

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ**  
**CHRISTOS PAPAKITZOS**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – DIPLOMA THESIS

# **ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ**

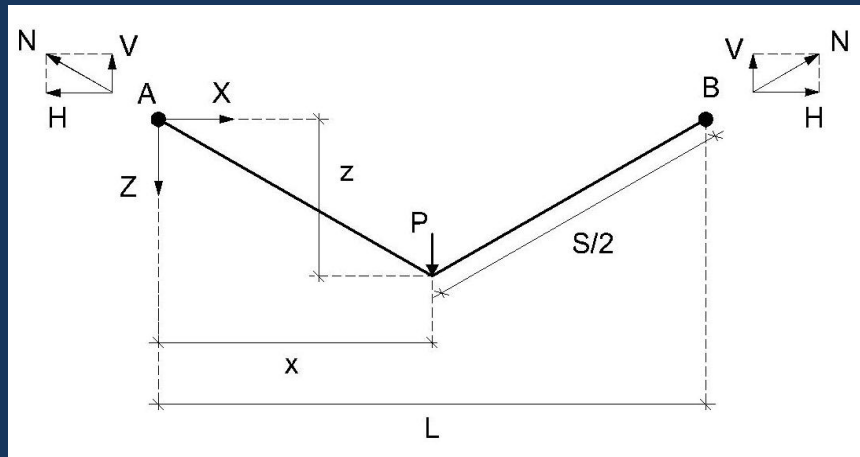
# **ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΚΑΙ**

# **ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ**

## **NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF CABLES**

## **AND CABLE NETS**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. ΓΑΝΤΕΣ  
SUPERVISOR: C. GANTES



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013  
Athens, February 2013  
ΕΜΚ ΔΕ 2013/46



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2013/46

## Μη γραμμική στατική ανάλυση καλωδίων και δικτύων καλωδίων

Χ. Γ. Παπακίτσος (Επιβλέπων: Χ. Γαντές)

### Περίληψη

Οι καλωδιωτές κατασκευές χαίρουν της εκτίμησης των μηχανικών και των αρχιτεκτόνων, καθώς προσφέρουν υψηλή αισθητική και πλεονεκτήματα σε προβλήματα μεγάλων ανοιγμάτων, όπως οροφές σταδίων. Οι σχεδιαστές πρέπει να προσεγγίσουν αυτού του είδους τις κατασκευές με ένα μη συμβατικό τρόπο, λόγω της γεωμετρικής μη γραμμικότητας των καλωδίων. Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει αυτού του είδους τη μη γραμμικότητα έχοντας ως αφετηρία το βασικό στοιχείο των καλωδιωτών κατασκευών, που είναι ένα ανηρητημένο μεμονωμένο καλώδιο, και επεκτείνοντας την ανάλυση σε 1-DOF και πιο σύνθετα δίκτυα καλωδίων.

Το πρώτο βήμα της μελέτης είναι ο προσδιορισμός της πηγής της γεωμετρικής μη γραμμικότητας συγκρίνοντας την απόκριση ενός καλωδίου και μίας δοκού σε εξωτερικά φορτία. Έπειτα, εξετάζεται ένα μεμονωμένο καλώδιο, ανηρητημένο από τα δύο του άκρα. Προσδιορίζονται οι αναλυτικές εξισώσεις για διάφορα φορτία (συγκεντρωμένο φορτίο, καταναμημένο φορτίο κατά μήκος της οριζόντιας προβολής και κατά μήκος τόξου καλωδίου, μετατόπιση άκρου), για διάφορες θέσεις εφαρμογής του συγκεντρωμένου φορτίου (στο μέσο, σε τυχαία θέση) και για διάφορες κλίσεις καλωδίου (οριζόντιο, κεκλιμένο). Στην περίπτωση μετατόπισης άκρου καλωδίου, η απόκριση προσομοιάστηκε με αυτή ενός ελατηρίου και προέκυψε μία ισοδύναμη σταθερά ελατηρίου.

