

ΕΥΠΑΘΕΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΛΟΓΩ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΗΣ

Ισαβέλλα Βασιλοπούλου και Χάρης Ι. Γαντές
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου, Ελλάδα
e-mails: isabella@cental.ntua.gr, chgantes@cental.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης και της επακόλουθης αξονικής κόπωσης καλωδίων ανηρτημένων στεγών που υπόκεινται σε φορτία ανέμου. Το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται είναι δίκτυο καλωδίων, σχήματος υπερβολικού παραβολοειδούς, με κυκλική κάτοψη. Τα άκρα των καλωδίων θεωρούνται ακλόνητα. Εξετάζονται τρεις διαφορετικές χωρικές κατανομές της φόρτισης, τέτοιες ώστε να ακολουθούν τις πρώτες μορφές ταλάντωσης του συστήματος. Πραγματοποιούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση και υπολογίζεται ο δείκτης συσσώρευσης βλαβών λόγω κόπωσης. Εξετάζεται πώς οι θεωρούμενες κατανομές φόρτισης επηρεάζουν τη δυναμική απόκριση του δικτύου καλωδίων και την αντοχή του έναντι κόπωσης. Τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από στατικά φορτία ανέμου, όπως δίνονται στον Ευρωκώδικα 1.

2. ΓΕΝΙΚΑ

Η ιδέα της ανηρτημένης στέγης πρωτοεμφανίζεται το 70 π.Χ. με το “velarium” όπως λεγόταν η τέντα που χρησιμοποιούσαν οι Ρωμαίοι για την κάλυψη του Κολοσσαίου. Μία πιο μοντέρνα σύλληψη μιας τέτοιας κατασκευής ξαναεμφανίζεται αιώνες μετά, με τη μελέτη και ανέγερση της στέγης του Σταδίου Raleigh στη Βόρεια Καρολίνα των Ηνωμένων Πολιτειών το 1953, που αποτέλεσε την αρχή μίας νέας εποχής για τις καλωδιωτές στέγες. Στην Ελλάδα το καλύτερο παράδειγμα καλωδιωτής στέγης σχήματος υπερβολικού παραβολοειδούς, αποτελεί η ανηρτημένη στέγη του Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας στο Φάληρο, η πρώτη που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα, το 1983.

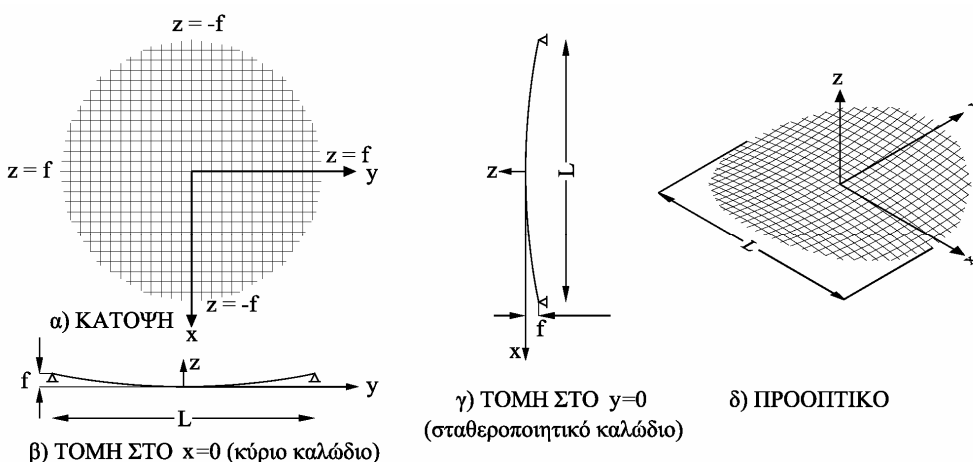
Τα δίκτυα καλωδίων ανήκουν στην κατηγορία των εφελκόμενων ελαφριών κατασκευών, που έχουν το πλεονέκτημα να γεφυρώνουν μεγάλα ανοίγματα με μικρό κόστος και να δημιουργούν επιφάνειες ασυνήθιστες και μοναδικές από αρχιτεκτονικής άποψης, αλλά είναι ευαίσθητες σε δυναμικά φορτία, όπως είναι ο άνεμος, με αποτέλεσμα να υπάρχει αυξημένος κίνδυνος να εκτελέσουν ταλαντώσεις μεγάλου εύρους και συνεπώς να παρουσιάσουν έντονα φαινόμενα κόπωσης. Παράλληλα, η δυναμική συμπεριφορά τους σε εξαναγκασμένες ταλαντώσεις είναι εξαιρετικά περίπλοκη, εφόσον εξαρτάται, όχι μόνο από τη συχνότητα του δυναμικού φορτίου και το εύρος του, αλλά και από τη σχέση μεταξύ των

ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος, καθώς και τη σχέση αυτών με τη συχνότητα του φορτίου. Πρόκειται για τους εσωτερικούς, τους υποαρμονικούς και υπεραρμονικούς συντονισμούς που χαρακτηρίζουν τα μη γραμμικά συστήματα [1] και καθιστούν τη δυναμική τους απόκριση απρόβλεπτη.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια να διερευνηθεί η συμπεριφορά ενός δικτύου καλωδίων, παρόμοιου με αυτό της στέγης του Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας, όταν υπόκειται σε φορτία ανέμου. Λαμβάνοντας υπόψη μία ιστορία ανέμου, με τρεις διαφορετικές κατανομές ανεμοπίεσης, προκύπτουν μερικά σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά στο σχεδιασμό των κατασκευών αυτών, έναντι φορτίων ανέμου και κόπωσης.

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Το τρισδιάστατο προσομοίωμα του δικτύου καλωδίων, που λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις, έχει κυκλική κάτοψη διαμέτρου $L=100\text{m}$ και σχηματίζει επιφάνεια υπερβολικού παραβολοειδούς, με λόγο βέλους προς άνοιγμα ίσο με $f/L=1/20$. Αποτελείται από δύο ομάδες καλωδίων, διατεταγμένων σε ορθογωνικό κάναβο, 25 κύρια καλώδια που αγκυρώνονται στα υψηλότερα σημεία του δικτύου και 25 σταθεροποιητικά καλώδια που αγκυρώνονται στα χαμηλότερα σημεία του δικτύου (Σχ. 1). Τα άκρα των καλωδίων θεωρούνται ακλόνητα. Όλα τα καλώδια έχουν την ίδια διατομή $\Phi 60$, και δεν μπορούν να παραλάβουν θλίψη. Η δύναμη προέντασης για τα κύρια καλώδια είναι 700kN ($\sigma=247\text{MPa}$) και για τα σταθεροποιητικά 800kN ($\sigma=283\text{MPa}$). Το υλικό των καλωδίων θεωρείται απείρως ελαστικό με μέτρο ελαστικότητας $E=165\text{GPa}$.



Σχ. 1: Γεωμετρία δικτύου καλωδίων

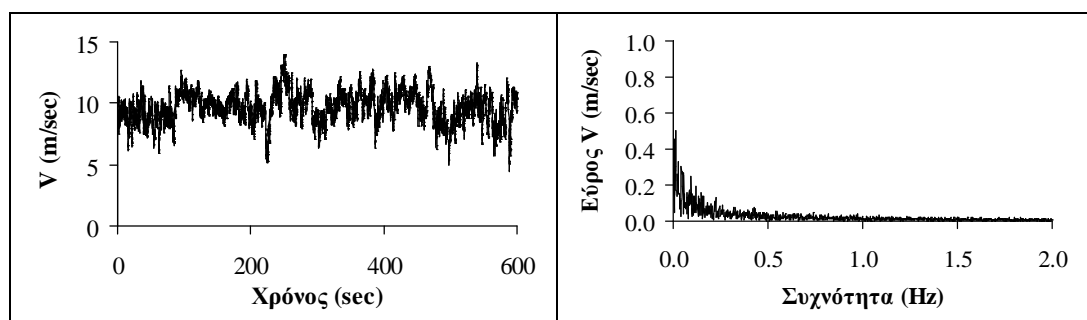
Οι αναλύσεις αφορούν σε φορτία ανεμοπίεσης, λαμβάνοντας επίσης υπόψη μόνιμα φορτία και προένταση καλωδίων. Ως μόνιμα φορτία θεωρούνται το ίδιο βάρος των καλωδίων ($\gamma=80\text{kN/m}^3$) και ένα φορτίο ίσο με $0,36\text{kN/m}^3$, όσο και το πρόσθετο μόνιμο φορτίο που ελήφθη υπόψη στη στατική μελέτη της στέγης του Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας. Σε όλες τις αναλύσεις που ακολουθούν, ως αρχική κατάσταση θεωρείται το προεντεταμένο δίκτυο, φορτισμένο και παραμορφωμένο από τα μόνιμα φορτία.

