



Ισαβέλλα Βασιλοπούλου

Isabella Vassilopoulou

Μη γραμμική δυναμική απόκριση και σχεδιασμός δικτύων καλωδίων Nonlinear dynamic response and design of cable nets

Διδακτορική διατριβή, 2011

Επιβλέπων : Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής

Doctoral Thesis, 2011

Supervisor: Charis J. Gantes, Associate Professor

Περίληψη

Τα δίκτυα καλωδίων χαρακτηρίζονται για την ικανότητά τους να μεταφέρουν τα φορτία αναπτύσσοντας μόνο εφελκυσμό στα μέλη τους με αποτέλεσμα να αξιοποιούν το υλικό κατά τον βέλτιστο τρόπο και έτσι να καλύπτουν μεγάλα ανοίγματα χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις και με μικρό ίδιο βάρος. Επειδή είναι εύκαμπτες κατασκευές αναπτύσσουν μεγάλες παραμορφώσεις και επομένως πρέπει να αντιμετωπίζονται ως γεωμετρικά μη γραμμικά συστήματα. Σκοπός της διατριβής είναι η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς δικτύων καλωδίων υπό αρμονικά φορτία και δράσεις ανέμου και η διατύπωση οδηγίων σχεδιασμού. Έμφαση δίνεται στην ερμηνεία μη γραμμικών δυναμικών φαινομένων, όπως εναλλαγή ιδιομορφών, καμπύλωση των διαγραμμάτων απόκρισης σε θεμελιώδεις συντονισμούς, εκδήλωση υποαρμονικών και υπεραρμονικών συντονισμών ή εξάρτηση της μόνιμης απόκρισης από τις αρχικές συνθήκες, προκειμένου οι δυσμενείς συνέπειες αυτών των φαινομένων να μπορούν να εντοπιστούν και να αποφευχθούν. Στη διατριβή μελετώνται τα εξής ζητήματα:

- Διερεύνηση εξίσωσης κίνησης μονοβάθμιου συστήματος δικτύου καλωδίων - εμφάνιση μη γραμμικών φαινομένων.
- Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων πολυβάθμιων δικτύων καλωδίων με χρήση προτεινόμενων ημι-εμπειρικών σχέσεων, με στόχο την αποφυγή συντονισμών.
- Εκτίμηση δυναμικής απόκρισης πολυβάθμιων δικτύων καλωδίων με χρήση αναλυτικών λύσεων ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, με στόχο τον εντοπισμό των συνθηκών εκδήλωσης μη γραμμικών φαινομένων.
- Διερεύνηση επιρροής της χωρικής κατανομής αρμονικών φορτίων στην απόκριση των δικτύων καλωδίων.
- Επιρροή των συνθηκών στήριξης των δικτύων καλωδίων στη δυναμική τους συμπεριφορά.
- Σύγκριση της ακρίβειας ισοδύναμων στατικών μεθόδων με μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις για φορτία ανέμου.

Abstract

Cable nets are characterised by their ability to carry loads developing only tension in their elements, thus exploiting material in an optimum way and having the capacity to cover long spans without intermediate supports and with small self weight. Due to their flexibility they exhibit large deformations, therefore they must be treated as geometrically nonlinear systems. Aim of the dissertation is to investigate the dynamic behaviour of cable nets subjected to harmonic loads and wind actions, and to provide design guidelines in order to improve the response and protect the structure from undesirable effects. Emphasis is put on the interpretation of nonlinear dynamic phenomena, such as modal transition, bending of the response curve under fundamental resonance, appearance of subharmonic or superharmonic resonances or dependence of the steady-state response on the initial conditions, so that the adverse effects of such phenomena can be detected and avoided. The following issues are studied:

- Investigation of the equation of motion of a single-degree-of-freedom (SDOF) system of cable net - occurrence of nonlinear phenomena.
- Estimation of the eigenfrequencies of multi-degree-of-freedom (MDOF) cable nets proposing semi-empirical formulae, in order to avoid resonances.
- Assessment of the dynamic response of MDOF cable nets using analytical solutions of an equivalent SDOF system, aiming at detection of the conditions under which nonlinear phenomena take place.
- Investigation of the influence of spatial load distribution on the response of a cable net subjected to harmonic loads.
- Influence of the boundary conditions on the cable nets' dynamic behaviour.
- Comparison between quasi-static methods and nonlinear dynamic analyses regarding wind actions.

