

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΤΥΠΟΥ MNB ΜΕΣΩ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Νικολαΐδης Ν. Θεμιστοκλής, Μιχαλόπουλος Αθανάσιος, Μπανιωτόπουλος Κ. Χαράλαμπος¹

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή,
Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

e-mail: think@civil.auth.gr,
ccb@civil.auth.gr

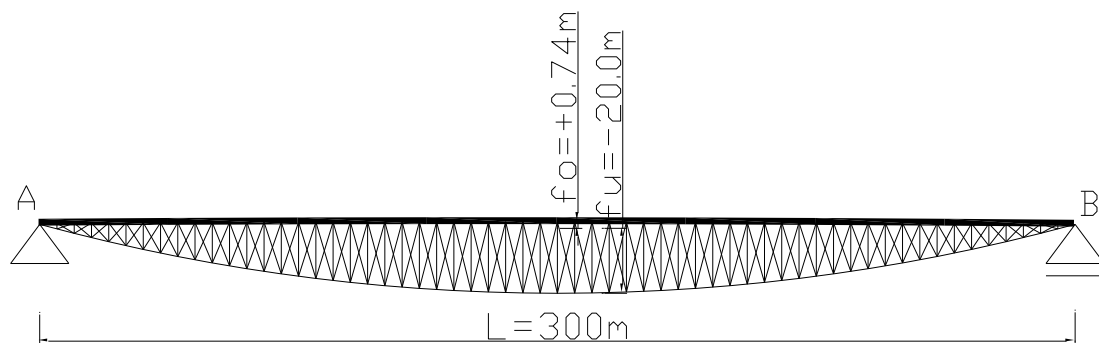
¹School of Civil Engineering, University of Birmingham
B15 255 Birmingham, United Kingdom

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται πρόταση βέλτιστης διαμόρφωσης χαλύβδινων φορέων μεγάλων ανοιγμάτων και ειδικά γεφυρών με τη χρήση του συστήματος ελέγχου των παραμορφώσεων MNB με τη χρήση προεντεταμένων καλωδίων. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μεικτού αμφιέρειστου φορέα εξωτερικά, αποτελούμενου από ολόσωμο και ελαφρώς τοξωτό στη μορφή άνω, ο οποίος υποστηρίζεται μέσω ορθοστατών από ομάδα παράλληλων πολυγωνικών προεντεταμένων (με αρνητική καμπυλότητα) καλωδίων αγκυρωμένων στα άκρα του ολόσωμου φορέα. Η πρωτοτυπία της μορφής αυτής του φορέα έγκειται στην σύνθεση και διαμόρφωσή του έτσι ώστε αφενός να ελαχιστοποιούνται οι ροπές που προκαλούνται από τα μόνιμα φορτία και αφετέρου αυτό να λειτουργεί ως σύστημα παθητικού ελέγχου των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τα κινητά φορτία. Στο πλαίσιο της διερεύνησης αυτής εξετάζεται ιδιαίτερα δυσμενές ως προς τα κινητά φορτία και τις απαιτήσεις λειτουργικότητας και αστοχίας παράδειγμα σιδηροδρομικής γέφυρας. Η μελέτη του συστήματος αναλύεται στο πλαίσιο των Ευρωκωδίκων, ενώ για την ανάλυση χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Επιπρόσθετα η διερεύνηση συμπληρώνεται με όλους τους απαραίτητους ελέγχους επάρκειας των διατομών και της κατασκευής. Ταυτόχρονα περιγράφονται με τεχνικές λεπτομέρειες τα στάδια υλοποίησης και σύνθεσης του μοντέλου αυτής της κατασκευής. Η εισαγωγή του προτεινόμενου συστήματος είναι πρωτότυπη και έχει ως αποτέλεσμα - με την ελαχιστοποίηση των βυθίσεων που επιτυγχάνεται - τη μείωση του βάρους των χρησιμοποιούμενων διατομών επιτυγχάνοντας έτσι κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων που πληρούν τις βασικές αρχές του βιώσιμου σχεδιασμού.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιδιαίτερο και καθοριστικό στοιχείο σχεδιασμού των φορέων μεγάλου ανοίγματος όπως οι γέφυρες είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος των ιδιαίτερα υψηλών τιμών της ροπής κάμψης στο ζύγωμα. Αυτό συνήθως γίνεται με δύσκαμπτους αλλά ταυτόχρονα ιδιαίτερα υψηλού ιδίου βάρους φορείς, τόσο στις περιπτώσεις φορέων μορφής ολόσωμου φορέα καταστρώματος όσο και στις περιπτώσεις φορέα υποστηριζόμενου από δικτυώματα. Εδώ και αρκετά χρόνια χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό τέτοιων φορέων, το μοντέλο του απλού αμφιέριστου φορέα ο οποίος υποστηρίζεται από καμπύλα τόξα θετικής ή αρνητικής καμπυλότητας. Στο προτεινόμενο σύστημα MNB (από τα αρχικά των ονομάτων Michalopoulos, Nikolaidis, Baniotopoulos των ερευνητών – μελών της ομάδας που συμμετέχουν στην ανάπτυξη του), ο φορέας διαμορφώνεται από ένα ελαφρώς τοξωτό χαλύβδινο μέλος άνω και από ένα εξωτερικό πολυγωνικό προεντεταμένο καλώδιο αρνητικής καμπυλότητας κάτω τα οποία αποτελούν το σύστημα υποστήριξης του [1],[2]. Ο σχεδιασμός του φορέα ανάγεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης μορφής του ώστε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά και χωρίς σημαντικές μετακινήσεις τα επιβαλλόμενα φορτία κυκλοφορίας και τις λοιπές σημαντικές μεταβλητές δράσεις αλλά και τον σεισμικό κίνδυνο. Το καλώδιο αγκυρώνεται στα άκρα του τοξωτού άνω πέλματος και συνδέεται με αυτό μέσω μεταλλικών ορθοστατών που βρίσκονται στα αντίστοιχα σημεία συμβολής. Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην αποτελεσματική συνεργασία των επιμέρους στοιχείων του (ελαφρώς τοξωτό άνω μέλος και καμπύλο καλώδιο κάτω) για την από κοινού παραλαβή με ασφάλεια όλων των εξωτερικών φορτίων που δρουν σε αυτόν χωρίς την ανάπτυξη ανεπιθύμητης οριζόντιας μετακίνησης στο κινητό έδρανο (βλ. Σχ. 1).



