

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΕΩΝ, ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΝΗΡΤΗΜΕΝΟΥ ΣΤΕΓΑΣΤΡΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΟΥΣ

Χάρης Ι. Γαντές
Αναπληρωτής Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Κωνσταντίνα Κουλάτσου
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Μ.Σ.Σ. Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: konkoulatsou@gmail.com

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο προτείνεται μία διαδικασία προσδιορισμού βέλτιστων θέσεων, διατομών και προεντάσεων καλωδίων για ανηρτημένα μεταλλικά στέγαστρα με πολύπλοκη γεωμετρία και στατικό σύστημα. Αφορμή για τη διαδικασία αυτή στάθηκε ένα μεταλλικό ανηρτημένο στέγαστρο, το οποίο πρόκειται να στεγάσει τον αρχαιολογικό χώρο του Λυκείου του Αριστοτέλη στο κέντρο της Αθήνας. Η αρχική αρχιτεκτονική μελέτη προέβλεπε την ύπαρξη πέντε καλωδίων ανάρτησης από κάθε πυλώνα. Λόγω της τοξωτής μορφολογίας του στεγαστρού, κάποια από τα καλώδια ανάρτησης βρέθηκαν να χαλαρώνουν αντί να εφελκούνται. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση των βέλτιστων θέσεων των καλωδίων, για τις οποίες η εκμετάλλευση των καλωδίων ανάρτησης θα είναι βέλτιστη. Εκτός από τις θέσεις των καλωδίων ανάρτησης, η πολυπλοκότητα του στατικού συστήματος δημιούργησε πρόβλημα σύγκλισης στις μη γραμμικές στατικές αναλύσεις που απαιτούνται για κάθε καλωδιωτή κατασκευή. Για την επίλυση του προβλήματος της σύγκλισης πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των τιμών της προέντασης, τόσο για τα καλώδια ανάρτησης, όσο και για τα καλώδια αντιστήριξης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η διαδικασία προσδιορισμού των βέλτιστων θέσεων των καλωδίων ανηρτημένων στεγαστρών, καθώς και των διατομών τους και δυνάμεων προέντασής τους αποτελεί ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα μόρφωσης και σχεδιασμού. Ιδιαίτερα σε πολύπλοκα στατικά συστήματα παρατηρείται δυσκολία σύγκλισης των μη γραμμικών στατικών αναλύσεων που απαιτούνται, εκτός αν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις προέντασης που χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές δεν απέχουν πολύ από τις τελικές. Για να επιτευχθεί αυτό προτείνεται στο παρόν άρθρο μια επαναληπτική διαδικασία διαδοχικών αναλύσεων απλών αρχικά προσομοιωμάτων, τα οποία σταδιακά γίνονται συνεχώς συνθετότερα, ώστε τελικά να

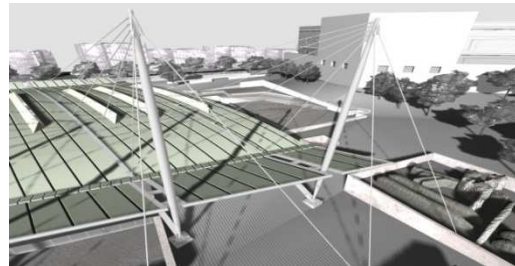
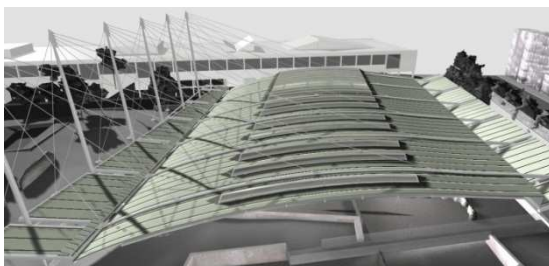
προσεγγιστεί με επαρκή ακρίβεια η αναμενόμενη πραγματική συμπεριφορά. Τα βήματα αυτής της διαδικασίας είναι τα εξής:

