

## ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ

### **Ισαβέλλα Βασιλοπούλου**

Πολιτικός Μηχανικός, Υ.Δ. ΕΜΠ  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [isabella@central.ntua.gr](mailto:isabella@central.ntua.gr)

### **Χάρης Ι. Γαντές**

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

### **Ηλίας Γκιμούσης**

Πολιτικός Μηχανικός, Μεταπτυχιακός σπουδαστής ΕΜΠ  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αθήνα, Ελλάδα  
e-mail: [iliasgkim@hotmail.com](mailto:iliasgkim@hotmail.com)

## **1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η μη γραμμική δυναμική συμπεριφορά δικτύων καλωδίων υπό δράσεις ανέμου, σε όρους μεγίστων μετακινήσεων και εντάσεων καλωδίων. Τα καλώδια του δικτύου θεωρείται ότι είτε έχουν ακλόνητες στηρίξεις, είτε αγκυρώνονται σε ένα παραμορφώσιμο περιμετρικό δακτύλιο. Τα αποτελέσματα των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από ισοδύναμες στατικές αναλύσεις, όπως προτείνονται από τον Ευρωκώδικα 1. Από την διερεύνηση προκύπτει ότι η παραμορφωσιμότητα του δακτυλίου επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου καλωδίων. Παράλληλα, οι ισοδύναμες στατικές μέθοδοι προκύπτουν ανεπαρκείς για τέτοιες κατασκευές, οδηγώντας σε μη ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση της κατασκευής, καθώς δεν μπορούν να προβλέψουν δευτερεύοντες συντονισμούς που χαρακτηρίζουν τα μη γραμμικά συστήματα.

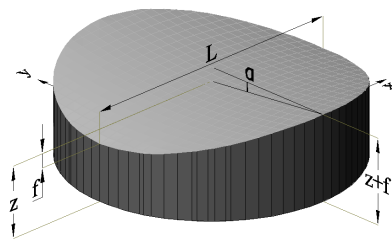
## **2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα δίκτυα καλωδίων είναι καλωδιωτές κατασκευές που λόγω των διπλών και αντίθετων καμπυλοτήτων θεωρούνται πολύ πιο δύσκαμπτες από τα απλά καλώδια. Η ασθενής αυτή μη γραμμική συμπεριφορά επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα της απόκρισης σε στατικά φορτία τα οποία δίνουν δρόμους ισορροπίας σχεδόν γραμμικούς. Ωστόσο, η δυναμική

συμπεριφορά των μη γραμμικών συστημάτων χαρακτηρίζεται από έντονα φαινόμενα συντονισμού. Μικρές συχνότητες του φορτίου μπορούν να συντονίσουν την κατασκευή υπεραρμονικά, προκαλώντας μεγάλα εύρη ταλάντωσης, ενώ μεγάλες συχνότητες του φορτίου μπορούν να προκαλέσουν υποαρμονικούς συντονισμούς, που πολλές φορές έχουν αποδειχθεί καταστροφικοί. Παράλληλα, ασθενείς εξωτερικές διεγέρσεις με συχνότητα κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος οδηγούν σε θεμελιώδεις συντονισμούς με μεγάλες ταλαντώσεις, παρά την ύπαρξη απόσβεσης. Σε αυτήν την εργασία μελετάται η μη γραμμική συμπεριφορά δικτύων καλωδίων που υπόκεινται σε φορτία ανέμου. Οι συχνότητες του εξωτερικού φορτίου συγκρίνονται με αυτές της ταλάντωσης και διαπιστώνεται ότι λαμβάνουν χώρα μη γραμμικοί συντονισμοί. Η δυναμική απόκριση συγκρίνεται με αυτήν υπό ισοδύναμα στατικά φορτία ανέμου ενισχυμένα με δυναμικούς συντελεστές, λαμβάνοντας υπόψη και στροβιλισμούς, σύμφωνα με τις συστάσεις του Ευρωκώδικα 1 [1]. Επιπροσθέτως ελέγχεται κατά πόσο η παραμορφωσιμότητα του περιμετρικού δακτυλίου επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου καλωδίων.

