

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ
ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ MBSN ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ:
ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΣΤΕΓΑΣΤΡΟ**

Νικόλαος Αντωνίου
Πολιτικός Μηχανικός
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάς
e-mail: nikos.antoniou@gmail.com

Θεμιστοκλής Νικολαΐδης
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάς,
e-mail: think@civil.auth.gr

Αθανάσιος Μιχαλόπουλος
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάς
e-mail: thnik@the.forthnet.gr

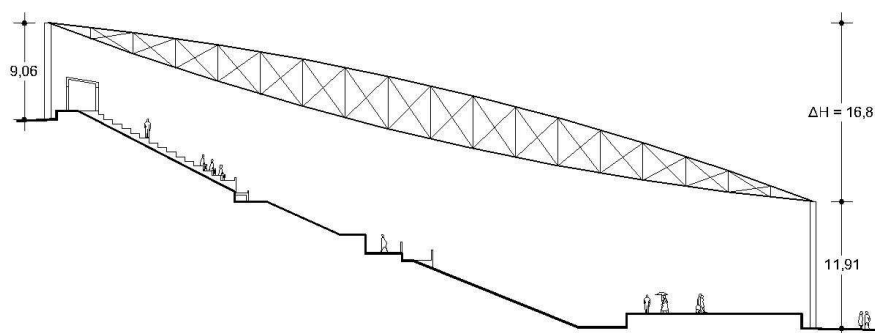
Χαράλαμπος Μπανιωτόπουλος
Καθηγητής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, Ελλάς
e-mail: ccb@civil.auth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια πρόταση εφαρμογής του χαλύβδινου φορέα τύπου MBSN, κατάλληλα τροποποιημένου ώστε να αποτελεί τον κύριο φορέα ανοιχτού στεγάστρου μεγάλου ανοίγματος με ιδιαίτερες λειτουργικές απαιτήσεις. Το στέγαστρο αυτό είναι αμφιθεατρικής μορφής με ακτινωτή διάταξη των κύριων φορέων και ανισοσταθμία στα άκρα του και καλείται να στεγάσει υπαίθριο θέατρο στο φράγμα Θέρμης στη Θεσσαλονίκη. Ο τύπος φορέα MBSN, έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καταπονείται μονοαξονικά και να λειτουργεί ως σύστημα παθητικού ελέγχου των παραμορφώσεων διαθέτοντας ταυτόχρονα αμφιέριστη στήριξη που δεν προκαλεί οριζόντιες αντιδράσεις στα στοιχεία έδρασης. Ο σχεδιασμός των φορέων γίνεται μέσα από μία διαδικασία εύρεσης βέλτιστης μορφής που βασίζεται στην επίλυση ενός συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων καλωδίου. Οι έλεγχοι του συστήματος παρουσιάζουν ιδιαίτερα ικανοποιητική συμπεριφορά στους προβλεπόμενους συνδυασμούς φόρτισης και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος αυτός τύπος μεταλλικών φορέων αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων καθώς ο περιορισμός των παραμορφώσεων οδηγεί σε σημαντική μείωση των απαιτούμενων διατομών.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση συμβατικών φορέων για την κάλυψη μεγάλων ανοιγμάτων με αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις είναι συνήθως μη βιώσιμη και είναι επομένως απαραίτητη η έρευνα και ο σχεδιασμός νέων συστημάτων που με τη μορφή τους και τη λειτουργία τους θα δίνουν μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα αυτό. Ο φορέας τύπου MBSN [1],[2], του οποίου η εφαρμογή εξετάζεται στην εργασία αυτή (Σχ. 1), χάρη στον κατάλληλο σχεδιασμό του με τη χρήση καλωδίου καταπονείται μονοαξονικά και δρα ως σύστημα παθητικού ελέγχου των παραμορφώσεων.