- i. Προσδιορίζεται το μέγιστο βέλος του φορέα χωρίς την ανάρτησή του από καλώδια για μόνιμα φορτία.
- ii. Στη θέση του μέγιστου βέλους τοποθετείται μία κεκλιμένη στήριξη τύπου κύλισης που δεσμεύει τη μετακίνηση κατά τη φορά που θα είχε ένα καλώδιο στη θέση εκείνη. Αναλύεται ο νέος φορέας και προσδιορίζεται η θέση του επόμενου μέγιστου βέλους.
- iii. Στη νέα θέση μέγιστου βέλους τοποθετείται μία δεύτερη κεκλιμένη κύλιση και αναλύεται ο φορέας. Επιβεβαιώνεται ότι οι φορές των αντιδράσεων στήριξης συμφωνούν με εφελκυστικές λειτουργίες των αντίστοιχων καλωδίων. Εάν αυτό δεν συμβαίνει μετατοπίζονται οι θέσεις των κυλίσεων και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Ομοίως προσδιορίζεται το επόμενο μέγιστο βέλος.
- iv. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου προσδιοριστούν οι βέλτιστες θέσεις ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις λειτουργικότητας και οι αντιδράσεις στήριξης να έχουν τη σωστή φορά και επαρκές μέγεθος.
- v. Οι κυλίσεις αντικαθίστανται από καλώδια, τα οποία αρχικά θεωρούνται ως ακλόνητα στο άνω άκρο τους. Οι προεντάσεις των καλωδίων επιλέγονται ίσες με τις αντίστοιχες αντιδράσεις στήριξης και οι διατομές έτσι ώστε οι δυνάμεις προέντασης να είναι ίσες με ένα λογικό ποσοστό της εφελκυστικής αντοχής, π.χ. της τάξης του 30%. Ο φορέας αναλύεται και εξετάζονται τα βέλη του φορέα στις θέσεις ανάρτησης. Λόγω της κρέμασης και ευκαμψίας των καλωδίων τα βέλη αυτά δεν θα είναι μηδενικά, όπως ήταν στην περίπτωση των ακλόνητων κυλίσεων. Τροποποιούνται κατάλληλα οι δυνάμεις προέντασης των καλωδίων και επαναλαμβάνονται οι αναλύσεις, μέχρις ότου τα βέλη λόγω μόνιμων φορτίων στις θέσεις ανάρτησης μηδενιστούν ή κριθούν ως επαρκώς μικρά. Τότε οριστικοποιούνται οι διατομές και δυνάμεις προέντασης. Εφόσον κατά τη διαδικασία αυτή εκδηλωθεί δυσκολία σύγκλισης, η αντικατάσταση των κυλίσεων από καλώδια γίνεται σταδιακά.
- vi. Από εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων στα άνω άκρα των καλωδίων εκτιμώνται οι απαιτούμενες δυνάμεις προέντασης των καλωδίων αντιστήριξης, ώστε στις κορυφές των πυλώνων οι συνιστώσες των δυνάμεων των καλωδίων ανάρτησης και αντιστήριξης να είναι μόνον θλιπτικές για τους πυλώνες, χωρίς εγκάρσια συνιστώσα. Με παρόμοιο τρόπο όπως στα καλώδια ανάρτησης εκτιμώνται οι απαιτούμενες διατομές των καλωδίων αντιστήριξης.
- vii. Εισάγονται στο προσομοίωμα πυλώνες και καλώδια αντιστήριξης και πραγματοποιείται στατική ανάλυση. Ελέγχονται οι μετατοπίσεις στις κορυφές των πυλώνων, οι οποίες επιδιώκεται να είναι πολύ μικρές και οφειλόμενες μόνον σε βράχυνση των πυλώνων λόγω θλίψης. Διορθώνονται οι δυνάμεις προέντασης των καλωδίων αντιστήριξης και επαναλαμβάνονται οι αναλύσεις, μέχρις ότου επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Στη φάση αυτή δεν επεμβαίνουμε σε διατομές και δυνάμεις προέντασης των καλωδίων ανάρτησης, αφού όταν μέσω των καλωδίων αντιστήριξης ακινητοποιηθεί η κορυφή του πυλώνα, ο φορέας θα λειτουργεί ικανοποιητικά. Με τον τρόπο αυτό οριστικοποιούνται οι διατομές και δυνάμεις προέντασης και των καλωδίων αντιστήριξης.
- viii. Στο πλήρες προσομοίωμα ασκούνται οι απαιτούμενοι συνδυασμοί φόρτισης σε οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας και πραγματοποιούνται οι αντίστοιχοι έλεγχοι. Λόγω της μη γραμμικότητας δεν επιτρέπεται η επαλληλία εντατικών μεγεθών, επομένως πραγματοποιούνται ξεχωριστές αναλύσεις για κάθε συνδυασμό, με αφητηρία την τελική κατάσταση της ανάλυσης για μόνιμα φορτία και προένταση. Οι απαιτήσεις για τα καλώδια είναι να αποφεύγεται χαλάρωση είτε

