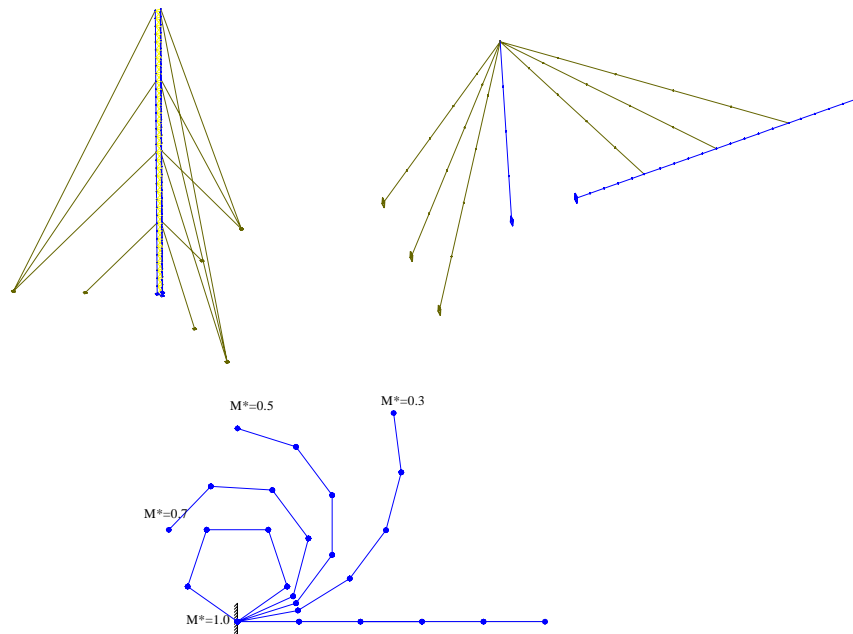




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
ΔΠΜΣ  
“Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών”  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

## ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Α. ΜΑΝΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων: Χ. ΓΑΝΤΕΣ

Επίκουρος Καθηγητής

Ε.Μ.Π.

Αθήνα  
Ιούνιος 2005

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιείται προσπάθεια για την κατανόηση και την εμβάθυνση της γεωμετρικής μη γραμμικής ανάλυσης των κατασκευών, δίνοντας έμφαση κυρίως σε καλωδιωτές κατασκευές, οι οποίες παρουσιάζουν συχνά έντονα μη γραμμικά φαινόμενα. Η εργασία χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο χρησιμοποιώντας τις αρχές της μηχανικής του συνεχούς μέσου και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται το απαραίτητο υπόβαθρο για τη γεωμετρική μη γραμμική ανάλυση φορέων, αποτελούμενων από πεπερασμένα στοιχεία καλωδίου, δικτύωματος και δοκού-υποστυλώματος. Στο δεύτερο μέρος, συντάσσεται κατάλληλο λογισμικό για τέτοιου είδους αναλύσεις, το οποίο δοκιμάζεται σε αρκετά παραδείγματα φορέων.

Η παραπάνω δομή ακολουθείται και στα κεφάλαια της εργασίας αυτής. Συγκεκριμένα στα δύο πρώτα κεφάλαια πραγματοποιείται η εισαγωγή στη μη γραμμική ανάλυση, σε αρκετά γενική μορφή, χρησιμοποιώντας τις απαραίτητες έννοιες της μηχανικής του συνεχούς μέσου, όπως οι κινηματικές περιγραφές, οι τανυστές τάσεων και παραμορφώσεων κ.τ.λ., ενώ εξάγονται οι εξισώσεις ισορροπίας για το τυχαίο σώμα, χρησιμοποιώντας την αρχή δυνατών έργων. Στο τρίτο κεφάλαιο εφαρμόζοντας τα παραπάνω εξάγεται η αναλυτική μορφή του μητρώου δυσκαμψίας για το μη γραμμικό πεπερασμένο στοιχείο καλωδίου-δικτύωματος. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δοκιμάζεται και η διαδικασία ελέγχου χαλάρωσης για το στοιχείο καλωδίου, ενώ και η προένταση λαμβάνεται υπόψη στο μητρώο δυσκαμψίας του. Τέλος για το συγκεκριμένο στοιχείο προτείνονται δύο διαφορετικές εκφράσεις: (i) η μη γραμμικότητα μεγάλων μετατοπίσεων και (ii) η μη γραμμικότητα μεγάλων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων (Green Lagrange).