Αρχικά, πραγματοποιείται μη γραμμική στατική ανάλυση με θεώρηση στατικού φορτίου υποπίεσης ανέμου, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 [2], όπου η ανεμοπίεση υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, η οποία αποτελείται

από δύο όρους: α) τη μέση ταχύτητα, που εξαρτάται από τη βασική ταχύτητα ανέμου και την τραχύτητα του εδάφους και β) τη διακύμανση της ταχύτητας, η οποία προσαυξάνεται με έναν δυναμικό συντελεστή. Για την ανάλυση, λαμβάνεται μήκος τραχύτητας $z_0=0,01$ (επιφάνειες οριζόντιες χωρίς εμπόδια και χωρίς ιδιαίτερη βλάστηση), συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης $c_0(z)=1$ (επίπεδες επιφάνειες εδάφους), βασική ταχύτητα ανέμου $v_b=v_{b,0}=30\text{m/sec}$ και συντελεστής εξωτερικής πίεσης $c_{pe}=-0,8$, τιμή που προτείνεται για δίρριχτες στέγες, όπως θα μπορούσε προσεγγιστικά να χαρακτηριστεί το δίκτυο καλωδίων σχήματος υπερβολικού παραβολοειδούς, με γωνία κλίσης περίπου $\pm 5^\circ$. Το φορτίο ανέμου εφαρμόζεται ως υποπίεση υπό τη μορφή κατακόρυφων επικόμβιων φορτίων σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Σύμφωνα με τις παραδοχές αυτές, η ταχύτητα του ανέμου στα 30m, όπου θεωρείται ότι είναι το υψόμετρο του κεντρικού κόμβου του δικτύου, προκύπτει ίση με $V=40,77\text{m/sec}$, ενώ η πίεση ανέμου στην επιφάνεια του δικτύου ίση με $w=-1,14\text{kN/m}^2$.

Στη συνέχεια, εκτελείται μη γραμμική δυναμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση. Αρχικά, θεωρώντας τα μόνιμα φορτία ως μάζες του συστήματος, υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος και οι αντίστοιχες ιδιομορφές με γραμμική ιδιομορφική ανάλυση. Οι μορφές ταλάντωσης του συστήματος μπορούν να διαχωριστούν σε συμμετρικές ιδιομορφές, οι οποίες αποτελούνται από συμμετρικές κατακόρυφες συνιστώσες και αντισυμμετρικές οριζόντιες συνιστώσες ως προς τους οριζόντιους καθολικούς άξονες x και y και σε αντισυμμετρικές ιδιομορφές με αντισυμμετρικές κατακόρυφες συνιστώσες και συμμετρικές οριζόντιες συνιστώσες ως προς έναν ή και τους δύο οριζόντιους άξονες x και y [3]. Έπειτα, διεξάγεται μη γραμμική στατική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη την προένταση και τα μόνιμα φορτία, ενώ στη συνέχεια, προστίθεται το δυναμικό φορτίο του ανέμου και ακολουθεί μη γραμμική δυναμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση. Με τον τρόπο αυτό, στη δυναμική ανάλυση λαμβάνεται υπόψη ως αρχική κατάσταση ισορροπίας, η δυσκαμψία του συστήματος καθώς και η εντατική κατάσταση των καλωδίων λόγω των μόνιμων φορτίων. Επισημαίνεται ότι δεν λαμβάνεται υπόψη απόσβεση στο σύστημα.