εφελκυστική αστοχία για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης, ενώ για τα υπόλοιπα μέλη του φορέα πραγματοποιούνται οι συνηθισμένοι έλεγχοι επάρκειας. Εφόσον κάποιοι έλεγχοι δεν ικανοποιούνται, διορθώνονται οι δυνάμεις προέντασης και/ή οι διατομές των καλωδίων και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Εφόσον παρατηρούνται προβλήματα χαλάρωσης προτείνεται η αύξηση των δυνάμεων προέντασης ενώ αν εκδηλώνεται εφελκυστική αστοχία προτείνεται μείωση των δυνάμεων προέντασης και/ή αύξηση των διατομών. Οι επεμβάσεις στις δυνάμεις προέντασης είναι σκόπιμο να γίνονται με ομοιόμορφο τρόπο σε όλα τα καλώδια, ώστε να μην διαταράσσεται η συνολική ισορροπία του φορέα.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΣΤΕΓΑΣΤΡΟΥ

Τα αρχαιολογικά ευρήματα του Λυκείου του Αριστοτέλους ευρίσκονται στην Αθήνα, σε οικοδομικό τετράγωνο που περικλείεται από την οδό Ρηγίλλης, το Βυζαντινό Μουσείο, τη Λέσχη Αξιωματικών των Ενόπλων Δυνάμεων και το Κρατικό ωδείο Αθηνών. Για τη στέγασή τους πραγματοποιήθηκε αρχιτεκτονικός διαγωνισμός, όπου το πρώτο βραβείο δόθηκε σε αρχιτεκτονική ομάδα αποτελούμενη από τους Κ. Καραδήμα, Δ. Λουκόπουλο, Κ. Βρεττού, Χ. Παπαδημητρίου και Λ. Σταυροπούλου (Σχ. 1).

