευξη οικονομικών λύσεων. Οι ολόσωμες δοκοί, υστερούν έναντι του συστήματος αντώσεως λόγω του μικρότερου στατικού ύψους. Αυτό οφείλεται κυρίως στην λυγηρότητα των κορμών που περιορίζει τη δυνατότητα επίτευξης μεγάλου στατικού ύψους. Παρόλα αυτά όμως, χαρακτηρίζονται από τον πολύ εύκολο στατικό υπολογισμό τους. Στις καλωδιωτές πεζογέφυρες, η επίτευξη μίας λύσης όπου εξαντλεί τα περιθώρια αντοχής όλων των μελών, είναι αρκετά δυσχερής λόγω των πολλών παραμέτρων που επηρεάζουν το σχεδιασμό, όντας όμως η πιο ενδιαφέρουσα λύση από άποψη στατικής λειτουργίας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν για μία συγκεκριμένη κάτοψη φορέα. Σε μεγάλα ανοίγματα οι καλωδιωτές πεζογέφυρες είναι σίγουρα πολύ οικονομική λύση, ενώ δεν θα ήταν δυνατόν για το ίδιο άνοιγμα να επιτευχθεί λύση με απλές ολόσωμες δοκούς.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α.: Σύμμικτες Γέφυρες, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [2] Βάγιας Ι.: Σύμμικτες Κατασκευές, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [3] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ.: Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [4] Γαντές Χ.: Σχεδιασμός Καλωδιωτών Κατασκευών και Μεμβρανών, Σημειώσεις για το αντίστοιχο Μεταπτυχιακό μάθημα του ΔΜΠΣ «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών» του ΕΜΠ
- [5] Ερμόπουλος Ι.: Σιδηρές και Σύμμικτες Γέφυρες, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [6] Walther R., Houriet B., Isler W., Moïa P.: Cable Stayed Bridges, Thomas Telford ed.

DESIGN OF COMPOSITE PEDESTRIAN BRIDGES

Dimitrios Zacharakis

Civil Engineer

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: jim_zax@yahoo.gr

ABSTRACT:

The subject of the literature is the comparative research of various types of pedestrian bridges. The comparison concerns the design and the cost for each type of bridge. The types of bridges where they examined are simply supported, simply supported with buoyancy system and cable stayed bridges, with variants for each type. In order to exist possibility of comparison, was examined a plan view of $35 \times 8 \text{m}^2$ for every type. The analysis and design became for static and dynamic loads (time integration solution) for SLS and ULS. The static loads are the self weights (dead load) and a distribution load of 5,0 kPa (live loads). The dynamic load, is a sinusoidal excitation, that where applied to check the response of each bridge to vibrations (resonant frequency etc). Finally became the estimation of quantities and cost of each type and conclusions derived from the comparison of the results, concerning the design and the cost.