Στη μη γραμμική δυναμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση, χρησιμοποιείται μία από τις ανεμομετρήσεις που καταγράφηκαν στα πλαίσια του προγράμματος LIST [4]. Στην παρούσα εργασία, λαμβάνεται υπόψη μία καταγραφή οριζόντιας συνιστώσας ταχύτητας ανέμου, με διάρκεια 600sec και συχνότητα καταγραφής 30Hz. Το υψόμετρο του ανεμομέτρου ήταν 31,40m. Το διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου V σε σχέση με το χρόνο, καθώς και το αντίστοιχο φάσμα δίνονται στο Σχ. 2. Σημειώνεται ότι η χρονοϊστορία αυτή, είναι μία πραγματική καταγραφή ταχύτητας ανέμου, η οποία δεν σχετίζεται με την ταχύτητα ανέμου και επομένως ούτε με το στατικό φορτίο ανέμου που προτείνει ο Ευρωκώδικας.



Σχ. 2: Χρονοϊστορία και φάσμα ταχύτητας ανέμου

Η πίεση του ανέμου στην κατασκευή υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [2], και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

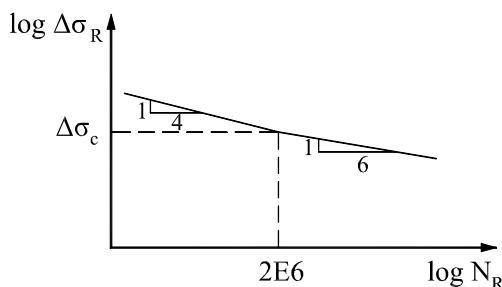
$$w_e = c_{pe} \cdot 1/2 \rho (V)^2 \quad (1)$$

όπου V είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/sec), ρ η πυκνότητα του αέρα ίση με $1,25 \text{ kg/m}^3$ και $c_{pe} = -0,80$. Και στην περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης, η ανεμοπίεση εφαρμόζεται ως κατακόρυφο επικόμβιο φορτίο σε όλους τους κόμβους του δικτύου, ακολουθώντας τρεις διαφορετικές κατανομές στην επιφάνεια του δικτύου, όπως εξηγείται παρακάτω.

Από τη δυναμική ανάλυση, προκύπτουν διαγράμματα έντασης καλωδίων, καθώς και διαγράμματα κατακορύφων παραμορφώσεων σε σχέση με το χρόνο και φάσματα αυτών, προκειμένου να ελεγχθούν οι συχνότητες με τις οποίες ταλαντώνονται τα καλώδια. Μελετώνται τα μέλη που παρουσιάζουν τη μέγιστη ένταση και οι κόμβοι που παρουσιάζουν τη μέγιστη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια επιβολής του φορτίου του ανέμου. Ως μέση τιμή της τάσης των καλωδίων, υπολογίζεται η ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων (root mean square = RMS) των τάσεων που υπολογίζονται σε κάθε βήμα της ανάλυσης. Στη συνέχεια, καταμετρώνται οι κύκλοι της διακύμανσης της τάσης γύρω από την τιμή RMS, που είναι μεγαλύτερη από την τάση σταθερού εύρους $\Delta\sigma_c$ που αντιστοιχεί στην κατάλληλη κατηγορία λεπτομέρειας. Υπολογίζεται ο δείκτης συσσώρευσης βλαβών D σύμφωνα με τον κανόνα Palmgren-Miner:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (2)$$

όπου n_{Ei} είναι ο αριθμός των καταμετρούμενων κύκλων που αντιστοιχεί σε εύρος τάσεων $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_c$ (αντοχή σε κόπωση) και N_{Ri} η διάρκεια ζωής (σε κύκλους) που προκύπτει από την καμπύλη αντοχής σε κόπωση για σταθερό εύρος τάσεων $\Delta\sigma_i$ [5]. Η καμπύλη αντοχής σε κόπωση (Wöhler) δίνεται από το μέρος 1.11 του Ευρωκώδικα 3 [6] για καλώδια κατηγορίας B και κατηγορία λεπτομέρειας $\Delta\sigma_c = 150 \text{ MPa}$ που αντιστοιχεί σε $N = 2 \cdot 10^6$ κύκλους (Σχ. 3).