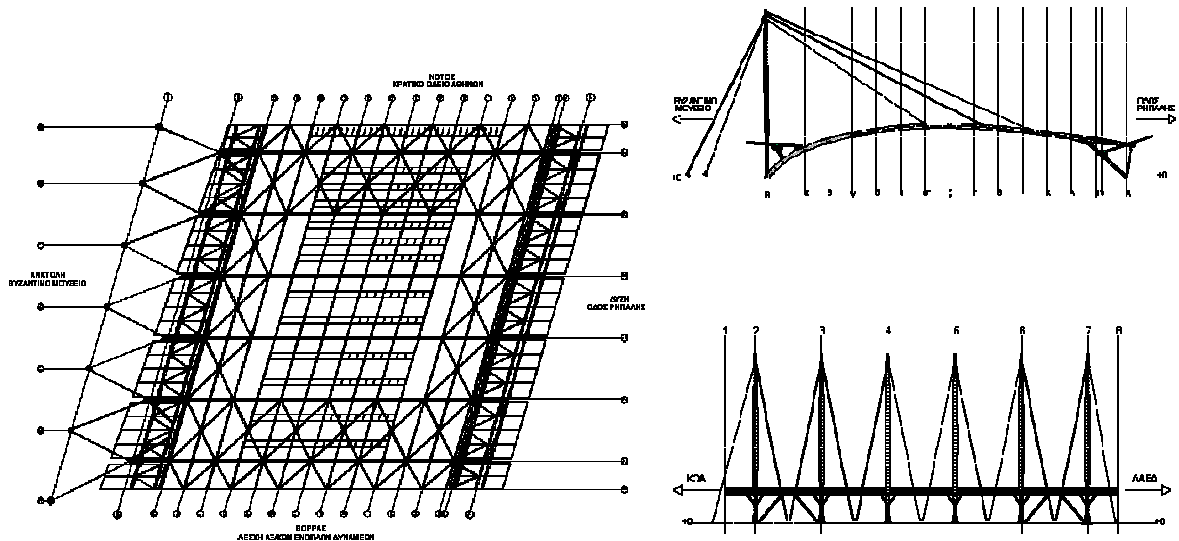


Σχ. 1: Καλώδια ανάρτησης και τοξωτή μορφολογία στεγάστρου

Ο μεταλλικός φορέας του στεγάστρου (Σχ. 2) αποτελείται από έξι κύριους φορείς, ανοίγματος περίπου 60m, που διατάσσονται παράλληλα μεταξύ τους σε απόσταση 10.5m και συνδέονται με τεγίδες και διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας εύρους δύο φατνωμάτων τεγίδων. Κάθε κύριος φορέας αποτελείται από ένα επίπεδο τόξο αρθρωμένο στο έδαφος στο ένα του άκρο (προς το Βυζαντινό Μουσείο), ενώ στο άλλο του (προς την οδό Ρηγίλλης) σχεδόν ευθυγραμμίζεται και εδράζεται πάνω σε υποστήλωμα σχήματος V. Ο τοξωτός φορέας αναρτάται σε ενδιάμεσα σημεία του μέσω προεντεταμένων καλωδίων από πυλώνα ύψους 25m, ελαφρώς κεκλιμένο ως προς την κατακόρυφο. Η ευστάθεια εντός και εκτός επιπέδου του πυλώνα εξασφαλίζεται μέσω δύο προεντεταμένων καλωδίων αντιστήριξης. Προς τις πλευρές της οδού Ρηγίλλης και του Βυζαντινού Μουσείου, διατάσσονται ανεξάρτητα περύγια για την προέκταση της επικάλυψης, καθώς και κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας μορφής Λ με εκκεντρότητα στα ακραία φατνώματα.

4. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η αρχική αρχιτεκτονική και στατική μελέτη προέβλεπε πέντε καλώδια ανάρτησης για κάθε τοξωτό φορέα. Οι πρώτες αναλύσεις για τα μόνιμα φορτία και την προένταση έδειξαν ότι κάποια από τα καλώδια ανάρτησης χαλάρωναν, λόγω του τρόπου παραμόρφωσης του τοξωτού φορέα, όπου το μέσον βυθίζεται και τα άκρα ανεβαίνουν. Συνεπώς ήταν απαραίτητη η αλλαγή των θέσεων ανάρτησης των κύριων φορέων.

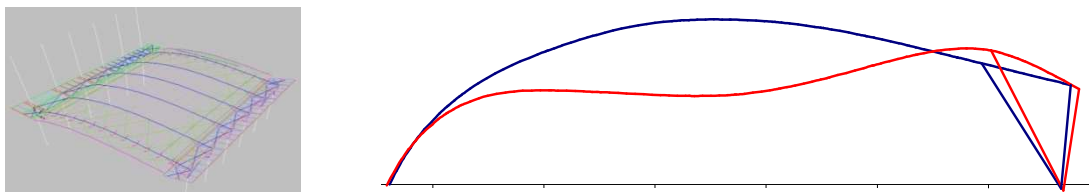


Σχ. 2: Κάτοψη μεταλλικού στεγάστρου, όψη κύριου φορέα και όψη πυλώνων

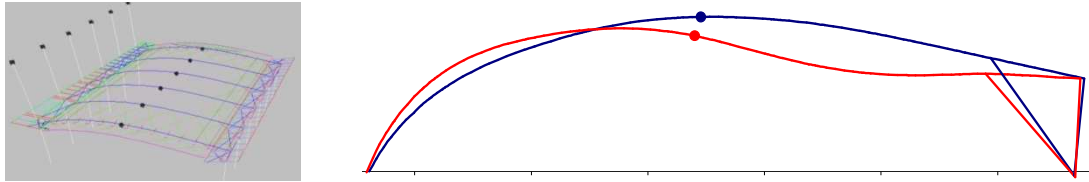
Τα καλώδια ανάρτησης, για να λειτουργήσουν σωστά, πρέπει να βρίσκονται στην περισσότερο εύκαμπτη περιοχή του φορέα, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν τα μεγάλα βέλη που προκύπτουν εκεί λόγω του σημαντικού ανοίγματος. Τότε όμως τα καλώδια θα έχουν δυσμενή κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, με αποτέλεσμα να εισάγουν σημαντική αξονική δύναμη στον φορέα του στεγάστρου. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι στην περίπτωση αυτή ήταν επιβεβλημένη μια συστηματική διερεύνηση με στόχο τη βελτιστοποίηση των θέσεων, διατομών και δυνάμεων προέντασης των καλωδίων. Οι μη γραμμικές αναλύσεις στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης πραγματοποιούνται με το λογισμικό SAP2000NL, v.11.0.0.