### 3. ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Το δίκτυο καλωδίων που χρησιμοποιείται στις αναλύσεις, έχει κυκλική κάτοψη διαμέτρου  $L=100\text{m}$  και σχηματίζει επιφάνεια υπερβολικού παραβολοειδούς, με λόγο βέλους προς άνοιγμα ίσο με  $f/L=1/20$ . Το υψόμετρο του κεντρικού κόμβου θεωρείται ίσο με  $z=25\text{m}$ . Η γωνία της οροφής ορίζεται ως  $\alpha=\arctan(2f/L)$  (Σχ. 1). Το δίκτυο αποτελείται από 25 καλώδια ανά κατεύθυνση, διατεταγμένα σε ορθογωνικό κάνναβο αποστάσεων  $L/(25+1)=3,846\text{m}$ . Όλα τα καλώδια έχουν την ίδια διατομή  $\Phi 50$ , μάζα  $m=7.85\text{kN}\cdot\text{sec}^2\cdot\text{m}^{-4}$  και αρχική δύναμη προέντασης  $600\text{kN}$ . Το υλικό των καλωδίων θεωρείται ελαστικό με μέτρο ελαστικότητας  $E=165\text{GPa}$  στον εφελκόμενο κλάδο και με μέγιστη επιτρεπόμενη τάση ίση με το όριο διαρροής  $\sigma_y=1570\text{MPa}$ . Τα καλώδια μορφώνονται ως στοιχεία δικτύωματος με αρχική επιμήκυνση που αντιστοιχεί στην αρχική προένταση, χωρίς να μπορούν να αναπτύξουν θλίψη.

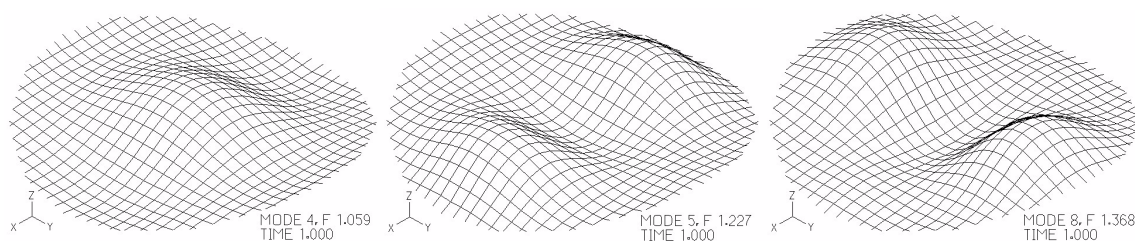


Σχ. 1: Γεωμετρία προσομοιώματος δικτύου καλωδίων

Δύο δίκτυα καλωδίων λαμβάνονται υπόψη: στο πρώτο, τα άκρα των καλωδίων θεωρούνται ακλόνητα, ενώ στο δεύτερο τα καλώδια αγκυρώνονται σε έναν παραμορφώσιμο περιμετρικό δακτύλιο. Στη δεύτερη περίπτωση όλοι οι κόμβοι του δακτυλίου είναι δεσμευμένοι στην κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ για τους τέσσερις κόμβους που βρίσκονται πάνω στους άξονες  $x$  και  $y$  δεσμεύονται μόνο οι επαπτομενικές μετακινήσεις. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η ακτινική παραμόρφωση του δακτυλίου, αλλά όχι η περιστροφή του περί τον κατακόρυφο άξονα. Η διατομή του δακτυλίου είναι κοίλη τετραγωνική πλευράς  $6,00\text{m}$  με πάχος τοιχωμάτων ίσο με  $0,60\text{m}$ . Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του λαμβάνεται ίσο με  $37\text{GPa}$ . Το ποσοστό απόσβεσης και για τα δύο συστήματα λαμβάνεται ίσο με  $\zeta=2\%$ , και εισάγεται στο σύστημα με τη μορφή απόσβεσης Raleigh. Η κατασκευή θεωρείται ότι δεν έχει πλευρικά ανοίγματα.