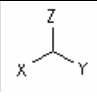
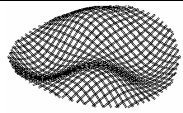
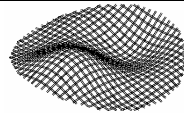
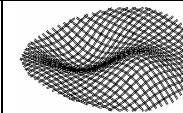
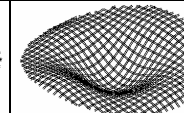
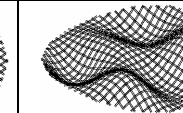
Σχ. 3: Καμπύλη Wöhler για καλώδια

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Από τη μη γραμμική στατική ανάλυση, όπου γίνεται στατική θεώρηση του φορτίου ανέμου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, προκύπτει ότι η μέγιστη παραμόρφωση στον κεντρικό κόμβο του δικτύου είναι ίση με $0,21 \text{ m}$, ενώ η μέγιστη ένταση στα σταθεροποιητικά καλώδια είναι ίση με 1119 kN

($\sigma=395\text{MPa}$). Αξίζει να σημειωθεί ότι είτε θεωρηθεί ως αρχική κατάσταση η παραμορφωμένη κατάσταση λόγω μονίμων φορτίων και έπειτα προστεθεί η φόρτιση του ανέμου, είτε όλα τα φορτία εφαρμοστούν ταυτόχρονα, η στατική απόκριση είναι ίδια.

Οι μορφές ταλάντωσης και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του δικτύου καλωδίων, δίνονται στο Σχ. 4 με τη σειρά που εμφανίζονται, όπου $A1xy$, $A1y$ και $A1x$ ορίζονται οι πρώτες αντισυμμετρικές ιδιομορφές ως προς τους δύο οριζόντιους άξονες, ως προς τον οριζόντιο άξονα y και ως προς τον οριζόντιο άξονα x αντίστοιχα, S ορίζεται η πρώτη συμμετρική ιδιομορφή, ενώ $A2x$ ορίζεται η δεύτερη αντισυμμετρική ιδιομορφή ως προς τον άξονα x .

					
	1) $A1xy$	2) $A1y$	3) $A1x$	4) S	5) $A2x$
ω (sec^{-1})	6,40	6,70	6,78	7,18	8,20
f (Hz)	1,02	1,07	1,08	1,14	1,30