5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΣΕΩΣ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

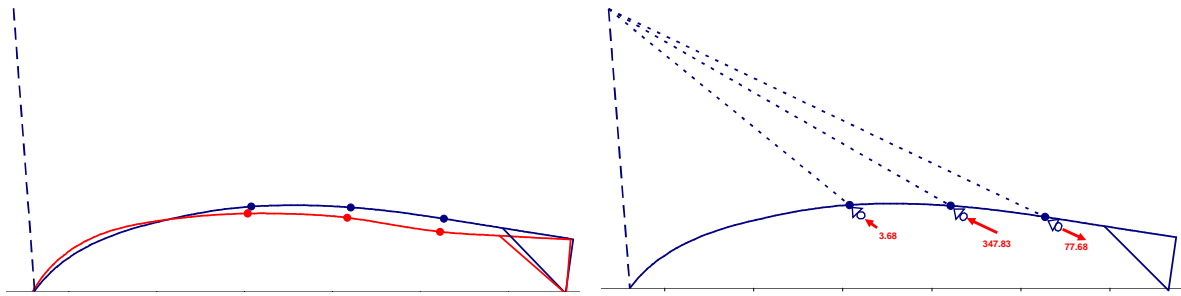
Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων θέσεων των καλωδίων ανάρτησης αφαιρούνται αρχικά όλα τα καλώδια από το φορέα. Η διαδικασία γίνεται για όλο το μεταλλικό φορέα αλλά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για έναν κύριο φορέα. Αρχικά προσδιορίζεται η θέση του μέγιστου βέλους (Σχ. 3) και στη θέση αυτή τοποθετείται μία κεκλιμένη κύλιση ώστε η αντίδραση στήριξης να έχει τη φορά του καλωδίου εάν αυτό υπήρχε (Σχ. 4).



Σχ. 3: Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη γεωμετρία κύριου φορέα χωρίς στήριξη

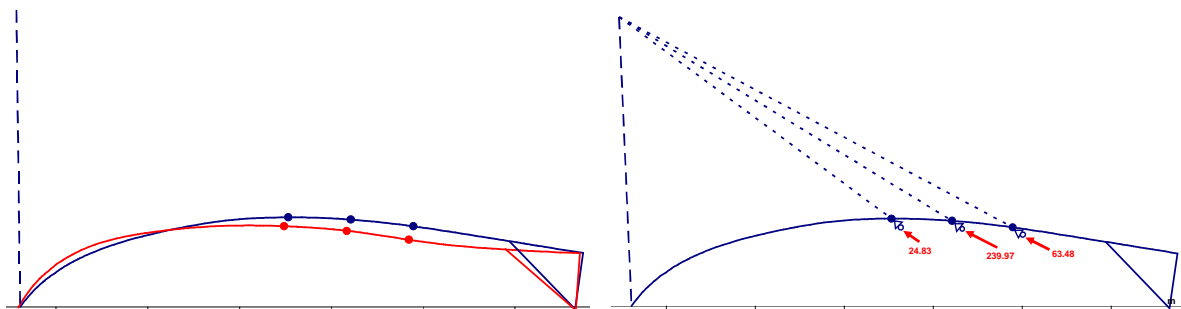


Σχ. 4: Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη γεωμετρία κύριου φορέα με μία στήριξη
 Η διαδικασία συνεχίζεται ομοίως τοποθετώντας κεκλιμένες κυλίσεις στις θέσεις μέγιστου βέλους. Όμως, λόγω της μεγάλης κλίσης που θα είχε, το τρίτο καλώδιο θα χαλάρωνε (Σχ. 5), όπως προκύπτει από την φορά της αντίστοιχης αντίδρασης στήριξης.