#### 4. ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Αρχικά, πραγματοποιείται μη γραμμική στατική ανάλυση υπό το ίδιο βάρος των καλωδίων, την προένταση και ένα πρόσθετο μόνιμο φορτίο ίσο με  $0,36\text{kN/m}^2$ , το οποίο κατανέμεται στους κόμβους λαμβάνοντας ως επιφάνεια επιρροής για κάθε κόμβο  $A_{\text{ref}}=(3,846\text{m})^2$ . Έπειτα υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές λαμβάνοντας υπόψη ως αρχική κατάσταση την παραμορφωμένη κατάσταση υπό τα μόνιμα φορτία και προσθέτοντας τις μάζες που αντιστοιχούν στα μόνιμα φορτία. Όλες οι μάζες θεωρούνται συγκεντρωμένες στους κόμβους. Η μέγιστη παραμόρφωση του δικτύου, θεωρώντας ακλόνητες στηρίξεις καλωδίων, προκύπτει  $-0,22\text{m}$  (προς τα κάτω), ενώ η ελάχιστη και η μέγιστη τάση καλωδίων είναι  $388\text{kN}$  και  $826\text{kN}$ , αντίστοιχα. Η πρώτη ιδιομορφή του συστήματος είναι αντισυμμετρική ως προς τους δύο οριζόντιους άξονες με συχνότητα  $0,976\text{Hz}$ . Οι δύο επόμενες ιδιομορφές είναι αντισυμμετρικές ως προς τον  $x$  και τον  $y$  άξονα με συχνότητες  $0,991\text{Hz}$  και  $1,013\text{Hz}$ , αντίστοιχα. Η τέταρτη ιδιομορφή είναι συμμετρική με συχνότητα  $1,059\text{Hz}$ . Οι ιδιομορφές που ακολουθούν είναι συμμετρικές ή αντισυμμετρικές ως προς τον έναν ή και τους δύο οριζόντιους άξονες. Στο Σχ. 2 παρουσιάζονται οι τρεις πρώτες συμμετρικές ιδιομορφές.



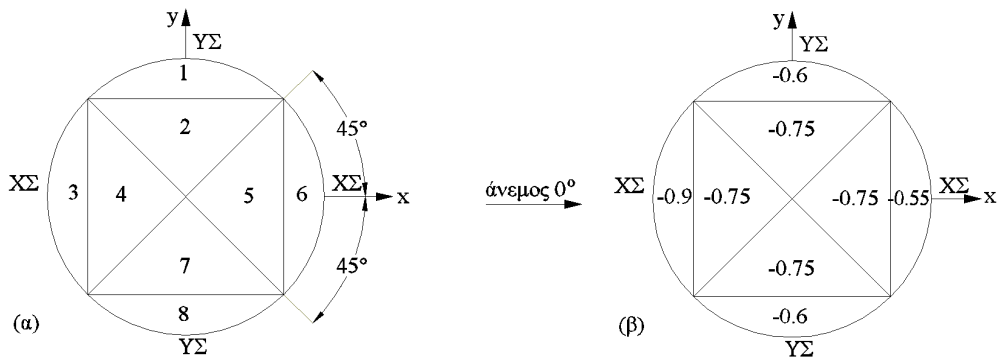
Σχ. 2: Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες δικτύου καλωδίων

Για το δίκτυο καλωδίων με τον περιμετρικό δακτύλιο τα αντίστοιχα μεγέθη είναι  $-0,35\text{m}$ ,  $403\text{kN}$  και  $813\text{kN}$ . Η παραμόρφωση του δικτύου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του δικτύου καλωδίων με ακλόνητες στηρίξεις, αλλά οι εντάσεις των καλωδίων είναι λίγο μικρότερες. Στην περίπτωση που προσομοιώνεται ο περιμετρικός δακτύλιος, η πρώτη ιδιομορφή του συστήματος αφορά στο δακτύλιο. Η ιδιομορφή αυτή είναι συμμετρική, με συχνότητα  $0,882\text{Hz}$ , και προκαλεί συμμετρική ταλάντωση στο δίκτυο καλωδίων. Η πρώτη ιδιομορφή του δικτύου καλωδίων είναι η πέμπτη ιδιομορφή του συστήματος με συχνότητα  $1,171\text{Hz}$ .