Σχ. 4: Ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές δικτύου καλωδίων

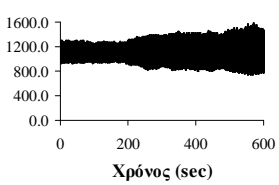
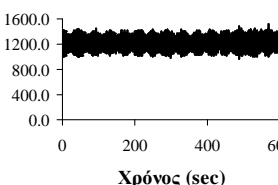
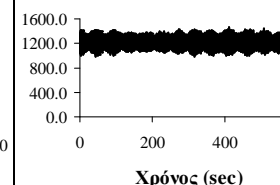
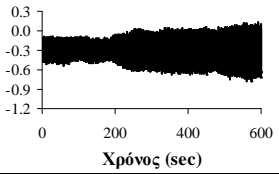
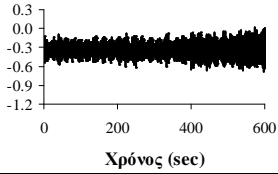
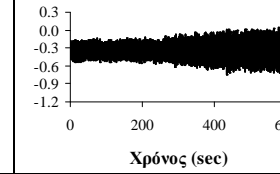
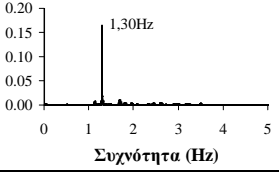
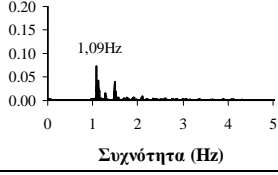
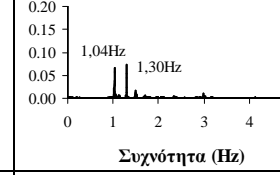
Από τη μη γραμμική στατική ανάλυση για τα μόνιμα φορτία, που θα θεωρηθεί ως αρχική κατάσταση για τη δυναμική ανάλυση, η μέγιστη ένταση που παρατηρείται είναι $1016,7\text{kN}$ ($359,6\text{MPa}$), ενώ η μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση στον κεντρικό κόμβο είναι ίση με $-0,21\text{m}$ (το αρνητικό πρόσημο δηλώνει φορά προς τον $-z$ καθολικό άξονα, δηλαδή προς την φορά που ενεργεί το ίδιο βάρος). Για την ανεμοπίεση θεωρούνται τρεις διαφορετικές χωρικές κατανομές του φορτίου ανέμου στην κατασκευή, μία σύμφωνα με τη συμμετρική ιδιομορφή (S) με φορτίο υποπίεσης, μία σύμφωνα με την αντισυμμετρική ιδιομορφή ως προς τον οριζόντιο άξονα x (Ax) και μία σύμφωνα με την αντισυμμετρική ιδιομορφή ως προς τους δύο οριζόντιους άξονες x και y (Axy).

Τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης δίνονται στο Σχ. 5. Η μέγιστη ένταση των καλωδίων που προκύπτει από την ανάλυση με στατική θεώρηση της ανεμοπίεσης, είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει από τη δυναμική ανάλυση για συμμετρική κατανομή, κατά 30%, παρ' όλο που η ταχύτητα του ανέμου στη δεύτερη περίπτωση δεν ξεπερνάει τα 15m/sec , περίπου 37% της ταχύτητας που ελήφθη για τη στατική ανάλυση ($V=40,77\text{m/sec}$). Επίσης η μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη περίπτωση είναι $-0,79\text{m}$, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει στην πρώτη περίπτωση ($= -0,21\text{m}$).

Από τα φάσματα παραμόρφωσης των κόμβων που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης, για κάθε μία κατανομή ξεχωριστά, παρατηρείται ότι το δίκτυο ταλαντώνεται με συχνότητες μεγαλύτερες του 1Hz , παρ' όλο που οι κύριες συχνότητες του ανέμου είναι πολύ μικρότερες (Σχ. 3). Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι τα μεγαλύτερα εύρη ταλάντωσης πραγματοποιούνται με συχνότητες περίπου ίσες με τις ιδιοσυχνότητες των πρώτων ιδιομορφών του συστήματος και πιο συγκεκριμένα, για την συμμετρική κατανομή ενεργοποιείται κυρίως η 5^η ιδιομορφή που είναι η δεύτερη αντισυμμετρική ιδιομορφή ως προς τον άξονα x με ιδιοσυχνότητα $1,30\text{Hz}$, ενώ για τις αντισυμμετρικές κατανομές ενεργοποιούνται κυρίως οι ιδιομορφές σύμφωνα με τις οποίες θεωρήθηκε η κατανομή του φορτίου. Ωστόσο, εκτός από αυτές τις ιδιομορφές ενεργοποιούνται κι άλλες ιδιομορφές που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες ιδιοσυχνότητες, με μικρότερα εύρη ταλαντώσεων. Αυτό ερμηνεύεται από τη θεωρία ταλαντώσεων μη γραμμικών συστημάτων, σύμφωνα με την οποία, σε περίπτωση που οι συχνότητες του εξωτερικού αιτίου είναι μικρότερες των

ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος, υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστεί το φαινόμενο του υπεραρμονικού συντονισμού, σύμφωνα με το οποίο το σύστημα εκτελεί ταλάντωση μεγάλου εύρους με συχνότητα ίση με την ιδιοσυχνότητά του.