Στο επόμενο κεφάλαιο μορφώνεται το μη γραμμικό πεπερασμένο στοιχείο δοκού υποστυλώματος, το οποίο παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες εξαιτίας της ύπαρξης στρωφικών βαθμών ελευθερίας που παρουσιάζονται στο προσομοίωμά του. Οι μη γραμμικότητες που λαμβάνονται υπόψη στην περίπτωση αυτή είναι μεγάλων μετατοπίσεων και στρωφών ή εναλλακτικά μόνο μεγάλων μετατοπίσεων, κάνοντας την παραδοχή ότι οι στρωφές του στοιχείου είναι απειροστές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται οι τρόποι κατασκευής και επίλυσης του αλγεβρικού μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων το οποίο περιγράφει την ισορροπία του υπό μελέτη φορέα. Τέλος στο έκτο παρατίθενται οι αριθμητικές εφαρμογές που επιλύθηκαν με το λογισμικό, το οποίο συντάχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Οι εφαρμογές αυτές διακρίνονται σε τρία είδη. Κατά πρώτον εξετάζονται φορείς αποτελούμενοι από στοιχεία καλωδίου μόνο, ελέγχοντας τις μη γραμμικότητες που λαμβάνει υπόψη του το συγκεκριμένο στοιχείο. Έπειτα παρατίθενται παραδείγματα φορέων με στοιχεία δοκού υποστυλώματος και τέλος στην τρίτη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται σύνθετοι φορείς αποτελούμενοι από τον συνδυασμό των στοιχείων δοκού, καλωδίου και δικτυώματος.

## ABSTRACT

This thesis focuses on the comprehension and application of geometrically non linear analysis of structures, giving emphasis mainly in cable structures that often exhibit non linear behaviour. The work is separated in two basic parts. In the first using the principles of continuum mechanics and the finite element method, the essential theoretical background for the geometrically non linear analysis of structures composed of cable, truss and beam finite elements is created. In the second part a suitable finite element software for such type analyses is developed, which is tested in many examples.

The above outline is also followed in the chapters of this work. Particularly, in the first two chapters the introduction in non linear analysis is presented, in general form, using basic principles of continuum mechanics, such as kinematics descriptions, stress and strain tensors e.t.c., while using the principle of virtual work the equilibrium equations for the general case are derived. In the third chapter, using again the above principles, the analytical form of the non linear cable (and truss) element stiffness matrix is obtained. In this work the process of relaxation for the cable element is also tested, while the prestress is taken into account in the stiffness matrix of the element. Finally, for cable and truss elements two different expressions of nonlinearity are proposed: (i) large displacements and (ii) large displacements and large strains (Green Lagrange).

In the next chapter the non linear beam finite element is presented, which presents much difficulty, because of the existence of rotational degrees of freedom in its model. The non linearities that are taken into account are large displacements and large rotations, or alternative only large displacements, when the rotational degrees of freedom are infinitesimal.

In the fifth chapter the formulation and solution procedures of the algebraic non linear system of equations which describes the equilibrium of an arbitrary body are presented. Finally, in sixth chapter a set of numerical applications that were analyzed

with the software, which was developed in this dissertation are presented. These examples are of three types. At first structures consisting only of cable elements are developed, testing the non linearities that these elements present. Then examples of structures with beam elements are developed, and finally, in the third part, complex structures consisting from the combination of beam, cable and truss elements are introduced.