Σχήμα 1. Τελική μορφή του συστήματος MNB για τον φορέα της ανωδομής

Ο φορέας διαθέτει επίσης ένα σύστημα χιαστί μη προεντεταμένων καλωδιωτών διαγωνίων που συνδέουν την κεφαλή και τον πόδα διαδοχικών ορθοστατών λειτουργώντας ως επιπλέον διάταξη παθητικού ελέγχου των παραμορφώσεων στην περίπτωση τμηματικής ή ανομοιομόρφης φόρτισης της κατασκευής. Σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού είναι ότι ο φορέας διαθέτει αμφιέριστη στήριξη και δεν μεταφέρει οριζόντιες αντιδράσεις στα στοιχεία έδρασης. Ο σχεδιασμός του φορέα ανάγεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης μορφής του [3] ώστε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά και χωρίς σημαντικές μετακινήσεις τα επιβαλλόμενα φορτία κυκλοφορίας και τις λοιπές σημαντικές μεταβλητές δράσεις αλλά και τον σεισμικό κίνδυνο.

Στην εργασία αυτή αναλύεται και περιγράφεται ένα τέτοιο σύστημα γεφύρωσης μεγάλου ανοίγματος μέσα από ένα παράδειγμα σχεδιασμού σιδηροδρομικής γέφυρας 2 γραμμών κυκλοφορίας, καθαρού μήκους $L=300\text{m}$. Το σύστημα γεφύρωσης του φορέα εδώ έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτό που περιγράφηκε στην εισαγωγή αλλά και σε άλλες δημοσιεύσεις [4]. Παρουσιάζεται δε ως μια νέα προσέγγιση της μεθόδου έχοντας ως ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τα ιδιαίτερα αυξημένα και σημαντικά κινητά σιδηροδρομικά φορτία που επιβάλλει ο σύγχρονος σχεδιασμός.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 Ανάλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου

Η κατανομή των q δυνάμεων προέκτασης που αντιστοιχεί για το περιγραφόμενο σύστημα στην αντίστοιχη δράση της ομάδας καλωδίων, λαμβάνεται υπόψη, προσθέτοντας στο μητρώο φόρτισης τα φορτία προέκτασης p μετά από τον απαραίτητο γεωμετρικό μετασχηματισμό, μέσω ενός $(n \times q)$ μητρώου μετασχηματισμού C . Με τον τρόπο αυτό ένα διευρυμένο διάνυσμα φόρτισης $\bar{p}$ εισάγεται και εφαρμόζει στην κατασκευή που εκφράζεται κατά τα προηγούμενα από τη σχέση:

$$\{\bar{p}\} = \{p\} + [C] \cdot \{z\} \quad (1)$$

Θεωρώντας ότι οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις είναι απειροστές, η μαθηματική έκφραση του προβλήματος δομικής ανάλυσης καταλήγει στη μορφή του προβλήματος ελαχιστοποίησης της ενέργειας:

$$\min \left\{ \prod \left(\{u\} = \frac{1}{2} \cdot \{u^T\} \cdot [K] \cdot \{u\} - \{P^T\} \cdot \{u\} - \{z^T\} \cdot [C^T] \cdot \{u\} \right) \mid \{u\} \in U_{ad}(z) \right\} \quad (2)$$

όπου το πεδίο των αποδεκτών μετατοπίσεων $U_{ad}(z)$ καθορίζεται από τη σχέση:

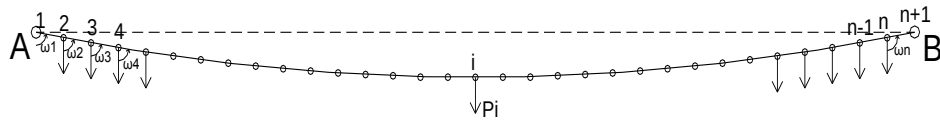
$$U_{ad}(z) = \{ \{u\} \in \mathbb{R}^n \mid [A] \cdot \{u\} \leq b, [\Gamma] \cdot \{u\} = \{u_0\} \} \quad (3)$$

Όλα τα προαναφερόμενα προβλήματα περιγράφουν την απόκριση της κατασκευής στη δράση ενός μεταβαλλόμενου διανύσματος ελέγχου $\{z\}$ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την διατύπωση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου του συστήματος που αναλύεται εδώ [5].

3.2 Ανάλυση βέλτιστης μορφής των μονόπλευρων καμπύλων φορέων

Ένα εύκαμπτο καλώδιο (βλ. Σχ. 2) συνδεδεμένο στους δύο ακραίους κόμβους του αποτελεί ένα σύστημα S-μονόπλευρης δομικής συμπεριφοράς [6]. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του καλωδίου, καθορίζεται αρχικά το σύστημα (4) των $(2n \times 2n)$ μη γραμμικών εξισώσεων του τη δράση των μόνιμων φορτίων ο φορέας δρα μονοαξονικά (άνω πέλμα υπό θλίψη και κάτω πέλμα υπό εφελκυσμό) και οι οριζόντιες αντιδράσεις των δύο πελμάτων αλληλοεξουδετερώνονται.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_i \cdot \sin \omega_i - S_{i+1} \cdot \sin \omega_{i+1} = 0 \\ S_i \cdot \cos \omega_i - S_{i+1} \cdot \cos \omega_{i+1} - P_{i+1} = 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\sin \omega_i} = L_{\text{arc}} \\ \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\tan \omega_i} = 0 \end{array} \right\} \rightarrow i = 1, \dots, (n-1) \quad (4)$$



Σχήμα 2. Ο φορέας του καλωδίου

Η επίλυση του συστήματος των $2n$ μη γραμμικών εξισώσεων για $n + 1$ κόμβους καλωδίου δίνει τις άγνωστες δυνάμεις S_i και τις άγνωστες γωνίες ω_i (πρακτικά τη γεωμετρία και φόρτιση του καλωδίου) πριν από την παραμόρφωση. Το σύστημα αυτό των εξισώσεων (4) μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά με αρκετές τεχνικές όπως τον αλγόριθμο Newton-Raphson, ή μέσω ενός γενικού προγράμματος επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων των μαθηματικών όπως το MATLAB που χρησιμοποιήθηκε εδώ.