#### 5. ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΝΕΜΟΥ

Η χωρική κατανομή ανέμου βασίζεται στις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1 [1]. Για να υπολογιστούν οι συντελεστές πίεσης  $c_{pe}$  στην επιφάνεια του δικτύου καλωδίων, η στέγη χωρίζεται σε ζώνες ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου και την ισοδύναμη κλίση της στέγης που δίνεται από τη γωνία  $\alpha$ . Για λόγο βέλους προς άνοιγμα ίσο με  $f/L=1/20$ , η γωνία αυτή είναι ίση με  $\alpha=5,71^\circ$ . Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη διεύθυνση ανέμου κατά τον άξονα  $x$  (άνεμος  $0^\circ$ ). Σε αυτήν την περίπτωση οι ζώνες ανεμοπίεσης και οι συντελεστές  $c_{pe}$  δίνονται στο Σχ. 3, όπου για τις ζώνες 3, 4, 5, 6 θεωρείται ότι το δίκτυο προσομοιώνεται ως θόλος, ενώ για τις ζώνες 1, 2, 7 και 8 ως δικλινή στέγη με αρνητική γωνία κλίσης. Στο Σχ. 3 ΥΣ σημαίνει «Υψηλά Σημεία», ενώ ΧΣ «Χαμηλά Σημεία». Σε όλη την επιφάνεια παρατηρούνται αρνητικοί συντελεστές πίεσης που δηλώνουν υποπίεση ανέμου. Οι συντελεστές πίεσης του Σχ. 3 συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα πειραμάτων στεγών σχήματος υπερβολικού παραβολοειδούς σε αεροδυναμική σήραγγα [2] και

θεωρούνται πιο συντηρητικοί, χωρίς ωστόσο να υπερβαίνουν τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές που μετρήθηκαν στα πειράματα περισσότερο από 20%.



Σχ. 3: Χωρική κατανομή ανέμου: α) Ζώνες ανεμοπίεσης β) Συντελεστές πίεσης  $c_{pe}$

## 6. ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΝΕΜΟΥ

### 6.1 Μέση ταχύτητα ανέμου

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 [1], η μέση ταχύτητα ανέμου  $V_m(z)$  σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος, εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους (εκφραζόμενη με τον συντελεστή  $c_r$ ) την τοπογραφία (εκφραζόμενη με τον συντελεστή  $c_o$ , που λαμβάνεται ίσος με 1) και τη βασική ταχύτητα  $V_b$ . Θεωρώντας βασική ταχύτητα ανέμου  $V_b=30\text{m/sec}$ , κατηγορία εδάφους III με  $z_0=0,3\text{m}$ ,  $z_{0,II}=0,05\text{m}$  και  $z_{\min}=5\text{m}$ , στο ύψος της οροφής  $z=25\text{m}$ , η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με:

$$V_m(z)=c_r(z) c_o(z) V_b \Rightarrow V_m(25\text{m})=28,58\text{m/sec} \quad (1)$$

όπου

$$c_r(z)=k_r \ln(z/z_0) \Rightarrow c_r(25\text{m})=0,953 \quad (2)$$

$$k_r=0,19(z_0/z_{0,II})^{0,07}=0,215 \quad (3)$$

### 6.2 Στατικό φορτίο ανέμου

Η πίεση ταχύτητας αιχμής  $q_p(z)$  σε ύψος  $z$ , περιλαμβάνει τη μέση τιμή ανέμου και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις της ταχύτητας. Σε ύψος  $z=25\text{m}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$q_p(z)=[1+7I_v(z)]1/2\rho(V_m(z))^2 \Rightarrow q_p(25\text{m})=1,32\text{kN/m}^2 \quad (4)$$

όπου  $\rho=1,25\text{kg/m}^3$  είναι η πυκνότητα του αέρα, ενώ η ένταση του στροβιλισμού του ανέμου ορίζεται ως:

$$I_v(z)=1/\{\ln(z/z_0) \cdot c_o(z)\}=0,23 \quad (5)$$

Εφαρμόζοντας τη ισοδύναμη στατική μέθοδο που προτείνει ο Ευρωκώδικας 1 [1], η πίεση του ανέμου που δρα στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής είναι:

$$w(z)=q_p(z)c_{pe} \Rightarrow w(25\text{m})=1,32c_{pe} \text{ (kN/m}^2) \quad (6)$$

όπου  $c_{pe}$  είναι οι συντελεστές πίεσης που δίνονται στην §5. Όπως προτείνεται από τον Ευρωκώδικα 1 [1], ο συντελεστής μεγέθους  $c_s$  λαμβάνεται υπέρ της ασφαλείας ίσος με 1. Στην περίπτωση του δικτύου καλωδίων με ακλόνητες στηρίξεις, ο δυναμικός συντελεστής  $c_d$  προκύπτει ίσος με 1,054, θεωρώντας ως βασική μορφή ταλάντωσης την πρώτη ιδιομορφή με συχνότητα 1,059Hz. Λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια επιρροής του κάθε κόμβου, το φορτίο του ανέμου που εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο του δικτύου είναι:

$$F=c_s c_d w(z)A_{\text{ref}}=20,58c_{pe} \text{ (kN)} \quad (7)$$

Ομοίως, για την περίπτωση του δικτύου καλωδίων με τον περιμετρικό δακτύλιο, ως κύρια ιδιομορφή θεωρείται η πρώτη ιδιομορφή του συστήματος με ιδιοσυχνότητα 0,882Hz

