



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Δομοστατικής  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΜΟΡΦΩΣΗ, ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

Γεωργιάς Ελευθέριος  
Οικονόμου Μαρία

Επιβλέπων Καθηγητής: Χ. Γαντές

ΑΘΗΝΑ 2007



## Μόρφωση, Ανάλυση και Διαστασιολόγηση Εφελκόμενων Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία του Ελευθέριου Γεωργαλά και της Μαρίας Οικονόμου

Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Νοέμβριος 2007

### Περίληψη

Οι κατασκευές με μεμβράνες και καλώδια προσελκύουν τους μηχανικούς λόγω της αισθητικής και του εύρους των μορφών τους και των στατικών τους πλεονεκτημάτων. Είναι εφελκόμενες κατασκευές, με μικρό βάρος, και βάση για τον σχεδιασμό τους αποτελεί η διερεύνηση και εκμετάλλευση της εφελκυστικής τους συμπεριφοράς.

Τα Κεφάλαια 1 και 2 είναι εισαγωγικά και συμπεριλαμβάνουν τα είδη των εφελκόμενων κατασκευών καθώς και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Περιγράφονται η δομή, τα υλικά και ο τρόπος παρασκευής τόσο των καλωδίων όσο και των μεμβρανών.

Στα επόμενα τέσσερα κεφάλαια παρουσιάζεται η ανάλυση μεμβρανών, που περιλαμβάνει τρία στάδια μελέτης: την εύρεση σχήματος, την στατική ανάλυση, και την παραγωγή των σχεδίων κοπής. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 3 παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εύρεσης σχήματος και της στατικής ανάλυσης σε φάση λειτουργίας. Μία μεμβράνη μπορεί να προσομοιωθεί είτε φυσικά είτε αριθμητικά. Κύριες μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης αποτελούν η μη γραμμική ανάλυση με επαναληπτική διαδικασία, η μέθοδος δυναμικής χαλάρωσης και η μέθοδος πυκνότητας δύναμης. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής των σχεδίων κοπής και δίνονται κάποιες τεχνικές λεπτομέρειες που αφορούν στην υλοποίηση μιας κατασκευής με μεμβράνη.

Τα κεφάλαια 5 και 6 περιέχουν δύο εφαρμογές μελέτης δύο μεμβρανών της ίδιας κάτοψης, που η μία διαμορφώνεται με σχήμα σέλλας (οπότε προσομοιώνεται με κανονικό δίκτυο καλωδίων) και η άλλη με κωλουροκωνικό σχήμα (οπότε προσομοιώνεται με ακτινικό δίκτυο καλωδίων). Οι αναλύσεις γίνονται με χρήση του προγράμματος EASY.

Τα υπόλοιπα κεφάλαια της εργασίας αφορούν στα καλώδια, και ειδικότερα, στο πρόβλημα της κόπωσης των καλωδίων. Το κεφάλαιο 7 αναφέρεται γενικά στο φαινόμενο της κόπωσης και ασχολείται με θέματα όπως οι χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας των καλωδίων, τα είδη της κόπωσης, και οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των καλωδίων σε κόπωση. Στο Κεφάλαιο 8 αναφέρονται οι κανονιστικές διατάξεις κοπώσεως, όπως αυτές παρουσιάζονται στους Ευρωκώδικες 1 και 3. Επίσης γίνεται ιδιαίτερη μνεία στα προσομοιώματα των φορτίσεων λόγω κόπωσης, καθώς και στις προσομοιώσεις των ειδικών οχημάτων για οδικές γέφυρες. Στο Κεφάλαιο 9 γίνεται λόγος για την διάρκεια ζωής των καλωδίων σε κόπωση και για το πώς αυτή υπολογίζεται, καθώς επίσης και για ορισμένες δοκιμές κόπωσης σε συμβατικά χαλύβδινα στοιχεία.

Τέλος, το Κεφάλαιο 10 περιλαμβάνει δύο εφαρμογές ελέγχου σε κόπωση των καλωδίων δύο παρόμοιων μοντέλων καλωδιατής γέφυρας. Παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η ανάλυση της συμπεριφοράς των καλωδίων καθώς διαφορετικού τύπου οχήματα κινούνται επί του καταστρώματος. Τις εφαρμογές συνοδεύουν τα σχετικά συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις. Για την ανάλυση γίνεται χρήση του προγράμματος SAP.



## Form Finding, Analysis and Dimensioning of Tensile Structures

Diploma Thesis by Eleytherios Georgalas and Maria Ikonou

*Supervisor:* Ch. Gantes, Associate Professor NTUA

November 2007

### Abstract

Many designers are attracted to membrane and cable structures because of the wide range of forms that can be created and of their structural advantages. They are light-weight tensile structures and the basis for their design is to explore and exploit their tensile behavior.

Chapters 1 and 2 are introductory and present the different kinds of tensile structures as well as their main characteristics. They describe the structure, the materials, and the production process of both cables and membranes.

The next four chapters present the design of a membrane structure, which includes three stages: form finding, structural analysis and creation of cutting patterns. More specifically, chapter 3 includes the theoretical background of form finding and of the structural analysis under service loads. The modeling of a membrane shape can be achieved by physical or computer simulation. The most common computer modeling techniques are the non-linear stiffness analysis method, the dynamic relaxation method and the force density method. In chapter 4, the process of cutting pattern generation is presented and technical details of membrane construction are given.

Chapters 5 and 6 include analysis examples of two membranes with the same plan-section, the first one being a saddle form (using a regular net) and the second a cone-like form (using a radial net). The analysis is performed with the analysis program 'EASY'.

The next chapters deal with cables and, more specifically, with the issue of cable fatigue. Chapter 7 provides a general description of the cable fatigue phenomenon and deals with issues like typical cable failure cases, types of failure and parameters influencing resistance of cables subjected to fatigue. Chapter 8 presents fatigue-related norms as referred to in EC 1 and 3. Special mention is made of fatigue-related loading models, as well as models of typical vehicles for road bridges. Chapter 9 refers to life span of cables subjected to fatigue and the way to calculate it as well as some fatigue tests for conventional steel elements.

Eventually, Chapter 10 comprises two examples of fatigue testing in two similar models of cable-stayed bridges. A step-by-step analysis of the cable behavior as different types of vehicles move along the bridge deck is presented. The examples are accompanied by the relevant notes and conclusions. The analysis is done using the analysis program SAP.