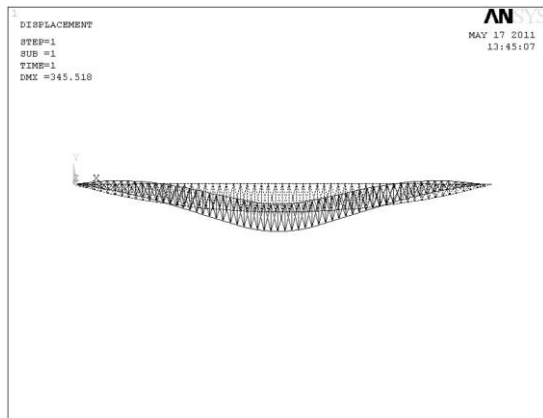
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

4.1 Γενική περιγραφή

Ως παράδειγμα για την ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιείται φορέας σιδηροδρομικής γέφυρας ανοίγματος $L = 300\text{m}$. Το δύσκαμπτο άνω τμήμα (κατάστρωμα) διαμορφώνεται από σύνθετη χαλύβδινη διατομή, η οποία αποτελείται από 4×52 χαλύβδινες κοιλοδοκούς συνδεδεμένες μεταξύ τους με σταθερές περισφίξεις ανά $5,0\text{m}$ σε δέσμη [6]. Οι 61 κόμβοι του άνω πέλματος χωρίζουν το συνολικό μήκος σε 60 τμήματα μήκους $a = [300/60] = 5.00\text{m}$. Η σύνδεση μεταξύ του άνω δύσκαμπτου τμήματος και του κάτω καμπύλου συστήματος ανάρτησης γίνεται μέσω χαλύβδινων ορθοστατών, τοποθετημένων σε κάθε θέση κόμβου αναλογικά κατά πλάτος (βλ. Σχ. 3) και ενισχυμένων διαφραγματικά και με κατάλληλους συνδέσμους δυσκαμψίας. Οι κόμβοι του κάθε κάτω καλωδίου έχουν οριζόντιο μήκος προβολής $a = 5.00\text{m}$, ενώ οι κατακόρυφοι ορθοστάτες συνδέονται με συνθήκες ολίσθησης στις θέσεις αυτές. Τα προεντεταμένα καλώδια αγκυρώνονται στα δύο άκρα A και B του δύσκαμπτου άνω φορέα διαμορφώνοντας τελικά ένα κλειστό σύστημα. Αρχικά, το απαιτούμενο μήκος των καλωδίων (a) καθορίζεται από το επιτρεπόμενο βέλος που μπορεί να έχει και είναι $f = 20.0\text{m}$ στο μέσον του. Στη συνέχεια η μορφή των καλωδίων (a) προσδιορίζεται επιλύοντας το σύστημα (4) των $2n$ εξισώσεων ισορροπίας με το πρόγραμμα MATLAB.

4.3 Επιλύσεις υπό συνδυασμό διαφόρων δράσεων

Στο πρώτο βήμα της επίλυσης ο φορέας κατάστρωμα-καλώδιο βρίσκεται σε ισορροπία (COMB1) ενώ στη συνέχεια εφαρμόζεται αυξημένη δύναμη προέντασης ώστε $A_i > P_i^{perm}$ (COMB2). Η φόρτιση αυτή ισοδυναμεί με το άθροισμα των μόνιμων φορτίων αλλά και το πιο αντιπροσωπευτικό κινητό ταυτόχρονα στις δύο γραμμές της γέφυρας. Η επίλυση δίνει την ανάκαμψη του φορέα προς τα άνω ($\max \Delta u = 0.74$ m στο μέσον) ενώ η μετακίνηση στην κύλιση είναι αμελητέα. Με το εύρος της ανάκαμψης αυτής επανασχεδιάζεται ο άνω φορέας έχοντας πλέον ελαφρά καμπύλη (η οποία προσδιορίζεται σαν να ήταν καλώδιο, απλά φορτίζεται με θλιπτικό φορτίο). Η μορφή της σύνθετης διατομής δέσμης, που έχει δοθεί στον άνω φορέα έχει όπως διαπιστώνεται από τις επιλύσεις σημαντική και αποδεκτή απόκριση έναντι λυγισμού. Αντίστοιχα για το σύστημα αυτό που στην τελική του μορφή ενισχύεται και με χιαστί μη προεντεταμένα καλώδια μεταξύ των διαδοχικών κόμβων άνω φορέα και κάτω καλωδίου διενεργείται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας των μελών του (βλ. Σχ. 5β). Από τον έλεγχο αυτό προκύπτει ικανοποιητικό ποσοστό εξάντλησης των ελέγχων αντοχής των διατομών [7] όλων των μελών, ενώ και οι αναπτυσσόμενες βυθίσεις βρίσκονται σε αποδεκτά επίπεδα.