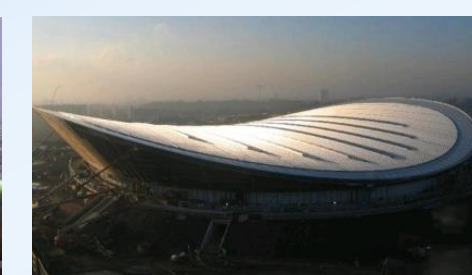
1



Dorton Arena, Βόρεια Καρολίνα, ΗΠΑ
Dorton Arena, North Carolina, USA
(1953)



Stadio Eirínēs kai Φιλίας, Φάληρο, Ελλάδα
Peace and Friendship Stadium, Faliró, Greece
(1983)

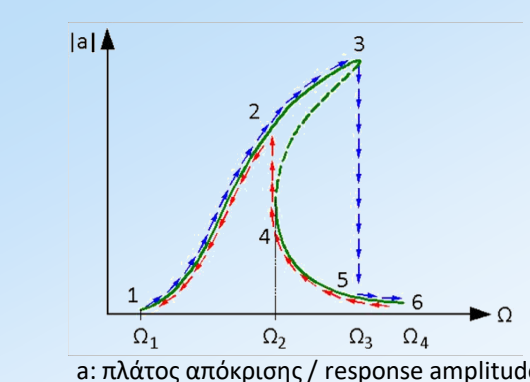


Ποδηλατοδρόμιο, Λονδίνο, Αγγλία
Velodrome, London, England
(2011)

Δίκτυα καλωδίων. Το πρώτο δίκτυο καλωδίων ήταν το Dorton Arena. Στην Ελλάδα, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Στάδιο Ειρήνης και Φιλίας. Το Ποδηλατοδρόμιο του Λονδίνου είναι το πιο πρόσφατο παράδειγμα τέτοιων κατασκευών.

Cable nets. The first cable net was the Dorton Arena. In Greece, the most representative example is the Peace and Friendship Stadium. The Velodrome in London, is the most recent structure of this kind.