Σχ. 5: Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη γεωμετρία κύριου φορέα με τρεις στηρίξεις και αντιδράσεις στήριξης

Για να αντιμετωπιστεί αυτό γίνονται μικρές μετατοπίσεις των σημείων ανάρτησης και παράλληλα περιστρέφεται ο πυλώνας ώστε η κορυφή του να πλησιάσει προς το στεγάστρο και έτσι να βελτιωθούν οι κλίσεις των καλωδίων. Τα τελικά αποτελέσματα αυτής της φάσης παρουσιάζονται στο Σχ. 6.

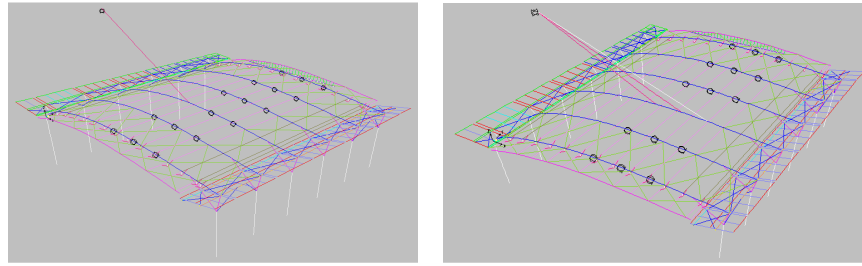


Σχ. 6: Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη γεωμετρία κύριου φορέα με τρεις στηρίξεις και αντιδράσεις στήριξης για βέλτιστη θέση καλωδίων και μετατόπιση πυλώνα κατά 2.0m

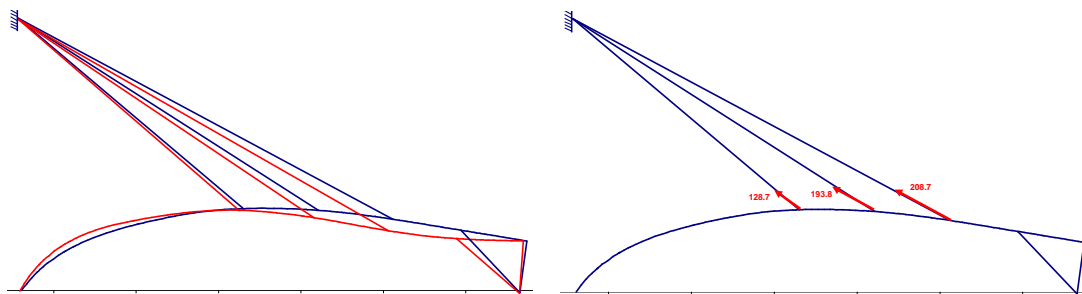
6. ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΛΙΣΕΩΝ ΜΕ ΚΑΛΩΔΙΑ

Η αντικατάσταση των στηρίξεων με καλώδια γίνεται για ένα φορέα κάθε φορά και για ένα καλώδιο, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις του στεγάστρου παραμένουν οι κυλίσεις (Σχ. 7). Η κορυφή του πυλώνα παραμένει ακλόνητη και αντίστοιχα οι κορυφές των καλωδίων. Η αρχική τιμή της προέντασης είναι η αντίδραση στήριξης που προέκυψε από τη διερεύνηση της θέσεως των καλωδίων. Η τελική τιμή της προέντασης προκύπτει από δοκιμές μέχρι να επιτευχθεί το βέλτιστο βέλος. Στη συνέχεια τοποθετούνται όλα τα καλώδια στον κύριο φορέα και γίνονται επιπλέον δοκιμές με μικρές αλλαγές των θέσεων των καλωδίων, με

στόχο την περαιτέρω μείωση των βελών. Τα αποτελέσματα για έναν κύριο φορέα παρουσιάζονται στο Σχ. 8.