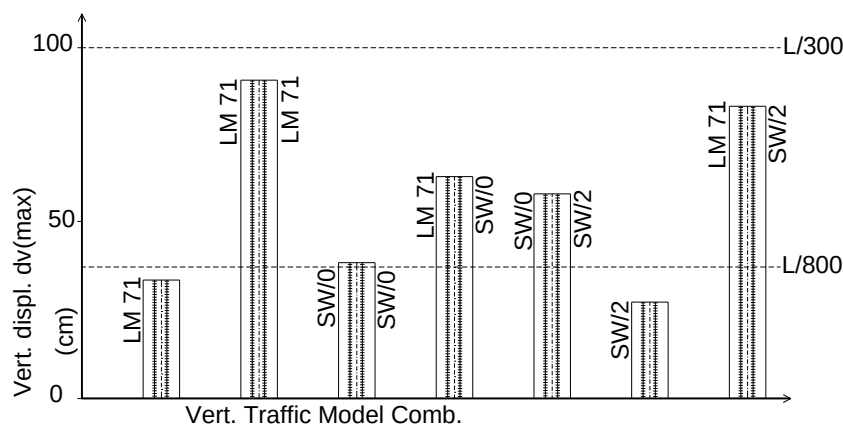


Σχήμα 5α. 2-D FEM, COMB3₁ κατ. βυθίσεις



Σχήμα 5β. 3-D FEM, COMB3₁ ροπές κάμψης άνω φορέα

Συγκεκριμένα η μέγιστη βύθιση (βλ. Σχ. 5α, 6), φόρτιση COMB3 με το συρμό LM71 στη 1 γραμμή, είναι $\max \Delta u = 33,7\text{cm} < L/800 = 37,5\text{cm}$, σε σχέση με το αποδεκτό όριο άνεσης.



Σχήμα 6. Μέγιστη βύθιση στο μέσο για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης

Αντίστοιχα η επίλυση του φορέα για φορτία ανέμου, COMB4,5 & 6, οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, με τη φόρτιση COMB6 να περιλαμβάνει και εκκεντρότητα θέσης $e = b/4$ εφαρμογής των φορτίων ανέμου κατά πλάτος. Τέλος η απόκριση του συστήματος, COMB7,8,9 σε σεισμό ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Ευρωκώδικα 8.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εξεταζόμενη πρόταση εφαρμογής προκύπτει ότι η χρήση φορέων MNB για τη μόρφωση φορέων ανοίγματος, όπως η εξεταζόμενη περίπτωση σιδηροδρομικής γέφυρας μπορεί να δώσει ικανοποιητική λύση σε ένα πρόβλημα με δυσμενείς παραμέτρους μόρφωσης που να καλύπτει τους στόχους που τέθηκαν κατά το σχεδιασμό. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν, υπέδειξαν ιδιαίτερα ικανοποιητική συμπεριφορά του φορέα σε όλους τους προβλεπόμενους συνδυασμούς φόρτισης πιστοποιώντας ότι ο προτεινόμενος αυτός τύπος χαλύβδινων φορέων αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων. Μέσω του περιορισμού των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των απαιτούμενων διατομών με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υλικού και τη μείωση του ίδιου βάρους της κατασκευής. Επιπλέον, η προτεινόμενη λύση μόρφωσης σιδηροδρομικής γέφυρας με φορείς τύπου MNB παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν απέχει πολύ στην υλοποίηση της από τις συμβατικές μεταλλικές κατασκευές. Ως εκ τούτου, τόσο ο σχεδιασμός όσο και η κατασκευή τέτοιων φορέων μπορεί να έχει αξιόλογες δυνατότητες εφαρμογής.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘ., ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ Θ., ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ Γ., ΜΠΑΝΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ Χ., “Έλεγχος των παραμορφώσεων μεταλλικών φορέων μεγάλων ανοιγμάτων τύπου MBSN με τη χρήση καλωδίων”, 6^ο Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών, Ιωάννινα 2-4.10.2008, τόμος Ι, σελ.450-457, 2008.
- [2] NIKOLAIDIS Th., MICHALOPOULOS A., STAVROULAKIS G.E., BANIOPOULOS C.C, “Bridges with Composite Deck Supported by Cables. The MNB Optimal Control”, Pollack Periodica, Vol. 2(2), pp. 103-117, 2007.
- [3] ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ Θ. “Προτάσεις διαμόρφωσης και εφαρμογής συστημάτων ελέγχου των παραμορφώσεων σε φορείς μεγάλου ανοίγματος με τη χρήση καλωδίων”, Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2003.
- [4] MICHALOPOULOS A., NIKOLAIDIS Th., BANIOPOULOS C.C, STAVROULAKIS G.E., “Passive control of bridges, the double cable net method”, Engineering Structures, Elsevier, Vol.25, pp. 1835-1842, 2005.
- [5] PANAGIOTOPOULOS P. D. “A Variational Inequality Approach to the Inelastic Stress Unilateral Analysis of Cable Structures”, Computer and Structures, Vol. 6, pp. 132-140, 1982.
- [6] BANIOPOULOS C.C, NIKOLAIDIS Th., MICHALOPOULOS A., STAVROULAKIS G.E., “Optimization of the structural response of large span structures by the MNB optimal control system”, proceedings of 10th HSTAM International Congress on Mechanics, Chania, Greece, 25-27 May, 2013.
- [7] ΜΠΑΝΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ Χ., ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ Θ., “Κατασκευές από χάλυβα – Παραδείγματα σχεδιασμού στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 3, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN 978-960-456-323-4, 2012.

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURAL RESPONSE OF LARGE SPAN STRUCTURES BY THE MNB OPTIMAL CONTROL SYSTEM

Themistoklis Nikolaidis

Dr. Ing., Institute of Metal Structures,
Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,
e-mail: think@civil.auth.gr

Athanasios Michalopoulos

Dr. Ing., Institute of Metal Structures,
Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,
e-mail: thnik@the.forthnet.gr

Charalampos Baniotopoulos

Dr.-Ing. Professor, School of Civil Engineering,
University of Birmingham
B15 255 Birmingham, United Kingdom

Institute of Metal Structures,
Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,
e-mail: ccb@civil.auth.gr

SUMMARY

The structural collaboration between a deck structure and an external prestressed cable is a very advantageous structural system for bridges and large span structures due to the fact that the use of external prestressing cables neutralizes partly or even completely the action of the permanent loads. However, the action of the moving loads causes on the cables large displacements not compatible to the connected deck or structure. A successful method to minimize the aforementioned undesirable displacements is to use a passive control system based on an a priori upward vertical deformation of the deck due to the prestressive action of the supported cables. In the present paper, a railway bridge model of type MNB formatted by a rigid deck that is supported by an optimal control system of displacements is proposed and studied. In the design of structures with large spans, the significant values of the bending moments at the main deck structure requires very heavy members, either in the case of a beam or a truss deck structure. An effective way to minimize the influence of bending moments to the deck is to apply the MNB (after Michalopoulos, Nikolaidis, Baniotopoulos) passive control system of displacements by the use of external prestressed cables. The base for this innovative system is the cable supported beam where the additional prestressing force on the polygonal support cable, optimize the structural response of the system. Using a prestressing strategy, the cable develops tension causing at the beginning an upward deformation at the main deck and undertaking the permanent loads as well as a part of the expected variable ones with controlled deformation.