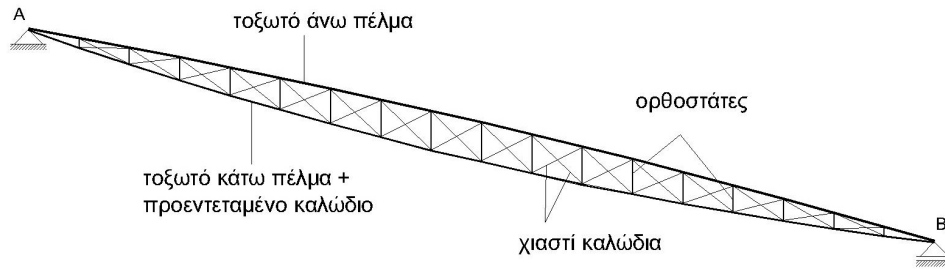


Σχ. 1: Κατά μήκος τομή του θεάτρου σε θέση κύριου φορέα

Ο καθορισμός της κατάλληλης γεωμετρίας του φορέα γίνεται μέσα από μια διαδικασία εύρεσης βέλτιστης μορφής που βασίζεται στην επίλυση ενός συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων με χρήση του λογισμικού πακέτου MATLAB. Η εργασία συμπληρώνεται με την ανάλυση και επίλυση του φορέα για όλα τα απαιτούμενα, μεταβλητά κατά μήκος, φορτία και τους συνδυασμούς φόρτισης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ MBSN

Ο φορέας διαμορφώνεται από ένα ελαφρώς τοξωτό χαλύβδινο μέλος και από ένα εξωτερικό πολυγωνικό προεντεταμένο καλώδιο αρνητικής καμπυλότητας που αποτελεί το σύστημα υποστήριξης του [3]. Το καλώδιο αγκυρώνεται στα άκρα του τοξωτού άνω πέλματος και συνδέεται με αυτό μέσω μεταλλικών ορθοστατών που βρίσκονται στα σημεία συμβολής του φορέα με τις τεγίδες. Για την ικανοποιητική απόκριση του συστήματος υπό το ιδιαίτερα δυσμενές για το σχεδιασμό αρνητικό φορτίο ανεμοπίεσης που αναπτύσσεται σε ανοικτά στέγαστρα, ο φορέας τροποποιείται κατάλληλα [4] με την προσθήκη ενός δεύτερου χαλύβδινου μέλους που ακολουθεί τη γεωμετρία του καλωδίου και παίζει το ρόλο του κάτω πέλματος (Σχ. 2). 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 ανομοιόμορφης φόρτισης της στέγης. Σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού είναι ότι ο φορέας διαθέτει αμφιέριστη στήριξη και δεν μεταφέρει οριζόντιες αντιδράσεις στα στοιχεία έδρασης. Επιπλέον, με την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας για τα τοξωτά μέλη του φορέα εξασφαλίζεται ότι η οριζόντια μετακίνηση του κινητού εδράνου είναι αποδεκτή υπό την επίδραση των κινητών φορτίων. Ο σχεδιασμός του φορέα ανάγεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης μορφής του.



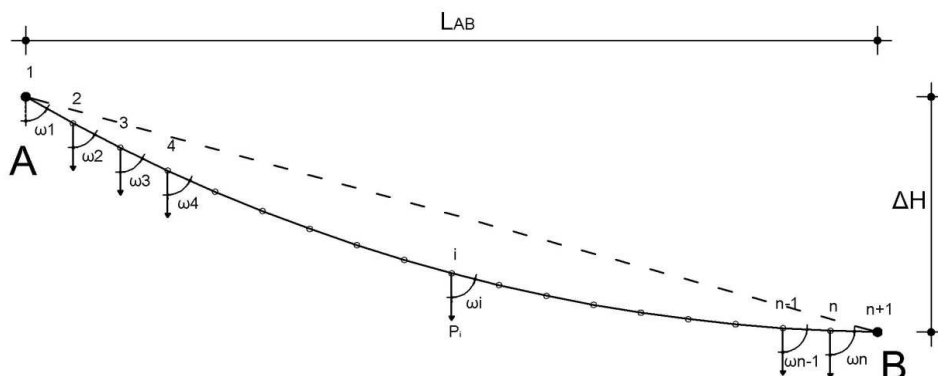
Σχ. 2: Τροποποιημένος φορέας MBSN με τοξωτό κάτω πέλμα

3.1 Διαδικασία εύρεσης βέλτιστης μορφής

Η λειτουργία του φορέα βασίζεται στην αποτελεσματική συνεργασία των επιμέρους στοιχείων του (τοξωτών μελών και καλωδίου) για την από κοινού παραλαβή με ασφάλεια των εξωτερικών φορτίων χωρίς την ανάπτυξη ανεπιθύμητης οριζόντιας μετακίνησης στο κινητό έδρανο. Η απαίτηση αυτή επιτυγχάνεται με την εύρεση της κατάλληλης – βέλτιστης γεωμετρίας [4] τόσο των τοξωτών μελών όσο και του καλωδίου και τον προσδιορισμό της απαιτούμενης προέντασης [5].