Σχ. 7: Αντικατάσταση μιας στήριξης σε ένα κύριο φορέα από καλώδιο και ένας κύριος φορέας με τα καλώδια του



Σχ. 8: Απαραμόρφωτη - παραμορφωμένη γεωμετρία και δυνάμεις καλωδίων κύριου φορέα

7. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

Η διερεύνηση της προέντασης των καλωδίων ανάρτησης εφαρμόζεται με την κορυφή των πυλώνων ακλόνητη και για κάθε τοξωτό φορέα ξεχωριστά. Οι φορείς που δεν εξετάζονται δεν έχουν καλώδια αλλά κυλίσουν στις προαναφερθείσες θέσεις. Με δοκιμές μειώνεται το βέλος όσο το δυνατόν περισσότερο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίν. 1. Οι σημαντικές διαφορές μεταξύ αρχικής προέντασης που δηλώνεται για την ανάλυση και τελικής αξονικής δύναμης που προκύπτει οφείλεται στην συνολική παραμόρφωση του φορέα που προκαλεί αλλαγή της απόστασης μεταξύ των δύο άκρων κάθε καλωδίου.

	Αρχική προένταση P(kN)	Τελική αξονική ένταση N(kN)	Βέλος δ (m)
καλώδιο 1	400	161.1	-0.0017
καλώδιο 2	260	184.8	-0.0357
καλώδιο 3	240	206.9	-0.0578

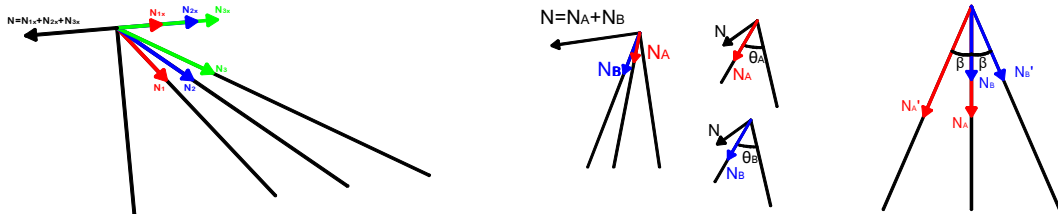
Πίν. 1: Αποτελέσματα τελικής δοκιμής προέντασης για έναν κύριο φορέα

8. ΚΑΛΩΔΙΑ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

Στη συνέχεια, τοποθετούνται όλα τα καλώδια ανάρτησης στο στέγαστρο. Για την εύρεση της προέντασής τους επιδιώκονται μηδενικές μετατοπίσεις στην κορυφή των πυλώνων. Οι εντάσεις των καλωδίων ανάρτησης αναλύονται στο χώρο κατά τη διεύθυνση των

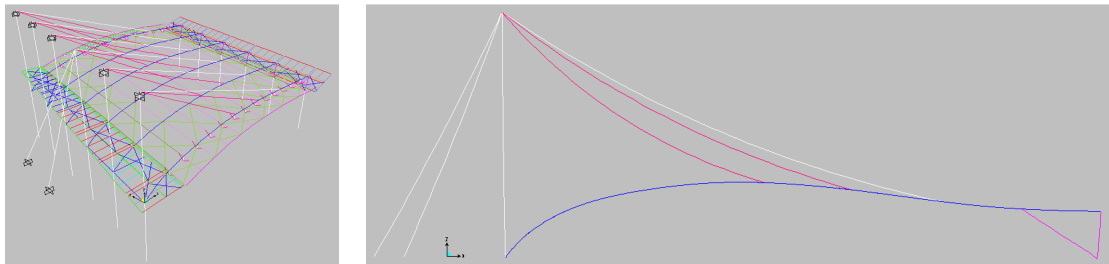
καλωδίων αντιστήριξης (Σχ. 9). Στο επίπεδο των καλωδίων ανάρτησης, η συνολική δύναμη που πρέπει να αντισταθμίσουν τα καλώδια αντιστήριξης είναι το άθροισμα των τριών κάθετων στον πυλώνα συνιστωσών εντάσεων των καλωδίων ανάρτησης. Στο επίπεδο των καλωδίων αντιστήριξης, κάθε καλώδιο αναλαμβάνει τη μισή δύναμη και αυτή αναλύεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (1).

$$N_i = \frac{N}{\sin \theta_i}, N'_i = \frac{N_i}{\cos \beta}, \quad (i = A, B) \quad (1)$$



Σχ. 9: Μετατροπή δυνάμεων καλωδίων ανάρτησης σε προένταση καλωδίων αντιστήριξης

Οι δοκιμές για τις δυνάμεις προέντασης των καλωδίων αντιστήριξης ξεκινούν από αυτές τις τιμές και η διαδικασία είναι αντίστοιχη με αυτή που ακολουθήθηκε για τα καλώδια ανάρτησης, μόνο που στην περίπτωση αυτή το μέγεθος που ελέγχεται είναι οι οριζόντιες μετατοπίσεις στην κορυφή κάθε πυλώνα. Τα αποτελέσματα για έναν κύριο φορέα παρουσιάζονται στο Σχ. 10.