σύμφωνα με την οποία, ο δυναμικός συντελεστής προκύπτει ίσος με 1,083 και το επικόμβιο φορτίο του ανέμου:

$$F = c_s c_d w(z) A_{ref} = 21,15 c_{pe} \text{ (kN)} \quad (8)$$

Η διεύθυνση του φορτίου ανέμου θεωρείται ως κατακόρυφη.

### 6.3 Διάγραμμα ταχύτητας ανέμου

Προκειμένου να γίνει μη γραμμική δυναμική ανάλυση, δημιουργείται ένα τεχνητό διάγραμμα ταχύτητας ανέμου σύμφωνα με τη μεθοδο που προτείνεται στη βιβλιογραφία [3] για στάσιμες στοχαστικές διαδικασίες μίας διάστασης και μίας μεταβλητής. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, μόνο η χρονική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου προσομοιώνεται στοχαστικά, ενώ η χωρική κατανομή στην επιφάνεια του φορέα γίνεται σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1. Συνεπώς, η ταχύτητα ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο ορίζεται ως μία απειροσειρά από συναρτήσεις συνημιτόνων με τυχαίες τιμές γωνίας φάσης  $\varphi$  ομοιόμορφα κατανομημένες μεταξύ 0 και  $2\pi$ , λαμβάνοντας υπόψη ένα φάσμα ισχύος ταχύτητας  $S_v$ . Η ταχύτητα του ανέμου δίνεται για ένα πεπερασμένο αριθμό όρων  $N$  της απειροσειράς:

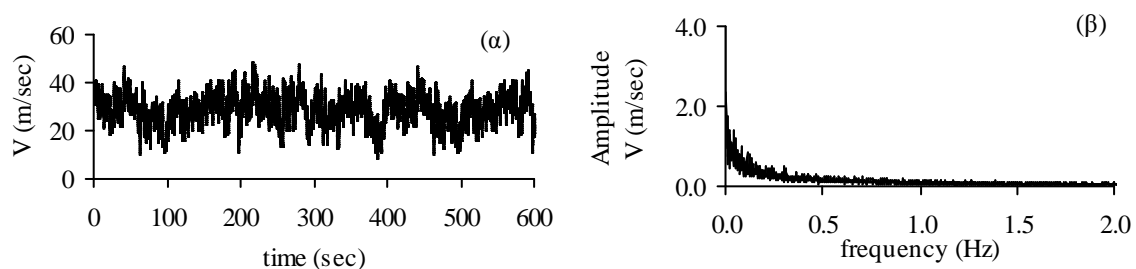
$$v(z, t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N \sqrt{S_v(z, n_i) \Delta n_i} \cos(2\pi n_i t + \varphi_i) \quad (9)$$

όπου  $S_v(z, n_i)$  είναι το μονόπλευρο φάσμα διασποράς όπως δίνεται από τον Ευρωκώδικα 1 [1] στο ύψος  $z$  για συχνότητα  $n_i$  και

$$n_i = n_0 + i \Delta n \quad (10)$$

$$\Delta n = \frac{n_{max}}{N} \quad (11)$$

όπου  $n_{max}$  είναι η συχνότητα αποκοπής στο φάσμα, πέραν της οποίας οι τιμές του θεωρούνται αμελητέες. Η χρονοϊστορία ταχυτήτων που χρησιμοποιείται στις δυναμικές αναλύσεις, δίνεται στο Σχ. 4 και αποτελεί μια εργοδική δειγματοσυνάρτηση της στοχαστικής διαδικασίας, διατηρώντας όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής, όπως τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση που υπολογίζονται από τις σχέσεις του Ευρωκώδικα 1. Στο διάγραμμα Fourier της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται ότι οι κύριες συχνότητες του ανέμου είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες του δικτύου καλωδίων.