Τέλος, η κατανομή που ακολουθεί την πρώτη συμμετρική ιδιομορφή, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο δείκτη συσσώρευσης βλαβών D λόγω κόπωσης, έναντι των κατανομών που αντιστοιχούν στις αντισυμμετρικές ιδιομορφές, που σημαίνει ότι για τις αντισυμμετρικές κατανομές του φορτίου δεν εκτελούνται πολλοί κύκλοι με διακύμανση τάσης μεγαλύτερη των 150MPa, παρ' όλο που η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τάσης του καλωδίου το οποίο παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση, δεν διαφέρει πολύ από τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τη συμμετρική κατανομή της ανεμοπίεσης.

	Χωρική κατανομή φορτίου		
	Συμμετρική	Αντισυμμετρική κατά x	Αντισυμμετρική κατά x και y
Μέγιστη ένταση καλωδίου (kN)			
Μέγιστη παραμόρφωση z (m)			
Εύρος μέγιστης παραμόρφωσης z (m)			
max παραμόρφωση	-0,79m	-0,68m	-0,74m
min ένταση T (σ)	736kN (260MPa)	971kN (343MPa)	983kN (348MPa)
max ένταση T (σ)	1577kN (558MPa)	1520kN (538MPa)	1460kN (516MPa)
rms T (σ)	1130kN (441MPa)	1221kN (432MPa)	1219kN (431MPa)
δείκτης D	0,0011680	0,0000068	0,0000027

Σχ. 5: Δυναμική απόκριση δικτύου καλωδίων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε η δυναμική απόκριση σε φορτία ανέμου ενός δικτύου καλωδίων, παρόμοιου με αυτό που στεγάζει το στάδιο Ειρήνης και Φιλίας στο Φάληρο και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα αυτής με τα αποτελέσματα της ισοδύναμης στατικής ανάλυσης που προτείνει ο Ευρωκώδικας. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι, αν τα φορτία ανέμου ληφθούν ως δυναμικά φορτία, η απόκριση του δικτύου καλωδίων είναι πολύ δυσμενέστερη, σε σχέση με την περίπτωση κατά την οποία ο άνεμος θεωρείται ως στατικό φορτίο, ακόμα και αν η ταχύτητα ανέμου για τη στατική θεώρηση του ανέμου ληφθεί πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας της ιστορίας ανέμου. Επομένως, για το σχεδιασμό καλωδιωτών στεγών, η εφαρμογή των κανονιστικών

διατάξεων, όσον αφορά στην εισαγωγή φορτίων ανέμου, είναι ανεπαρκής και κατά της ασφαλείας. Θα πρέπει να γίνονται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με πραγματικές καταγραφές φορτίων ανέμου. Επίσης, παρ' όλο που οι συχνότητες του ανέμου είναι πολύ μικρότερες από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του συστήματος παρατηρούνται ταλαντώσεις μεγάλου εύρους, που είναι αποτέλεσμα υπεραρμονικών, ίσως και εσωτερικών συντονισμών. Έτσι, για τα μη γραμμικά συστήματα, που η απόκρισή τους εξαρτάται μη γραμμικά τόσο από το μέγεθος, όσο και από τη συχνότητα ενός δυναμικού φορτίου, όπως είναι ο άνεμος, καθώς επίσης και από τη σχέση μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων του ίδιου του συστήματος, η χρήση ισοδύναμων στατικών αναλύσεων δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, ακόμα και αν ληφθούν υπόψη κάποιοι δυναμικοί συντελεστές προσαύξησης, επειδή η δυναμική απόκριση των συστημάτων αυτών είναι περίπλοκη και απρόβλεπτη λόγω των μη γραμμικών συντονισμών.

Παράλληλα, εξετάστηκε ο δείκτης συσσώρευσης βλαβών λόγω κόπωσης για τρεις κατανομές της ανεμοπίεσης, σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές του συστήματος. Παρατηρήθηκε ότι η κατανομή που ακολουθεί την πρώτη συμμετρική ιδιομορφή, παρουσιάζει μεγαλύτερο δείκτη συσσώρευσης βλαβών έναντι της κατανομής που αντιστοιχεί στην πρώτη αντισυμμετρική ιδιομορφή ως προς τον έναν ή και τους δύο οριζόντιους καθολικούς άξονες. Ωστόσο, οι μέγιστες εντάσεις που παρατηρήθηκαν και για τις τρεις κατανομές, δεν διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο από 8%.