Η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης αυτής μορφής συνοψίζεται στα εξής βήματα: Αρχικά επιλέγεται με βάση λειτουργικά κριτήρια το επιθυμητό μεσαίο βέλος του τοξωτού άνω πέλματος (f_a) και του κάτω πέλματος-καλωδίου (f_k) το οποίο εκφράζει την καμπυλότητα των στοιχείων. Από την αναλογία των βελών αυτών καθορίζεται και το ποσοστό της εξωτερικής φόρτισης που παραλαμβάνεται από κάθε πέλμα: $f_a/(f_a+f_k)$ από το άνω και $f_k/(f_a+f_k)$ από το κάτω πέλμα. Στη συνέχεια, καταστρώνονται δυο συστήματα ($2n \times 2n$) μη γραμμικών εξισώσεων (1) ένα για κάθε ένα από τα πέλματα του φορέα από τα οποία θα προκύψει η ακριβής γεωμετρία ώστε υπό τη δράση των μόνιμων φορτίων ο φορέας να δρα μονοαξονικά (άνω πέλμα υπό θλίψη και κάτω πέλμα υπό εφελκυσμό) και οι οριζόντιες αντιδράσεις των δύο πελμάτων να αλληλοεξουδετερώνονται [6].

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



Σχ. 3: Περιγραφή μορφής και φόρτισης του τοξωτού φορέα

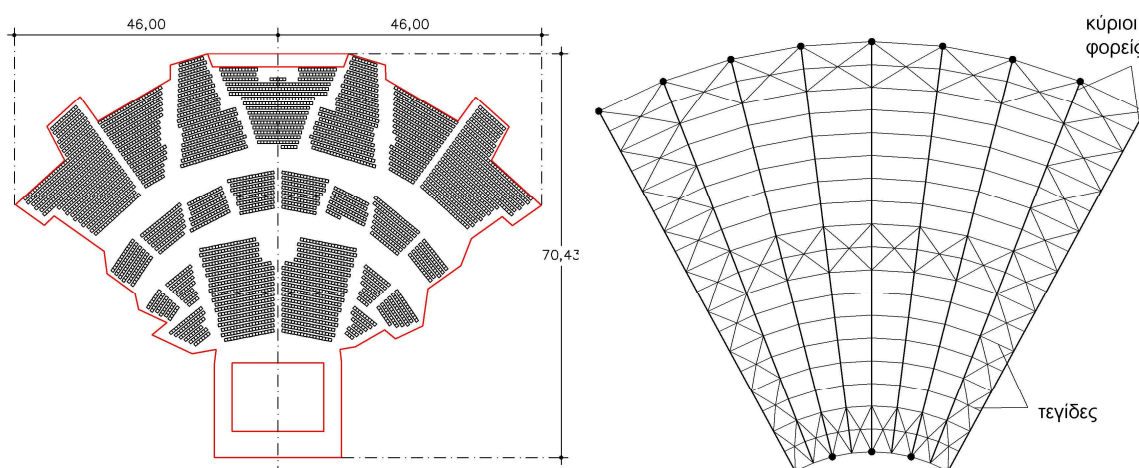
4. ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η πρόταση εφαρμογής του φορέα MBSN αφορά το σχεδιασμό ανοιχτού στεγάστρου για την κάλυψη υπαίθριου θεάτρου 4100 θέσεων (στέγαση των κερκίδων και της σκηνής) στο φράγμα Θέρμης στη Θεσσαλονίκη.