2



Αύξηση συχνότητας φορτίου / Increase of loading frequency

$\Omega_1 \rightarrow \Omega_4$ α: 1-2-3-5-6

3-5: Απότομη μείωση απόκρισης / Sudden decrease of response

Μείωση συχνότητας φορτίου / Decrease of loading frequency

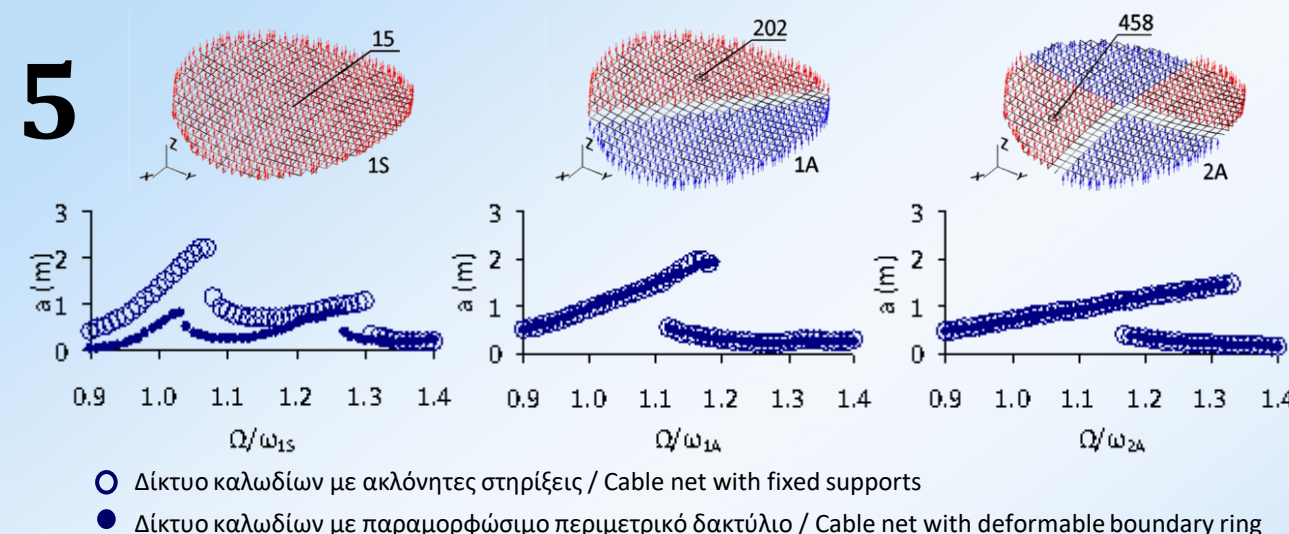
$\Omega_4 \rightarrow \Omega_1$ α: 6-5-4-2-1

4-2: Απότομη αύξηση απόκρισης / Sudden increase of response

Η μέγιστη απόκριση υπό θεμελιώδη συντονισμό παρατηρείται για συχνότητες φορτίου μεγαλύτερες από τη συχνότητα της κατασκευής. The maximum response under fundamental resonance is observed for loading frequencies larger than the system's frequency.

Καμπύλωση διαγράμματος απόκρισης. Για συχνότητες φορτίου μεταξύ Ω_2 και Ω_3 τρεις κλάδοι παριστάνουν τη μόνιμη απόκριση: 2-3 (ευσταθής), 3-4 (ασταθής) και 4-5 (ευσταθής). Οι αρχικές συνθήκες καθορίζουν ποιος από τους δύο ευσταθείς κλάδους πραγματοποιείται.

Bending of the response curve. For loading frequencies between Ω_2 and Ω_3 three different curves represent the system's response: 2-3 (stable), 3-4 (unstable) and 4-5 (stable). The initial conditions determine which of these two stable responses is realised.



Χωρική κατανομή αρμονικού φορτίου και χαρακτηριστικοί κόμβοι. Σε αντισυμμετρικές φορτίσεις οι αρχικές συνθήκες επηρεάζουν τη μόνιμη απόκριση για μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων του φορτίου σε σχέση με την ομοιόμορφη φόρτιση. Η παρουσία του περιμετρικού δακτυλίου μεταβάλλει την απόκριση του δικτύου καλωδίων μόνο σε ομοιόμορφη φόρτιση.

Spatial distribution of harmonic load and characteristic nodes. For antisymmetric loading, the initial conditions influence the steady-state response for a larger range of the loading frequency, with respect to the uniform loading. The presence of the boundary ring alters the net's response only to uniform loading.

Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις Key publications

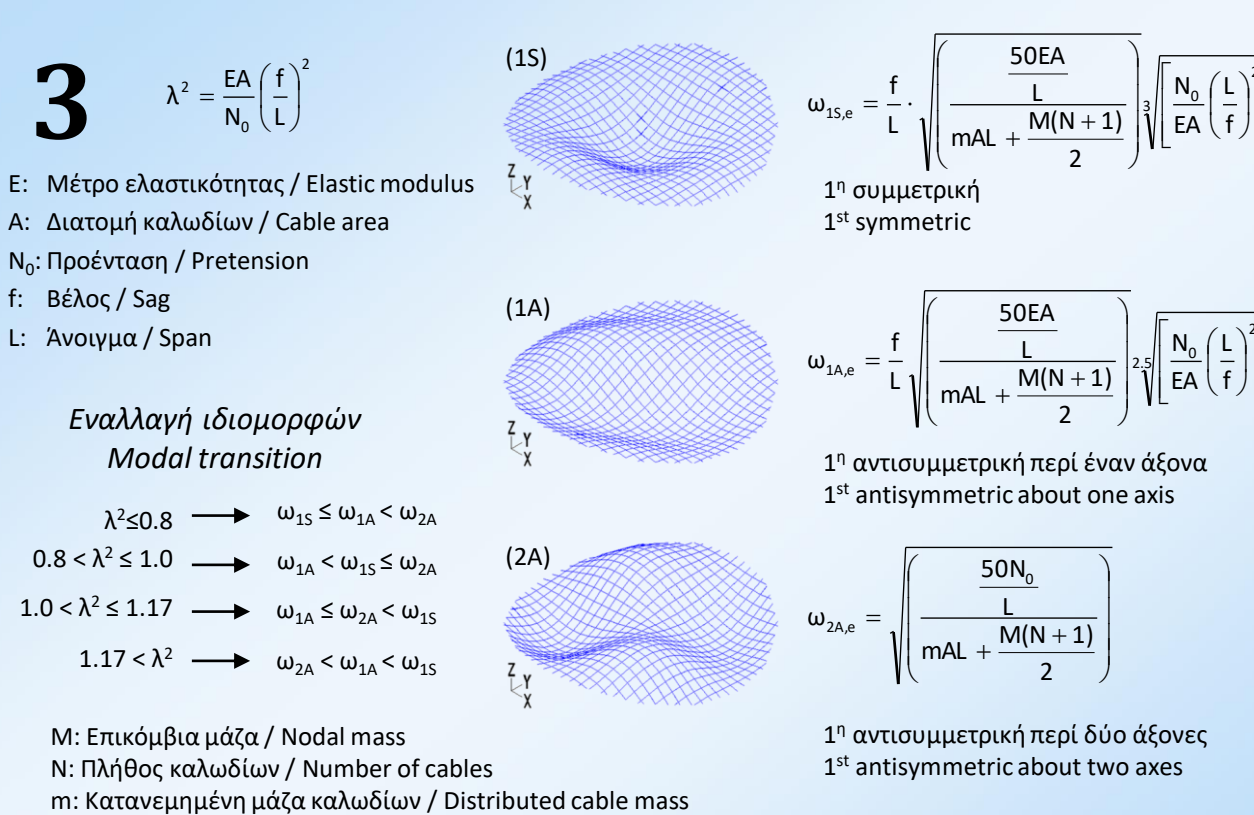
Vassilopoulou, I. and Gantes, C. J., "Cable nets with elastically deformable edge ring", *International Journal of Space Structures*, Vol. 20, Number 1, pp. 15-34, March 2005.

Vassilopoulou, I. and Gantes, C. J., "Vibration modes and natural frequencies of saddle form cable nets", *Computers and Structures*, Vol. 88, Issues 1-2, pp. 105-119, January 2010.