Σχ. 4: Τεχνητό διάγραμμα ταχύτητας ανέμου: (α) χρονοϊστορία (β) διάγραμμα Fourier

### 6.4 Δυναμικό φορτίο ανέμου

Η πίεση ταχύτητας αιχμής  $q_p(z)$  σε ύψος  $z=25m$  υπολογίζεται ως εξής:

$$q_p(z, t) = 1/2 \rho (V(t))^2 \Rightarrow q_p(25m) = 0,000625 V(t)^2 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (12)$$

Η πίεση του ανέμου που δρα στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής είναι:

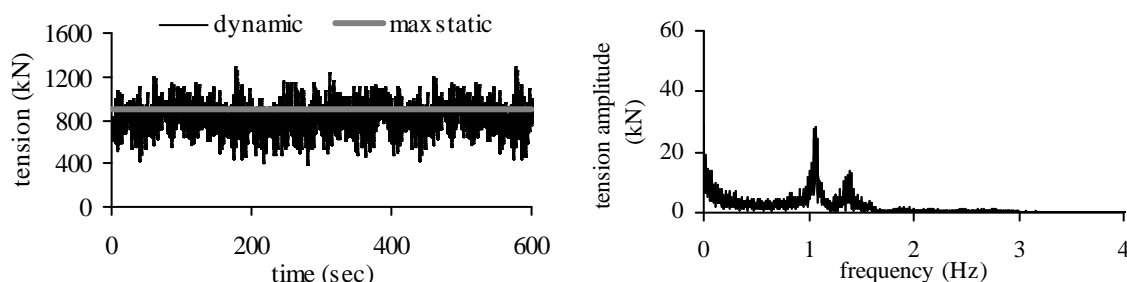
$$w(z, t) = q_p(z, t) c_{pe} \Rightarrow w(25m) = 0,000625 V(t)^2 c_{pe} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (13)$$

Το φορτίο του ανέμου που εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο του δικτύου είναι:

$$F = w(z) A_{ref} = 0.00924 V(t)^2 c_{pe} \text{ (kN)} \quad (14)$$

## 7. ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

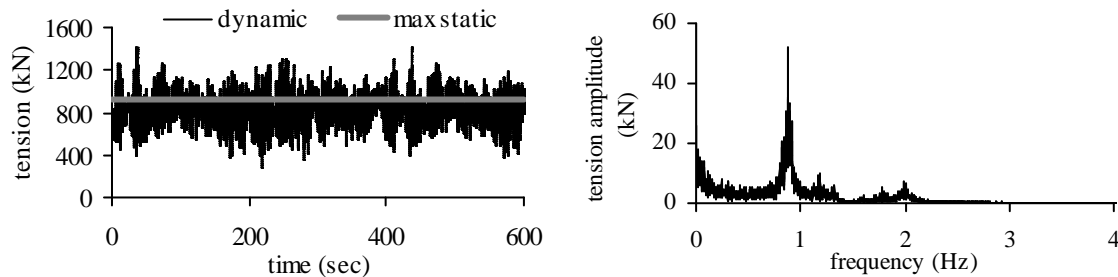
Πραγματοποιώντας μη γραμμική στατική ανάλυση για το φορτίο του ανέμου που υπολογίστηκε στην §6.2, προκύπτει για το πρώτο δίκτυο καλωδίων μία μέγιστη θετική κατακόρυφη μετατόπιση (προς τα πάνω) ίση με 0,306m, ενώ η ελάχιστη και η μέγιστη τάση καλωδίων είναι 329kN και 909kN, αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας το δυναμικό φορτίο που υπολογίστηκε στην §6.4 και εκτελώντας μη γραμμική δυναμική ανάλυση με εν χρόνω ολοκλήρωση όπου λαμβάνεται υπόψη το ενδεχόμενο χαλάρωσης καλωδίων, η μέγιστη αρνητική μετατόπιση (προς τα κάτω) είναι -0,898m, ενώ η μέγιστη θετική (προς τα πάνω) είναι 0,674m. Η μέγιστη θετική παραμόρφωση είναι 220% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στατική, ενώ η μέγιστη αρνητική δεν προβλέπεται από την ισοδύναμη στατική ανάλυση. Η ελάχιστη και μέγιστη ένταση είναι 43kN και 1296kN, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι αισθητά δυσμενέστερες από τις αντίστοιχες στατικές. Ενδεικτικά στο Σχ. 5 δίνονται το διάγραμμα της χρονοϊστορίας της μέγιστης έντασης και το αντίστοιχο φάσμα. Στο φάσμα αυτό διακρίνονται δύο κύριες αιχμές της απόκρισης για συχνότητες κοντά στο 1,04Hz και 1,38Hz που αντιστοιχούν στην πρώτη και την όγδοη ιδιομορφή, που είναι και οι δύο συμμετρικές ιδιομορφές. Παρ' όλο που τα μεγάλα εύρη της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζουν συχνότητες πολύ μικρότερες από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος, ενώ για συχνότητες κοντά στις συχνότητες του δικτύου καλωδίων τα εύρη της ταχύτητας είναι πάρα πολύ μικρά, οι συμμετρικές ιδιομορφές του συστήματος ενεργοποιούνται. Αυτό οφείλεται εν μέρει στους υπεραρμονικούς συντονισμούς που προκαλούνται εξαιτίας των μικρών συχνοτήτων του ανέμου και εν μέρει στους κύριους συντονισμούς που προκαλούνται από τα μικρά εύρη της ταχύτητας του ανέμου με συχνότητες κοντά στις ιδιοσυχνότητες του συστήματος, ικανά να προκαλέσουν ταλαντώσεις μεγάλου εύρους.