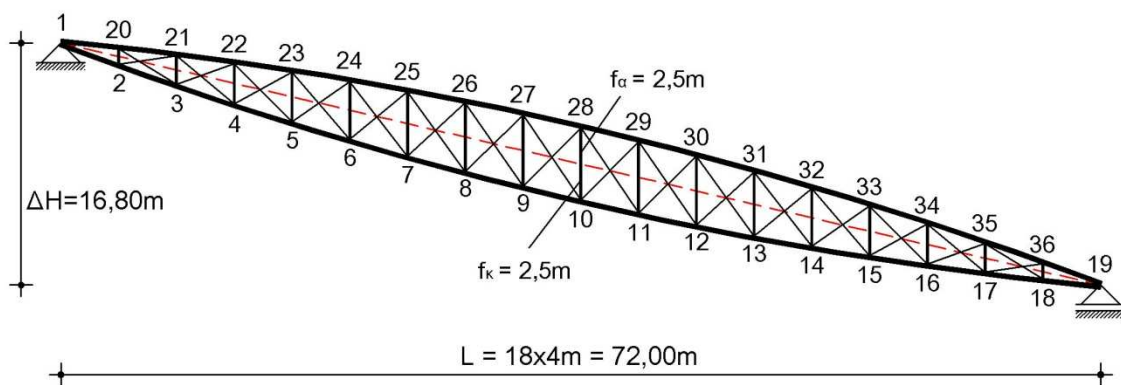


Εικ. 1: Φωτορεαλιστική άποψη του θεάτρου

Το προτεινόμενο στέγαστρο είναι αμφιθεατρικής μορφής με ανισοσταθμία στα άκρα του, ακολουθεί τη γεωμετρία του θεάτρου (Σχ. 4&5) και καλύπτει επιφάνεια 4606m^2 . Μορφώνεται από εννέα κύριους φορείς τύπου MBSN ανοίγματος 72m διατεταγμένους ακτινωτά και από τεγίδες μεταβλητού ανοίγματος (από $3,5\text{m}$ έως $12,5\text{m}$) τοποθετημένες ανά 4m που χωρίζουν τους κύριους φορείς σε 18 φατνώματα. Βάσει των λειτουργικών απαιτήσεων του έργου, το μεσαίο βέλος του άνω και κάτω πέλματος επιλέγεται $f_k=f_a=2,5\text{m}$ (Σχ. 6). Από τις επιλύσεις που ακολουθούν, καθορίζονται και οι διατομές του κύριου φορέα: Τα δύο τοξωτά πέλματα μορφώνονται από σύνθετη διατομή αποτελούμενη από δύο κοιλοδοκούς QHS 260×11 και ενδιάμεση κατακόρυφη λεπίδα 270×20 ενώ για το προεντεταμένο καλώδιο επιλέγεται διατομή συνολικού εμβαδού 100cm^2 . Για τους ορθοστάτες χρησιμοποιείται διατομή QHS $100\times 6,3$ και για τα πρόσθετα χιαστί καλώδια διατομή 10cm^2 .



Σχ. 4&5: Περίγραμμα στεγαζόμενου τμήματος θεάτρου και διάταξη στεγάστρου σε κάτοψη



Σχ. 6: Τυπικός κύριος φορέας του στεγάστρου

4.1 Κομβικά φορτία φορέα

Οι κύριοι φορείς καταπονούνται μόνο από σημειακά κατακόρυφα φορτία που περιλαμβάνουν τις αντιδράσεις των τεγίδων και το ίδιο βάρος που θεωρείται συγκεντρωμένο στους κόμβους του άνω πέλματος .

