



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΡΕΜΑΣΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ ΜΕΣΩ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία
Χρήστος - Ανδρέας Κανιούρας

ΕΜΚ ΜΕ 2018/6

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Ι. Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Ισαβέλλα Βασιλοπούλου Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

Copyright © Χρήστος - Ανδρέας Κανιούρας, 2018
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 Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Christos - Andreas Kaniouras, 2018
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).

Χρήστος - Ανδρέας Κανιούρας (2018)

**Ανίχνευση φαινομένων συντονισμού σε κρεμαστές γέφυρες
μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων**

Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2018/6

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Christos - Andreas Kaniouras (2018)

Master Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2018/6

**Detection of Resonance Phenomena on Suspension Bridges
through Nonlinear Dynamic Analyses**

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Η μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Χάρη Γαντέ.

Θα ήθελα να του εκφράσω την εκτίμησή μου για τις γνώσεις και το ενδιαφέρον προς την εμβάθυνση των γνώσεων που μου μεταλαμπάδευσε εντός και εκτός αίθουσας. Τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να ασχοληθώ με ένα θέμα που με ενδιαφέρει σημαντικά.

Θέλω επίσης να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου προς την Ισαβέλλα Βασιλοπούλου που με καθοδήγησε και βοήθησε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Την ευχαριστώ για την απaráμιλλη υπομονή και το ενδιαφέρον που έδειξε σε όλα τα στάδια της μελέτης. Εύχομαι να είμαι τυχερός και να συνεργάζομαι με άτομα σαν και την Ισαβέλλα στη ζωή μου.

Είμαι ευγνώμων στη Halifax Harbour Bridges για τα στοιχεία που μου παρείχε σχετικά με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της γέφυρας χωρίς τα οποία δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της εργασίας. Ευχαριστώ τον Ηλία Γκιμούση για την προσφορά του που μείωσε τη χρονική διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ τον Χρυσάνθο Καλλίγερο διευθυντή της Ergosystem ΕΠΕ, που μου έδειξε το κύρος και την επαγγελματικότητα που διέπει ένα πρότυπο Μηχανικού.

Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές που στιγμάτισαν τη διαδρομή μου προς την επιστήμη, τους γονείς μου για τα εφόδια που μου έχουν παράσχει, τους φίλους που στιγμάτισαν το μονοπάτι της ζωής μου και τη Μαρία για τη στήριξη και την υπομονή της αυτόν το χρόνο.

Στον αδερφό μου

"Σειρά σου"



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2018/6

Ανίχνευση φαινομένων συντονισμού σε κρεμαστές γέφυρες μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων

Χρήστος - Ανδρέας Κανιούρας

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Ι. Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Ισαβέλλα Βασιλοπούλου Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Φεβρουάριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της απόκρισης της κρεμαστής γέφυρας Angus L. Macdonald που βρίσκεται στο λιμάνι του Halifax στον Καναδά υπό δυναμικά φορτία, χρησιμοποιώντας λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Η προσοχή εστιάζεται στα δυναμικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε μη γραμμικά συστήματα και συγκεκριμένα στα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την κατακόρυφη κίνηση της κρεμαστής γέφυρας.

Αρχικά παρουσιάζεται θεωρία ιδιομορφικής και δυναμικής ανάλυσης καλωδίων σημαντικής κρέμασης επισημαίνοντας κύριους και δευτερεύοντες συντονισμούς όπως είναι ο υπεραρμονικός και ο υποαρμονικός συντονισμός. Στη συνέχεια περιγράφονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του φορέα της κρεμαστής γέφυρας. Με χρήση του λογισμικού ADINA κατασκευάζεται επίπεδο προσομοίωμα του ενός επιπέδου καλωδίωσης της γέφυρας. Υπολογίζονται οι πρώτες δέκα ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες που αφορούν την κατακόρυφη κίνηση και συγκρίνεται με αναλυτικές λύσεις που δίνουν τις ιδιοσυχνότητες ενός καλωδίου με κρέμαση για την πρώτη συμμετρική και αντισυμμετρική ιδιομορφή.

Ακολούθως, το προσομοίωμα φορτίζεται με αρμονικά φορτία εντός επιπέδου της καλωδίωσης και εκτελούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις. Θεωρούνται οι περιπτώσεις συμμετρικής και αντισυμμετρικής κατανομής φορτίου, ενώ για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις συγκρίνονται διαφορετικές κατανομές και διαφορετικές τιμές της έντασης φόρτισης. Η μόνιμη απόκριση του κύριου καλωδίου σε όρους πλάτους ταλάντωσης και αξονικής τάσης απεικονίζεται σε διαγράμματα για συχνότητες φορτίου κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος στοχεύοντας σε φαινόμενα θεμελιώδους συντονισμού, για συχνότητες μικρότερες της ιδιοσυχνότητας αναζητώντας υπεραρμονικούς συντονισμούς και για συχνότητες μεγαλύτερες της ιδιοσυχνότητας επιδιώκοντας την εμφάνιση υποαρμονικών και εσωτερικών συντονισμών. Παρατηρείται καμπύλωση των διαγραμμάτων προς χαμηλότερες συχνότητες στη συμμετρική φόρτιση που υποδεικνύει συμπεριφορά χαλάρωσης του συστήματος, ενώ στην περίπτωση της αντισυμμετρικής φόρτισης εμφανίζονται κορυφές του διαγράμματος για συχνότητες χαμηλότερες αλλά και υψηλότερες της ιδιοσυχνότητας. Επισημαίνεται ότι ο υπεραρμονικός συντονισμός δευτέρας τάξης είναι αξιοσημείωτος σε αντίθεση με τον

υπεραρμονικό συντονισμό τρίτης τάξης. Επίσης εμφάνιση συντονισμών συχνότητας μεγαλύτερης της ιδιοσυχνότητας πραγματοποιείται μόνο για λόγο εξωτερικής συχνότητας προς ιδιοσυχνότητας ίσο με 2. Ο συντονισμός αυτός εσωτερικός μεταξύ της 1^{ης} και 3^{ης} συμμετρικής ιδιομορφής που μπορεί να ενεργοποιηθεί αφού εξελιχθεί πρώτα ο θεμελιώδης συντονισμός για την 3^η συμμετρική ιδιομορφή. Και στις δύο περιπτώσεις δευτερευόντων συντονισμών η εμφάνισή τους απαιτεί σημαντικά φορτία. Παράλληλα αναζητούνται φαινόμενα παραμετρικού συντονισμού για τους αναρτήρες της γέφυρας.

