



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ  
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΞΩΤΗΣ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**Ελένη Κοντώση**

ΕΜΚ ΔΕ 2015 7

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπουσα: Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

Copyright © Ελένη Κοντώση, 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 της συγγραφέως. 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 τη συγγραφέα.

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

Copyright © Eleni Kontosi, 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 organization (L. 5343/1932, art. 202).

Ελένη Κοντώση (2015)

Διερεύνηση επιρροής ανέμου και χαρακτηριστικών παραμέτρων του στον σχεδιασμό τοξωτής  
μεταλλικής γέφυρας

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 7

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Eleni Kontosi (2015)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 7

Investigation of the Influence of Wind and Its Characteristic Parameters in the Design of a  
Steel Arch Bridge

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

~ **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ** ~

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ διότι κατανόησε και στήριξε με τον τρόπο του τις αποφάσεις μου για την συνέχεια της ακαδημαϊκής και επαγγελματικής μου πορείας. Επίσης τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στη συνεργασία μας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα ενός ιδιαίτερος ενδιαφέροντος ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος το οποίο έχει επίσης και πρακτικό ενδιαφέρον για μηχανικούς που ασχολούνται με την γεφυροποιία. Ήταν πάντα πρόθυμος να προσφέρει καθοδήγηση και βοήθεια, μεταφέροντας σε εμένα την εμπειρία, τη διορατικότητα και τις γνώσεις του πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Χωρίς τις παρεμβάσεις του η διπλωματική αυτή εργασία δεν θα είχε την οπτική και το επίπεδο που έχει αυτή τη στιγμή. Επίσης θέλω να τον ευχαριστήσω για το επίπεδο του μαθήματος που προσφέρει στους φοιτητές του 4ου και 5ου έτους της σχολής μας. Με ενέπνευσε ως καθηγητής και ως άνθρωπος να συμβάλλω και εγώ στο μάθημα με τον καλύτερο τρόπο που μπορούσα. Εύχομαι να συνεχίσει να παράγει έργο εξίσου υψηλής ποιότητας τόσο ως ακαδημαϊκός όσο και ως δάσκαλος.

Παράλληλα τον ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με την Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, μία λαμπρή και πανέξυπνη μηχανικό. Θέλω να την ευχαριστήσω για την πολύτιμη βοήθεια της, τη στήριξή της, την καθοδήγησή της και τις ιδέες της. Χωρίς την συμβολή της η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη. Νιώθω ότι δεν μπορώ να την ευχαριστήσω αρκετά για τις γνώσεις και τον τρόπο σκέψης που μου μετέφερε. Είχαμε μία πολύ όμορφη συνεργασία και παρά την πίεση των τελευταίων εβδομάδων θα μου λείπει πολύ αυτή η συνεργασία και επικοινωνία μας. Η όρεξη και η αγάπη της για το επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού θα έπρεπε να αποτελούν πηγή έμπνευσης παράδειγμα για όλους τους επαγγελματίες Πολιτικούς Μηχανικούς. Εύχομαι να συνεχίσει με το ίδιο πάθος και να αναγνωριστεί το ταλέντο και ο αναλυτικός τρόπος σκέψης της και ευρύτερα.

Ευχαριστώ ακόμα τους καθηγητές κ. Ι. Ραυτογιάννη και τον κ. Π. Θανόπουλο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου, τον Νίκο, την Ντένη, την Στάθια, την Μαρία, τον Μαρίνο, τον Παντελή και τον Δημήτρη, οι οποίοι όλο αυτό το διάστημα με συντρόφεψαν σε αυτό το όμορφο ταξίδι και όλη την πορεία μου στη σχολή. Επίσης, τους ευχαριστώ για την υπομονή και την ανοχή τους σε μία περίοδο με μεγάλη πίεση και άγχος για μένα. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω και όσους φίλους με βοήθησαν εκτός σχολής και κυρίως τον Αλέξανδρο, την Πελαγία, τον Στάθη και τον Γιώργο. Ακόμη, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην φίλη μου Άννα Δανά που έφτιαξε την εικόνα του εξωφύλλου της διπλωματικής μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδερφό μου για τη στήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν. Τους ευχαριστώ που πάντα με υποστηρίζουν στις επιλογές και τους στόχους μου δίνοντάς μου δύναμη και βοηθώντας με να αντιμετωπίσω τις αποτυχίες μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2015 7