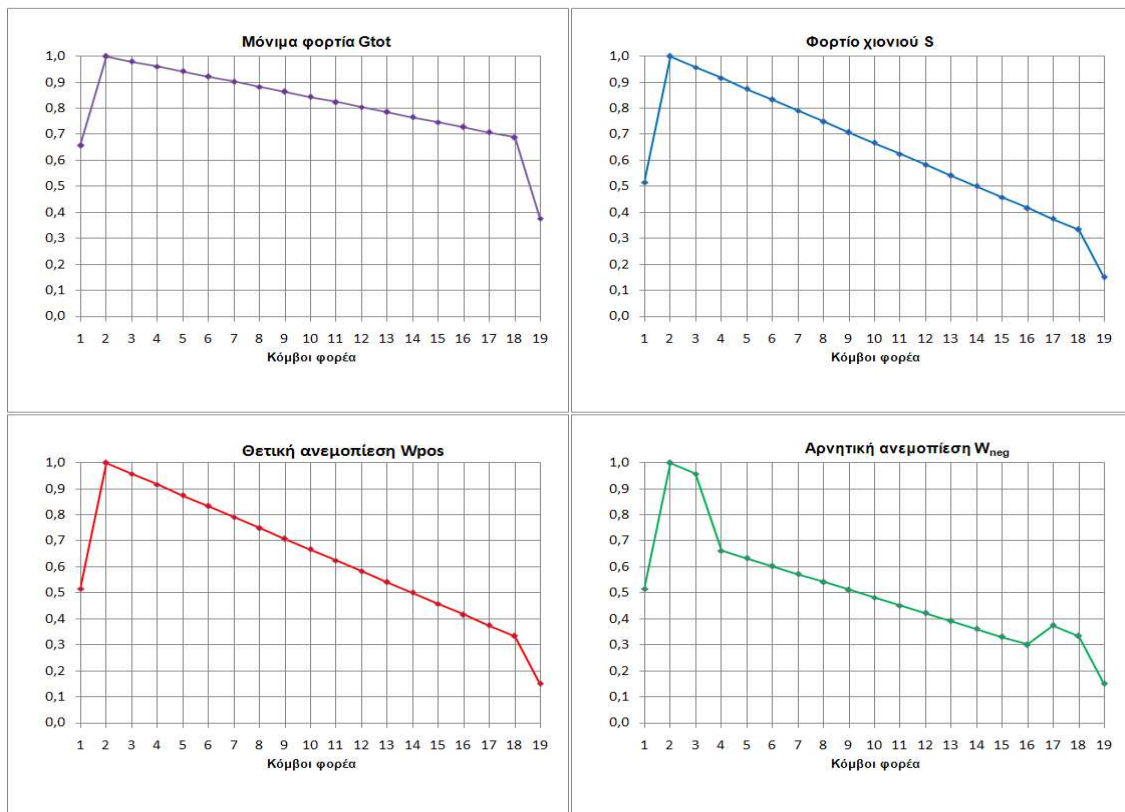
Μόνιμα φορτία		Σημαντικότερα κινητά φορτία	
Επικάλυψη + διαδοκίδες	$G_1 = +0,15 \text{ kN/m}^2$	Χιόνι κατά EN 1991-1-3	$S = +0,65 \text{ kN/m}^2$
Τεγίδες	$G_2 = +0,95 \text{ kN/m}$	Άνεμος κατά EN 1991-1-4	$W_{\text{pos}} = +1,63 \text{ kN/m}^2$
Ίδιο βάρος φορέα MBSN	$G_3 = +5,30 \text{ kN/m}$		$W_{\text{neg}} = -2,01 \text{ kN/m}^2$

Πιν. 1: Βασικές φορτίσεις φορέα

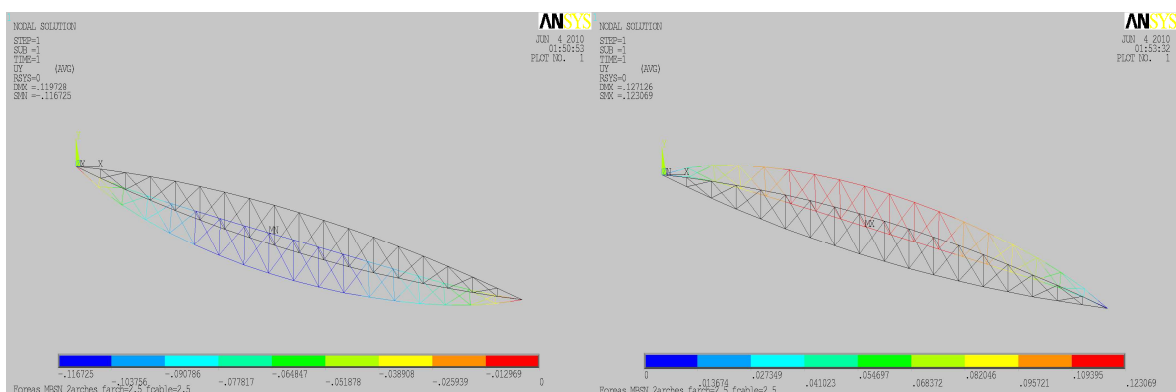
Λόγω της ακτινωτής διάταξης και της σύγκλισης των κύριων φορέων, η περιοχή ευθύνης κάθε κόμβου του τυπικού κύριου φορέα δεν είναι σταθερή και αυτό δίνει μια μεταβολή στη φόρτιση από κόμβο σε κόμβο κατά μήκος του φορέα (Εικ. 2).