Τέλος, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της κρεμαστής γέφυρας υπό ρεαλιστικά δυναμικά φορτία με συχνότητες κοντά στην περιοχή των ιδιοσυχνοτήτων της γέφυρας μελετάται φόρτιση εξαιτίας ανέμου. Κατόπιν παρουσίασης των φαινομένων και των φορτίων που εμφανίζονται σε κρεμαστές γέφυρες εξαιτίας ανέμων, παράγονται τεχνητές χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου λαμβάνοντας υπόψη το φάσμα ταχυτήτων ανέμου του Ευρωκώδικα 1. Γίνονται απλοποιητικές υποθέσεις υπέρ της ασφαλείας όσον αφορά τα φορτία και τη χωρική κατανομή τους και εκτελούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με εστίαση της προσοχής στα φαινόμενα απόσχισης δινών και ταλάντωσης εξαιτίας ανεμοριπών (αεροκραδασμοί). Για τη διερεύνηση του φαινομένου απόσχισης δινών εκτελούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με αρμονικά ομοιόμορφα φορτία για ταχύτητες ανέμου έως 15m/s, ενώ στην περίπτωση των αεροκραδασμών εκτελούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις με βάση τα τεχνητά διαγράμματα για ταχύτητες ανέμου έως και 50m/s. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της κατακόρυφης μετατόπισης και της μέγιστης επιτάχυνσης του καταστρώματος για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου, καθώς και οι συχνότητες και τα μη γραμμικά φαινόμενα που ενεργοποιούνται κατά τους αεροκραδασμούς μέσω διαγραμμάτων Fourier.



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

MASTER THESIS
EMK ME 2018/6

Detection of Resonance Phenomena on Suspension Bridges through Nonlinear Dynamic Analyses

Christos - Andreas Kaniouras

Supervisor: Professor Charis J. Gantes
Co-supervisor: Isabella Vasilopoulou, Dr. Civil Engineer
February 2018

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the response of the Angus L. Macdonald suspension bridge located at Halifax harbor in Canada under dynamic loads using finite element software. Attention is focused on the dynamic phenomena that appear in nonlinear systems, namely the phenomena that occur during the vertical movement of the suspension bridge.

Initially, the theory of characteristic and dynamic analysis of hanging cables is presented highlighting main and secondary resonances such as superharmonic and subharmonic resonance. The geometrical and mechanical features of the suspension bridge carrier are described below. Using the ADINA software, a two dimensional model of one cable plane of the bridge is set up. The first ten eigenmodes and eigenfrequencies referring to vertical motion are calculated and compared with analytical formulas that provide the eigenfrequencies of the first symmetric and anti-symmetric eigenmodes of a sagged simple cable.

Next the model is loaded with harmonic loads and nonlinear dynamic analyses are performed. The two cases of symmetric and antisymmetric loadings are considered, while for each of the two cases, several distributions and different values of the loads are compared. The steady-state response of the main cable, in terms of oscillation amplitude and axial stress, is shown in graphs for loading frequencies close to the natural frequencies of the system aiming at fundamental resonance phenomena, for frequencies smaller than the natural frequencies seeking superharmonic resonances and for frequencies larger than the natural frequencies, triggering subharmonic and internal resonances. The backbone curve of the diagrams is curved towards lower frequencies in the symmetric loading indicating softening behavior of the system, while in the case of antisymmetric loading, the peaks of the diagram appear for frequencies both smaller and larger than the natural frequency. It is shown that second-order superharmonic resonance is considerable in contrast to third-order superharmonic resonance. Moreover, occurrence of resonances at loading frequency larger than the natural frequency develops only for a ratio of loading frequency to natural frequency equal to 2. This is an internal resonance between the 1st and 3rd symmetric eigenmodes, which can be triggered after the fundamental resonance for the 3rd symmetric eigenmode has developed. In both of the

above cases of secondary resonances their emergence requires considerable loads. Parametric resonance phenomena for the hangers are also investigated.

Finally, in order to investigate the behavior of the suspension bridge under realistic dynamic loads with frequencies close to the domain of natural frequencies of the bridge, wind loading is studied. Following the presentation of phenomena and forces that occur on suspension bridges due to winds, artificial time-histories of wind velocity are produced taking into account the wind velocity spectrum of Eurocode 1. Conservative assumptions with the purpose of simplification regarding the loading and its spatial distribution are made, and nonlinear dynamic analyses are performed focusing on the phenomena of vortex shedding and buffeting. For the investigation of oscillations due to vortex shedding, nonlinear dynamic analyses are carried out with uniform harmonic loads for wind velocities up to 15m/s, while in case of buffeting nonlinear dynamic analyses are carried out based on the artificial time-histories for wind velocities up to 50m/s. Results of vertical displacement and maximum vertical acceleration of the deck for different wind velocities, as well as through Fourier graphs the frequencies and the nonlinear phenomena activated during buffeting, are presented and commented upon.