

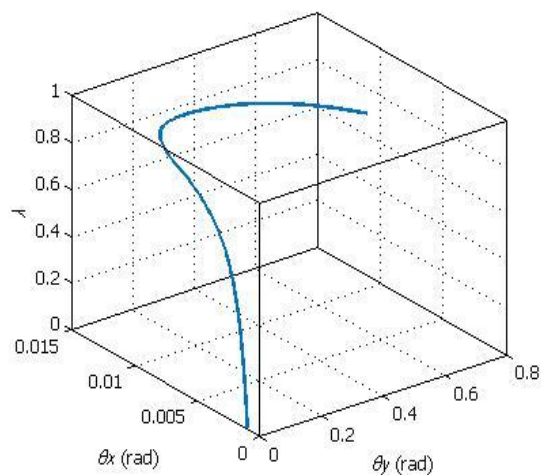
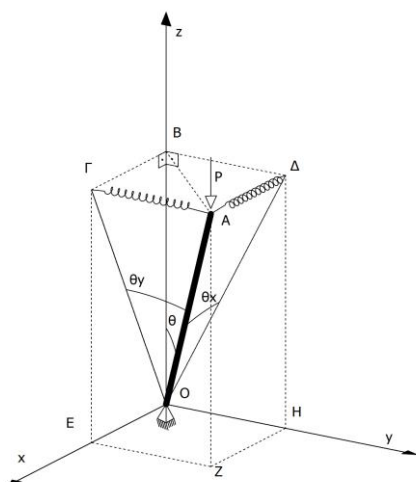


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΣΤΑΘΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΤΟΞΑ



Διπλωματική Εργασία

**Κωνσταντίνος Παπαβασιλείου**

ΕΜΚ ΔΕ 2015/29

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπουσα: Μαρία Λιβανού, υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2015

Copyright © Κωνσταντίνος Σ. Παπαβασιλείου, 2015  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Konstantinos S. Papavasileiou, 2015  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Κωνσταντίνος Σ. Παπαβασιλείου (2015)  
Αλληλεπίδραση ασταθών ιδιομορφών λυγισμού και εφαρμογή σε χαλύβδινα τόξα  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015/29  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos S. Papavasileiou (2015)  
Interaction of unstable buckling modes and application to steel arches  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015/29  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την αφορμή αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην προσπάθειά μου αυτή με άμεσο ή έμμεσο τρόπο.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ που με τίμησε με την εμπιστοσύνη του και μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω αυτή τη διπλωματική υπό την επίβλεψη του. Η διαρκής και υποδειγματική καθοδήγησή μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω για την αμέριστη υποστήριξη της, την υποψήφια Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Μαρία Λιβανού. Η συνεχής και άμεση βοήθεια που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της προσπάθειας αυτής.

Για την πρόθυμη βοήθειά τους σε θέματα λογισμικού, ευχαριστώ τον Βασίλη Μελισσιανό και τον Ηλία Θανάσουλα, υποψηφίους Διδάκτορες του Ε.Μ.Π.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. και τον κ. Τάσο Αβραάμ, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη διαρκή υποστήριξη που μου προσέφεραν καθόλη τη διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων, τους συμφοιτητές και φίλους μου, για τη συμπαράσταση τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

*Κωνσταντίνος Παπαβασιλείου*

*Οκτώμβριος 2015*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2015/29

## **Αλληλεπίδραση ασταθών ιδιομορφών λυγισμού και εφαρμογή σε χαλύβδινα τόξα Κωνσταντίνος Παπαβασιλείου**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων : Μαρία Λιβανού, υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επιρροής της αλληλεπίδρασης ασταθών ιδιομορφών λυγισμού και των αρχικών ατελειών στην αντοχή ελαστικών φορέων. Στην αρχή της εργασίας παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία και στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή σε ένα διβάθμιο σύστημα και τέλος εξετάζεται ένας πραγματικός φορέας.