4.2 Μόρφωση και επίλυση κύριων φορέων MBSN

Η ακριβής μορφή του φορέα (συντεταγμένες των κόμβων του) προσδιορίζεται μέσα από επίλυση του συστήματος (1) με χρήση του λογισμικού πακέτου MATLAB για το άνω και κάτω πέλμα με φόρτιση για το καθένα το 50% των μόνιμων φορτίων και βέλος 2,5m. Από την επίλυση των δύο συστημάτων προκύπτει εκτός από τη γεωμετρία του φορέα και η απαιτούμενη προένταση του καλωδίου. Στη συνέχεια, ο φορέας προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και αναλύεται στο πλαίσιο των Ευρωκωδίκων [7] για όλους τους προβλεπόμενους συνδυασμούς φόρτισης, με τους πιο δυσμενείς να φαίνονται στον Πιν.2 συμπεριλαμβανομένου και του σεισμικού συνδυασμού. Η επίλυση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την μέγιστη κατακόρυφη βύθιση και την οριζόντια μετακίνηση του κινητού εδράνου (Εικ. 3&4) αλλά και την απόκριση των μελών του υπό τα εντατικά μεγέθη.



Εικ. 2: Αναλογία κομβικών φορτίων φορέα



Εικ. 3&4: Μετακινήσεις κόμβων για τους συνδυασμούς φόρτισης C₁ & C₂

Φόρτιση	max U _y [mm]	U _{x(19)} [mm]
G _{tot}	-0,3758	+0,0324
C ₁ = G _{tot} + (W _{pos} +0,5·S)	-115,86	-3,7652
C ₂ = G _{tot} + W _{neg}	+123,07	+3,8180
C ₅ = G _{tot} ± E	±107,15	±0,6180

Πιν.3 Μέγιστη βύθιση και μετακίνηση κινητού εδράνου για βασικούς συνδυασμούς φόρτισης

Η απόκριση του φορέα είναι αποτελεσματική καθώς αυτός αντιστέκεται στις παραμορφώσεις δρώντας κυρίως μονοαξονικά αναπτύσσοντας εντάσεις που μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια. Παρατηρείται ότι το καλώδιο ακόμα και στην αρνητική ανεμοπίεση αστοχίας που τείνει να το χαλαρώσει διατηρεί μέρος της προέντασης του.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εξεταζόμενη πρόταση εφαρμογής προκύπτει ότι η χρήση φορέων MBSN για τη μόρφωση στεγάστρου μεγάλου ανοίγματος 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 στεγάστρου με μεταλλικούς φορείς τύπου MBSN 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 στεγαστρών μπορούν ως ένα βαθμό να τυποποιηθούν και η λύση αυτή 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] 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.
- [3] ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘ. “Εφαρμογή εξωτερικής προέντασης σε μεταλλικούς ή μεικτούς φορείς. Μελέτη μείωσης κόστους κατασκευής”, Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1991.
- [4] ΑΝΤΩΝΙΟΥ Ν. “Στέγαστρο μεγάλου ανοίγματος: Μόρφωση με καμπύλους χαλύβδινους φορείς ενισχυμένους με προεντεταμένο καλώδιο”, Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] ΜΠΑΝΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ Χ., “Κατασκευές από χάλυβα – Αρχές σχεδιασμού στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 3, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN 978-960-456-184-1, 2009.

**DISPLACEMENT CONTROL OF LARGE MBSN STEEL BEAMS
BY MEANS OF CABLES:
APPLICATION TO AN OPEN ROOF STRUCTURE**

Nikolaos Antoniou

Civil Engineer

Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,

e-mail: nikos.antoniou@gmail.com

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, Institute of Metal Structures,

Department of Civil Engineering, A.U.Th., Thessaloniki, Greece,

e-mail: ccb@civil.auth.gr

SUMMARY

In this paper the so-called MBSN steel beam, appropriately modified, is used to carry a large span open roof structure with special serviceability requirements. The roof, aiming to cover an open-air theater in the region of Thessaloniki, is of amphitheatrical shape with radial configuration of its girders and a relevant difference in elevation at the supports. The characteristics of the MBSN system that dominate its structural behavior is the design of the beams in such a way that no bending moments appear due to external loads, thus acting as a passive displacement control mechanism. At the same time, a simple supported structural scheme of the beams guarantees that no horizontal reactions are transferred to the columns. This structural behavior of the beams is achieved by determining the appropriate shape through a form-finding procedure based on the numerical treatment of a nonlinear system of equations. The modified system exhibits a satisfactory structural response against all the considered loading combinations and leads to the conclusion that the proposed system could be an advantageous solution for the covering of large spans due to the fact that the limitation of displacements leads to a minimization of the required members cross-sections.