Σχ. 5: Διαγράμματα μέγιστης έντασης καλωδίων (δίκτυο με ακλόνητες στηρίξεις καλωδίων)

Στην περίπτωση που προσομοιώνεται ο περιμετρικός δακτύλιος η μέγιστη στατική θετική κατακόρυφη μετατόπιση (προς τα πάνω) είναι 0,496m, ενώ η ελάχιστη και μέγιστη στατική ένταση καλωδίων είναι 345kN και 921kN, αντίστοιχα. Κατά τη δυναμική απόκριση η μέγιστη κατακόρυφη αρνητική (προς τα κάτω) μετατόπιση του κεντρικού κόμβου είναι -1,606m και η μέγιστη θετική (προς τα πάνω) μετατόπιση είναι 0,984m, που είναι και οι δύο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν για το δίκτυο με τις ακλόνητες στηρίξεις καλωδίων. Η μέγιστη προς τα πάνω μετατόπιση είναι σχεδόν διπλάσια από την αντίστοιχη μετατόπιση που προέκυψε από τη στατική ανάλυση. Η ελάχιστη και μέγιστη ένταση καλωδίων είναι 104kN και 1420kN, αντίστοιχα. Τα δυναμικά αυτά μεγέθη είναι και πάλι σημαντικά δυσμενέστερα από τα αντίστοιχα στατικά, αλλά και από τα αντίστοιχα δυναμικά του πρώτου δικτύου καλωδίων, επιβεβαιώνοντας ότι η προσομοίωση του περιμετρικού δακτυλίου είναι πολύ σημαντική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ενδεικτικά στο Σχ. 6 δίνονται τα διαγράμματα της μέγιστης έντασης καλωδίων. Στο φάσμα της απόκρισης διακρίνεται ότι η κύρια συχνότητα ταλάντωσης είναι περίπου 0,80Hz που αντιστοιχεί στην πρώτη

ιδιομορφή του συστήματος που είναι μορφή ταλάντωσης του δακτυλίου. Τα μεγαλύτερα μεγέθη της απόκρισης οφείλονται στην ύπαρξη της ιδιομορφής αυτής που έχει συχνότητα πιο κοντά στις συχνότητες του ανέμου. Και πάλι οι αιχμές της απόκρισης δηλώνουν τη συμμετοχή κι άλλων συμμετρικών ιδιομορφών, με συχνότητες πολύ μεγαλύτερες από αυτές του ανέμου, η ενεργοποίηση των οποίων οφείλεται σε υπεραρμονικούς και κύριους συντονισμούς.