Η προσομοίωση μιας κατασκευής με ένα μονοβάθμιο σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά σφάλματα λόγω της αδυναμίας περιγραφής ορισμένων φαινομένων. Η δυσκολία επίλυσης όμως των εξισώσεων ισορροπίας συστημάτων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, είναι ο λόγος που επιλέχθηκαν αρχικά για μελέτη, συστήματα με δύο βαθμούς ελευθερίας. Τα παραπάνω συστήματα δεν απαιτούν περίπλοκη μαθηματική επεξεργασία και παράλληλα εμφανίζουν τα φαινόμενα τα οποία δε μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση μονοβάθμιων συστημάτων. Συγκεκριμένα, ο φορέας που επιλέγεται είναι ένα άκαμπτο ραβδί, αρθρωμένο στη βάση του, με δύο μετακινησιακά ελατήρια στην κορυφή του που εμποδίζουν ελαστικά τη μετακίνηση κατά τον άξονα  $x$  και τον άξονα  $y$ . Ο φορέας έχει, προφανώς δύο ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας, τη μετακίνηση κατά  $x$  και τη μετακίνηση κατά  $y$ . Οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα μορφώνονται με χρήση της ενεργειακής μεθόδου. Η επεξεργασία των εξισώσεων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο MATLAB όπου μορφώθηκαν οι δρόμοι ισορροπίας του φορέα για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων ελέγχου. Στόχος ήταν η παρατήρηση της μεταβολής του οριακού φορτίου καθώς ο λόγος των κρίσιμων φορτίων τείνει στη μονάδα καθώς και η επιρροή των ατελειών στην αντοχή του φορέα.

Στο 2<sup>ο</sup> μέρος της εργασίας μελετάται η συμπεριφορά πολυβάθμιων συστημάτων, και συγκεκριμένα, χαλύβδινων τόξων σωληνωτής διατομής. Η προσομοίωση του φορέα έγινε στο λογισμικό FEMAP\_NASTRAN και η επίλυση του στο λογισμικό ADINA. Πραγματοποιήθηκαν και εδώ παραμετρικές αναλύσεις για διάφορους λόγους κρίσιμων φορτίων αλλά και συνδυασμών ατελειών. Στόχος, όπως και πριν, ήταν η παρατήρηση της μεταβολής του οριακού φορτίου καθώς ο λόγος των κρίσιμων φορτίων τείνει στη μονάδα καθώς και η επιρροή των ατελειών στην αντοχή του φορέα.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2015/29

**Interaction of unstable buckling modes and application to steel arches**  
**Konstantinos Papavasileiou**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.  
Co-supervisor : Maria Livanou, PhD Candidate N.T.U.A.

**ABSTRACT**

The subject of the current thesis is the influence of buckling mode interaction and initial imperfections in the behavior of elastic systems. In the first part of this study the theoretical background is presented and then an application to a 2 DOF system and a real scale structure are also demonstrated.

The simulation of a structure with a single-degree of freedom system can lead to serious mistakes because these cannot describe various significant phenomena. However, the difficulty in solving the equilibrium equations of systems with many degrees of freedom, is why systems with two degrees of freedom are initially selected for study. These systems do not require very complex mathematical treatment and also exhibit the phenomena that cannot be described with single-degree of freedom systems. Specifically, the system selected is a rigid rod, pinned at its base, with two translational springs on the top, which elastically restrain the movement in the x-axis and the y-axis. The system has obviously two independent degrees of freedom, the movement along the x-axis and the movement along the y-axis. The formulation of the equilibrium equations is carried out by means of the energy method. The numerical treatment of equilibrium equations held in MATLAB software package where the equilibrium paths are derived for several combinations of the control parameters. The objective was to observe the change in the limit point load as the ratio of the critical loads tends to the unit and the influence of imperfections on the strength of the system.

In the second part of this thesis the behavior of multi-degrees of freedom systems is studied, and specifically steel arches with tubular section are chosen. The simulation of the structure is performed in FEMAP\_NASTRAN software and its solution in ADINA software. As previously described, for this system also parametric analyzes for various combinations are performed, where the ratio of critical loads and initial imperfections vary. The objective was, also for this structure, to observe the change in the limit point load as the ratio of the critical loads tends to the unit and the influence of imperfections on the strength of the structure.