Σχ. 10: Απαραμόρφωτη και παραμορφωμένη γεωμετρία για τις τελικές τιμές προέντασης ενός κύριου φορέα

Μετά την τοποθέτηση όλων των καλωδίων στο στέγαστρο, αυξάνεται ομοιόμορφα η προένταση όλων των καλωδίων κατά 10%. Οι τιμές αυτές αποτελούν και τις τελικές τιμές προέντασης για τα καλώδια του στεγάστρου. Οιακόλουθες αναλύσεις για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης σε οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας έδειξαν ικανοποίηση των ελέγχων επάρκειας.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε πολύπλοκους από άποψη γεωμετρίας και στατικού συστήματος καλωδιωτούς φορείς, συχνά δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή εφελκυστική λειτουργία των καλωδίων, καθώς πολλά από αυτά μπορεί να χαλαρώσουν. Πέραν των προβλημάτων κόπωσης που αυτό μπορεί να προκαλέσει στα ακραία τεμάχια των καλωδίων λόγω ανεξέλεγκτων ταλαντώσεων, η χαλάρωση δυσχεραίνει την σύγκλιση της μη γραμμικής ανάλυσης που προϋποθέτει μεγέθη προέντασης των καλωδίων που δεν απέχουν πολύ από τα ορθά καθώς

και λογική αναλογία δυσκαμψιών καλωδίων και φορέα. Η διαδικασία που περιγράφηκε στο παρόν άρθρο και εφαρμόστηκε για το ανηρτημένο στέγαστρο του Λυκείου του Αριστοτέλους, μπορεί να αποτελέσει κατάλληλη λύση για τέτοιες περιπτώσεις.

OPTIMUM LOCATIONS, CROSS-SECTIONS AND PRESTRESSING FORCES OF CABLES OF SUSPENDED ROOF COVERING ARISTOTLE'S LYCEUM

CharisJ. Gantes

Associate Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Konstantina Koulatsou

Civil Engineer N.T.U.A., M.S.C. N.T.U.A.

Athens, Greece

e-mail: konkoulatsou@gmail.com

SUMMARY

A methodology is proposed for obtaining optimum locations, cross-sections and prestressing forces of the cables of cable-suspended steel roofs with complex geometry and structural system. The methodology is presented for the roof covering the archaeological site of the School of Aristotle in Athens. According to the initial architectural study, five suspension cables should be used for each main arch, but as a result of the shape of the roof, several cables were found to relax under service loads. Therefore, an investigation of the optimum cable locations is carried out.

First, the maximum deflection of a cable-less arch under permanent loads is obtained and a roller is placed at the position of maximum deflection, with the direction of the cable. The next maximum deflection is found and a second roller is placed there. The sign of support reactions indicates whether the corresponding cables would be in tension. The procedure continues until all cable positions needed for satisfying serviceability criteria are found and reaction directions and magnitudes are satisfactory. Next, rollers are replaced by cables, considering the positions from which they are suspended as fixed and using the support reactions as initial indication of pre-stressing forces. Replacement takes place for one cable at a time and corrections to cable pre-stressing forces and cross-sections, if needed, are made, aiming at zero deflections of the arch at the suspension point. Then, all cables are included in the model and additional corrections are made. Next, pylons and back-stay cables are introduced and the pre-stressing forces of the latter are adjusted to ensure zero horizontal displacements at pylon tops. Finally, all load combinations are imposed, separate nonlinear analyses are carried out starting from the configuration corresponding to permanent loads and pre-stressing, and checks in the ultimate and serviceability limit states

are performed, including checks of cables against relaxation and tensile failure. If needed, cable pre-stressing forces and cross-sections are modified and the process is repeated.