Σχ. 6: Διαγράμματα μέγιστης έντασης καλωδίων (δίκτυο καλωδίων με περιμετρικό δακτύλιο)

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μη γραμμική δυναμική απόκριση δικτύων καλωδίων σχήματος υπερβολικού παραβολοειδούς μελετάται σε αυτήν την εργασία. Τα καλώδια θεωρούνται ότι αγκυρώνονται είτε σε ακλόνητες στηρίξεις είτε σε έναν παραμορφώσιμο δακτύλιο. Τα δίκτυα καλωδίων υπόκεινται σε ένα δυναμικό φορτίο ανέμου, παραγόμενο από μία τεχνητή χρονοϊστορία ταχύτητας ανέμου, λαμβάνοντας υπόψη το φάσμα που δίνεται στον Ευρωκώδικα 1. Παράλληλα εφαρμόζεται και η ισοδύναμη στατική μέθοδος που βασίζεται στις διατάξεις του ίδιου κανονισμού, προκειμένου να συγκριθεί η δυναμική απόκριση του συστήματος με την ισοδύναμη στατική. Παρ' όλο που οι συχνότητες του ανέμου είναι πολύ μικρότερες από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος, παρατηρούνται κάποιες μέγιστες τιμές απόκρισης για συχνότητες ταλάντωσης ίσες με τις ιδιοσυχνότητες. Θεμελιώδεις και υπεραρμονικοί συντονισμοί προκαλούν μεγάλα εύρη ταλάντωσης, παρά την παρουσία της απόσβεσης. Σε κάθε περίπτωση η δυναμική ανάλυση δίνει δυσμενέστερα αποτελέσματα από την στατική ανάλυση, μολονότι το ισοδύναμο στατικό φορτίο λαμβάνει υπόψη ενισχυμένη ταχύτητα ανέμου λόγω των στροβιλισμών και αυξάνεται λόγω ενός δυναμικού συντελεστή. Παράλληλα, ο περιμετρικός δακτύλιος επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική απόκριση του δικτύου καθιστώντας απαραίτητη την προσομοίωσή του. Τα δίκτυα καλωδίων, αν και υπό στατική φόρτιση μπορούν να θεωρηθούν ως ασθενώς μη γραμμικά συστήματα, εμφανίζουν έντονα μη γραμμική συμπεριφορά υπό δυναμικά φορτία, οδηγώντας σε μεγάλες ταλαντώσεις και εντάσεις καλωδίων που δεν μπορούν να προβλεφτούν από ισοδύναμες στατικές αναλύσεις.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EUROCODE 1, PART 1.4 “General actions – Wind actions”, 2003.
- [2] RIZZO F., D’ ASDIA P., LAZZARI M. and PROCINO L. “Wind action evaluation on tension roofs of hyperbolic paraboloid shape”, *Engineering Structures*, Vol. 23, 2011, pp. 445-461.
- [3] SHINOZUKA M. and JAN C.M. “Digital simulation of random processes and its applications”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 25, No. 1, 1972, pp. 111-128.



## RESPONSE OF CABLE NETS UNDER WIND LOADS

### **Isabella Vassilopoulou**

Civil Engineer, PhD Candidate NTUA  
National Technical University of Athens  
Athens, Greece  
e-mail: [isabella@central.ntua.gr](mailto:isabella@central.ntua.gr)

### **Charis J. Gantes**

Associate Professor NTUA  
National Technical University of Athens  
Athens, Greece  
e-mail: [chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

### **Ilias Gkimousis**

Civil Engineer, Graduate student NTUA  
National Technical University of Athens  
Athens, Greece  
e-mail: [iliasgkim@hotmail.com](mailto:iliasgkim@hotmail.com)

## SUMMARY

In the present work the nonlinear dynamic behavior of saddle form cable nets subjected to wind load is investigated. The cable anchorages are considered either fixed or flexible, taking into account the deformability of the boundary ring. The spatial distribution of the wind is estimated according to the recommendations of Eurocode 1. In order to include the time variation of the wind load, an artificial wind velocity diagram is assumed. The results of the nonlinear dynamic analyses, namely the maximum net deflections as well as the minimum and maximum cable tensions, are compared with the corresponding ones obtained by nonlinear static analyses proposed by Eurocode 1. Although the main frequencies of the wind load are smaller than the eigenfrequencies of the systems, they cause large response amplitudes, due to superharmonic resonances. In addition, small amplitudes of the wind load, with frequencies close to the eigenfrequencies, cause large vibration amplitudes due to the occurrence of fundamental resonances, despite the existence of damping. In conclusion, quasi static methods cannot predict such nonlinear dynamic phenomena in a reliable manner, leading to unsafe results. Moreover, the presence of the ring is proven to influence significantly the net's response, rendering its modelling indispensable.