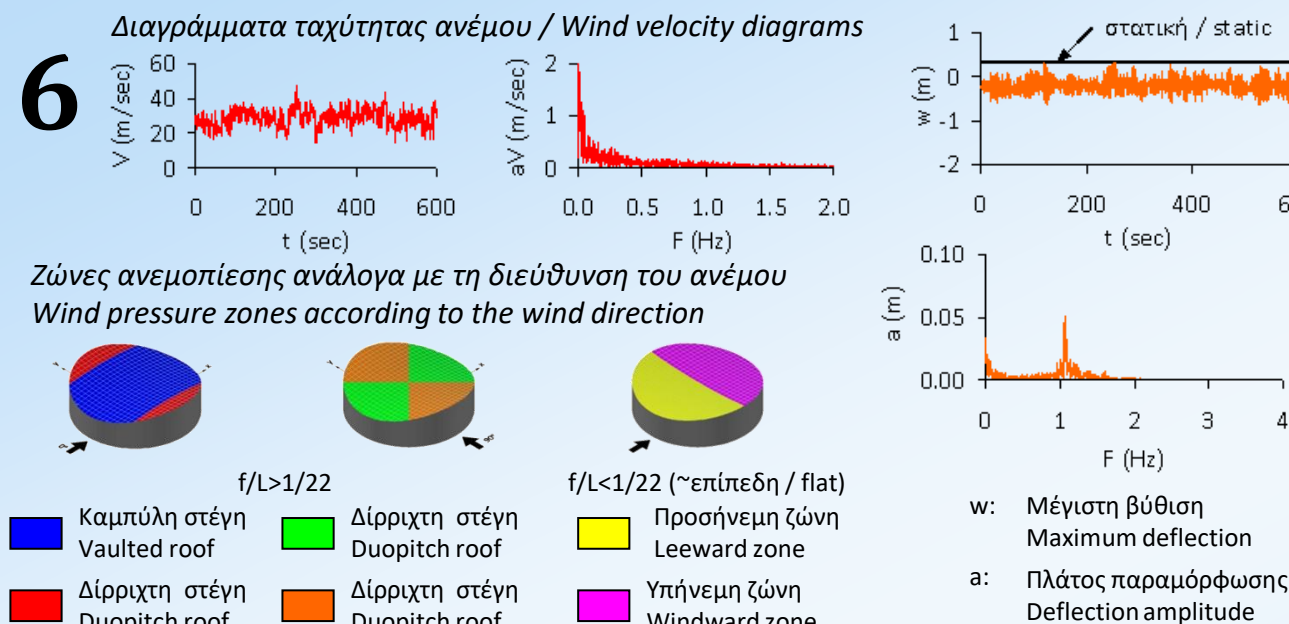
Vassilopoulou, I. and Gantes, C. J., "Nonlinear dynamic behavior of saddle form cable nets under uniform harmonic load", *Engineering Structures*, Vol. 33, Issue 10, pp. 2762-2771, October 2011.

Vassilopoulou, I. and Gantes, C. J., "Nonlinear dynamic phenomena in a SDOF model of cable net", *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 82, Issue 10-11, pp. 1689-1703, October 2012.

Vassilopoulou, I. and Gantes, C. J., "Nonlinear dynamic response of MDOF cable nets estimated by equivalent SDOF models" in *Computational Methods in Earthquake Engineering, Computational Methods in Applied Sciences*, Vol. 30, pp. 345-379, M. Papadrakakis M. Fragiadakis, V. Plevris (Eds.), Springer Verlag, 2013.