Οι αναλυτικές εξισώσεις για το ανηρητημένο μεμονωμένο καλώδιο επεκτείνονται σε ένα δίκτυο καλωδίων ενός βαθμού ελευθερίας (1-DOF). Προσδιορίζονται οι εξισώσεις για την εύρεση σχήματος και τη στατική ανάλυση, ενώ αναπτύσσεται λογισμικό μη γραμμικής στατικής ανάλυσης 1-DOF δικτύου καλωδίου, με τη χρήση του λογισμικού MATLAB. Μια παρατήρηση στη μορφή ενός 1-DOF δικτύου καλωδίων οδηγεί στη μη γραμμική ανάλυση ενός τηλεπικοινωνιακού ιστού με προεντεταμένα υποστηρικτικά καλώδια, μία ευρέως διαδεδομένη κατασκευή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Εν αντιθέσει, τα σύνθετα δίκτυα καλωδίων δεν μπορούν να προσεγγιστούν με την αναλυτική μέθοδο που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες εφαρμογές και, έτσι, αντικαθίσταται από τη μέθοδο πυκνότητας δύναμης. Βάσει αυτής της μεθόδου, προσομοιάστηκε το δίκτυο καλωδίων της οροφής του Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας, το οποίο βρίσκεται στην Αθήνα.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, οι αναλυτικές λύσεις επιβεβαιώθηκαν από αριθμητικά μοντέλα. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων SAP και ADINA. Η σύγκριση έδειξε ταύτιση μεταξύ των αναλυτικών εξισώσεων και των αριθμητικών μοντέλων, εκτός από την περίπτωση κεκλιμένου μεμονωμένου καλωδίου υπό καταναμημένο φορτίο. Η αιτία εντοπίζεται στην αγνόηση της οριζόντιας μετατόπισης, στην αναλυτική λύση, λόγω της πολυπλοκότητας των μη γραμμικών εξισώσεων. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα, η οποία ξεπερνά τα όρια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Παράλληλα με τις αναλυτικές εξισώσεις και τα αριθμητικά μοντέλα, παρουσιάζονται και σχολιάζονται παραμετρικά διαγράμματα. Αυτού του είδους τα διαγράμματα εξηγούν, με ένα σφαιρικό τρόπο, την απόκριση των καλωδιωτών κατασκευών σε εξωτερικά φορτία. Θεωρήθηκαν διάφορες τιμές προέντασης, αρχικής κρέμασης καλωδίου, απαραμόρφωτου μήκους, κλίσης, θέσης εφαρμογής του συγκεντρωμένου φορτίου, μέτρου ελαστικότητας και διαμέτρου.

### Λέξεις κλειδιά

ανηρητημένο μεμονωμένο καλώδιο, 1-DOF δίκτυο καλωδίων, τηλεπικοινωνιακός ιστός, δίκτυο καλωδίων, γεωμετρική μη γραμμικότητα, στατική ανάλυση, αναλυτικές λύσεις, αριθμητικές λύσεις, συγκεντρωμένα φορτία, καταναμημένα φορτία, μετατοπίσεις άκρου, ισοδύναμη σταθερά ελατηρίου, προεντεταμένο καλώδιο, παραμετρικά διαγράμματα



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2013/46

## **Nonlinear static analysis for cables and cable nets**

C. G. Papakitsos (supervised by C. Gantes)

### **Abstract**

Cable structures have gained the regard of engineers and architects, as they offer high aesthetic and benefits in large openings, such as stadium roofs. Designers have to approach this kind of constructions in an unconventional way, due to the geometric nonlinearity of cables. The aim of this diploma thesis is to examine this kind of nonlinearity starting from the basic element of cable structures, which is a simple suspended cable, and expanding the analysis to 1-DOF and more complex cable nets.

The first step of the study is the detection of the source of the geometric nonlinearity by comparing cable and beam response to external loads. Then, a simple suspended cable is considered. Analytical equations are determined for different kind of loads (concentrated load, distributed load along horizontal projection and arc length of the cable, imposed end displacement), for different application points of concentrated load (in the middle, arbitrary) and for different inclinations (horizontal, inclined). In case of imposed end displacement, cable response is simulated with this of a spring and an equivalent spring constant is found.

The analytical equations for a simple suspended cable are extended for a cable net with one degree of freedom (1-DOF). Form finding and static analysis equations are determined, while software for nonlinear static analysis of 1-DOF cable net is developed, based on MATLAB software. An observation in the form of a 1-DOF cable net leads to the nonlinear analysis of a radio mast with pre-tensioned cables, a widely spread construction. The results of the analysis are presented in this diploma thesis. On the other hand, complex cable nets cannot be approached by the analytical method developed in previous applications and, so, it is replaced by the force density method. Based on this method, the cable net of the roof from the Stadium of Peace and Friendship, in Athens, is simulated.

In the context of this diploma thesis, the analytical solutions are verified by numerical models. For this purpose, the finite element software SAP and ADINA are used. The comparison showed identification between analytical equations and numerical models, apart from the case of an inclined simple suspended cable under distributed load. The reason is located at the omission of the horizontal deflection, in the analytical solution, due to the complexity of nonlinear equations. Further investigation, which exceeds the limits of this diploma thesis, is required.

Parallel to analytical equations and numerical models, parametric figures are presented and annotated. This kind of figures illustrates, in a spherical way, the response of cable structures to external loads. Different values of pre-tension, initial cable sag, unstressed length, inclination, application point of concentrated load, modulus of elasticity and diameter are considered.

### **Key words**

simple suspended cable, 1-DOF cable net, radio mast, cable net, geometric nonlinearity, static analysis, analytical solutions, numerical solutions, concentrated loads, distributed loads, imposed end displacements, equivalent spring constant, pre-tensioned cable, parametric figures