Λόγω του ασυνήθιστου σχήματος της επιφάνειας του υπερβολικού παραβολοειδούς που δημιουργείται, περαιτέρω έρευνα θα συμπεριλάβει ακριβέστερες κατανομές ανέμου και συντελεστών εξωτερικής πίεσης ανά περιοχές του δικτύου καλωδίων. Επίσης, θα πρέπει να γίνουν παραμετρικές αναλύσεις για όλα τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως το εμβαδόν της διατομής των καλωδίων, το επίπεδο της προέντασης, το μέτρο ελαστικότητας των καλωδίων, τη μάζα των καλωδίων, το λόγο f/L , καθώς και την τιμή του συντελεστή λ^2 [7], προκειμένου να διερευνηθεί πλήρως ο βαθμός που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των δικτύων καλωδίων σε ανεμοπίεσεις καθώς και την αντοχή των καλωδίων σε κόπωση. Τέλος θα πρέπει να διερευνηθεί η επιρροή της απόσβεσης του συστήματος στη δυναμική συμπεριφορά του, καθώς και στην αντοχή του σε κόπωση.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] VASSILOPOULOU, I., GANTES, C. J., “Similarity relations for nonlinear dynamic oscillations of a cable net”, 1st International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering – (COMPDYN2007), Rethymno, Crete, Greece, 2007, abstract pp.373
- [2] EUROCODE 1, PART 1.4 “General actions – Wind actions”, (2003).
- [3] VASSILOPOULOU, I., GANTES, C. J., “Modal transition and dynamic nonlinear response of cable nets under fundamental resonance”, 8th HSTAM International Congress on Mechanics, Patras, Greece, Vol. II, 2007, pp. 787-794
- [4] SUTHERLAND, H.J., JONES, P.L. and NEAL B.A. “The long-term inflow and structural test program” Wind Energy 2001, ASME / AIAA-2001-0039.
- [5] EUROCODE 3, PART 1.9 “Fatigue”, (2003).
- [6] EUROCODE 3, PART 1.11 “Design of structures with tension components”, (2003)
- [7] VASSILOPOULOU, I., GANTES, C. J., “Vibration modes and dynamic response of saddle form cable nets”, Journal of Sound and Vibration, 2008 (έχει υποβληθεί)

SENSITIVITY OF CABLE NETS TO WIND-INDUCED FATIGUE**Isabella Vassilopoulou and Charis J. Gantes**

Metal Structures Laboratory

School of Civil Engineering NTUA

9 Iroon Polytechniou, GR-15780 Zografou - Athens, Greece

isabella@central.ntua.gr, chgantes@central.ntua.gr

ABSTRACT

In the present paper an investigation is presented, regarding the dynamic response of suspended roof cables subjected to wind loads and the axial fatigue of the cables due to the cyclic loading. The model utilized is a saddle shaped cable net with circular plan view, having a diameter of 100m. The net consists of two groups of cables, 25 supporting ones and 25 stabilizing ones, arranged in a orthogonal grid at equal distances. The cable edges are assumed to be fixed. The net subjected to wind loads and it is uniformly loaded with nodal loads. Three different spatial load distributions of the wind are examined, following the first eigenmodes of the system.

A typical Wöhler curve for the cable fatigue resistance is used, giving the relation between the number of load cycles and the corresponding constant-amplitude stress range that the cable can withstand. Then, the stress spectrum is determined, counting the cycles for which a stress range larger than the fatigue strength is observed. In order to estimate the fatigue life of the cables, the damage is calculated according to the Palmgren – Miner rule. Several time history nonlinear dynamic analyses are conducted and it is examined how the load distributions assumed influence the dynamic response of the system and its resistance to fatigue.