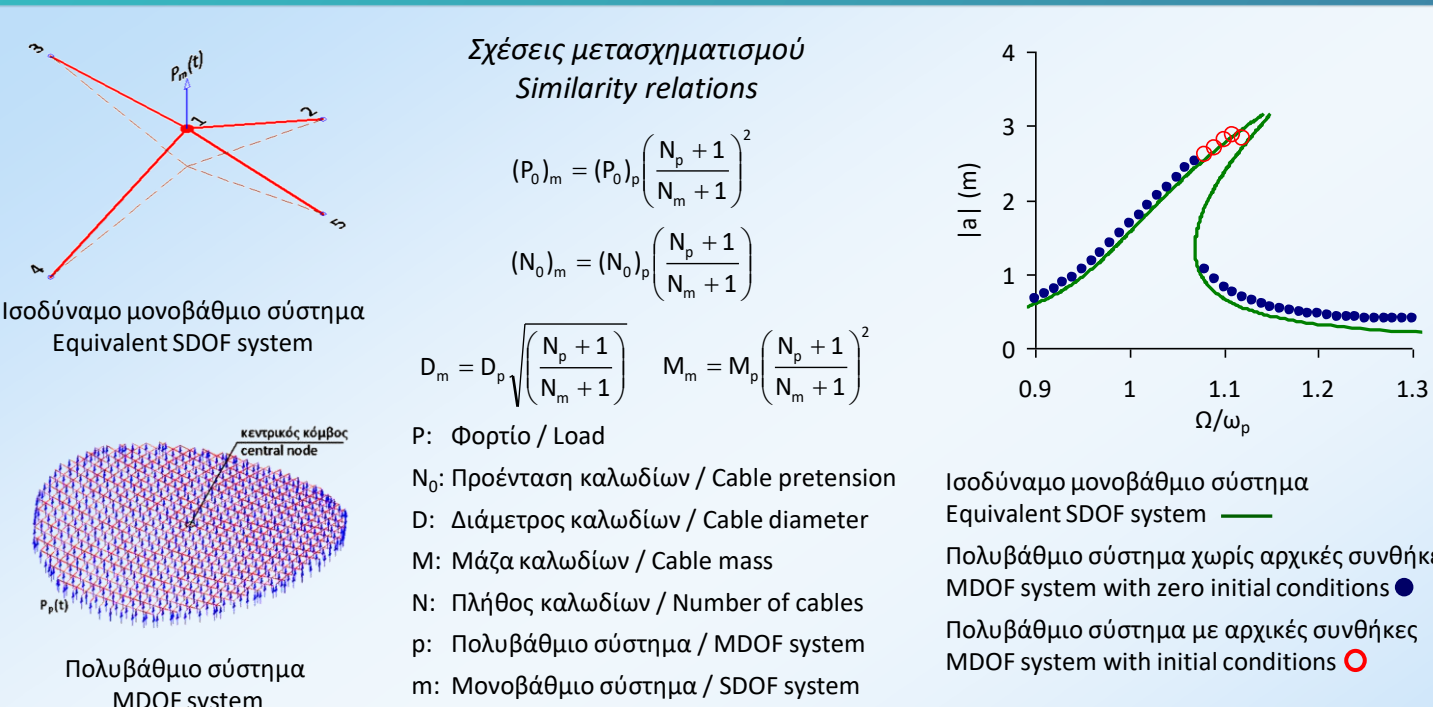
Εναλλαγή ιδιομορφών και ημι-εμπειρικοί τύποι ιδιοσυχνοτήτων. Modal transition and semi-empirical formulae of eigenfrequencies.



Απόκριση σε άνεμο. Παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ στατικής και δυναμικής απόκρισης. Καθώς αυξάνεται η παράμετρος λ^2 , το πλάτος της ταλάντωσης μειώνεται. Λόγω των μικρών συχνοτήτων του ανέμου σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες του δικτύου, εκδηλώνονται υπεραρμονικοί συντονισμοί. Οι ισοδύναμες στατικές μέθοδοι δεν μπορούν να προβλέψουν μη γραμμικά δυναμικά φαινόμενα και δεν μπορούν να θεωρηθούν ως ακριβείς για την ανάλυση και το σχεδιασμό δικτύων καλωδίων.

Response to wind. Large differences between static and dynamic response are observed. As the parameter λ^2 increases, the oscillation amplitude becomes smaller. Due to the small wind frequencies with respect to the eigenfrequencies of the cable net, superharmonic resonances occur. The quasi-static methods cannot predict nonlinear dynamic phenomena, thus they cannot be considered as accurate for the analysis and design of cable nets.

4



Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα. Η απόκριση του κεντρικού κόμβου πολυβάθμιου δικτύου καλωδίων υπό ομοιόμορφη αρμονική φόρτιση εκτιμάται με ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές λύσεις ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και σχέσεις μετασχηματισμού.

Equivalent SDOF system. The response of the central node of a MDOF cable net subjected to uniform harmonic load is estimated with satisfactory accuracy using the analytical solutions of an equivalent SDOF system, and similarity relations.