## **Διερεύνηση επιρροής ανέμου και χαρακτηριστικών παραμέτρων του στον σχεδιασμό τοξωτής μεταλλικής γέφυρας**

**Ελένη Κοντώση**

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

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ένας μελετητής που σχεδιάζει μία γέφυρα και καλείται να υπολογίσει τα φορτία ανέμου που επιδρούν σε αυτή βασίζεται στις διατάξεις του EN 1991 Μέρος 1-4. Ωστόσο ο κανονισμός αυτός έχει αρκετά μεγάλη πολυπλοκότητα, σημαντικούς περιορισμούς ως προς την εφαρμογή του καθώς και αρκετές απλουστευτικές μεθοδολογίες. Για παράδειγμα, ο κανονισμός αυτός δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις τοξωτών γεφυρών αλλά και άλλων γεφυρών που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στα φορτία ανέμου. Είναι σημαντική λοιπόν η ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν τα φορτία του ανέμου, η κατανόησή τους και η παραμετροποίηση του προβλήματος του υπολογισμού των φορτίων αυτών ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά αλλά και σε συνδυασμό στην απόκριση μιας κατασκευής.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μία αναλυτική εφαρμογή του EN 1991 Μέρος 1-4 σε μία μεταλλική τοξωτή γέφυρα. Η γέφυρα που μελετάται αποτελείται από δύο αμφιέριστα ανοίγματα θεωρητικού μήκους 42.00m το καθένα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με πλάκα συνέχειας. Το θεωρητικό πλάτος του καταστρώματος ισούται με 14.70m. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι σύμμικτο και το κάθε άνοιγμα αποτελείται από δύο κύριες δοκούς και δεκαεφτά διαδοκίδες. Κάθε κύρια δοκός αναρτάται από ένα τόξο με τη χρήση αναρτήρων ενώ τα δύο τόξα του κάθε ανοίγματος συνδέονται μεταξύ τους με εγκάρσια και διαγώνια μέλη δυσκαμψίας. Το ύψος των τόξων είναι ίσο με 10.00m. Οι δοκοί, οι διαδοκίδες, τα τόξα και οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας έχουν κατασκευαστεί από δομικό χάλυβα. Το μεσόβαθρο αποτελείται από τη δοκό έδρασης και τρεις στύλους κυκλικής συμπαγούς διατομής από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει ύψος 10m συμπεριλαμβανομένης της δοκού έδρασης. Τα ακρόβαθρα θεωρούνται πολύ δύσκαμπτα σε σχέση με τη γέφυρα και γι' αυτό θεωρούνται ακλόνητα.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση και επεξήγηση των παραμέτρων του ανέμου και των σχέσεων που προσδιορίζουν τις ταχύτητες, πιέσεις και δυνάμεις λόγω ανέμου και επιλέγονται κατάλληλα οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για την ανάλυση. Οι παράμετροι αυτές αφορούν την ταχύτητα του ανέμου, την τραχύτητα του εδάφους, τη μορφή της κοιλάδας, το ύψος του μεσοβάθρου και την επιλογή των διατομών. Επίσης, από τα δυναμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γέφυρας προσδιορίζεται και ο συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής της γέφυρας που προσαυξάνει τα φορτία ανέμου προκειμένου να ληφθεί υπόψη το δυναμικά φαινόμενα λόγω του ανέμου. Επίσης, ελέγχεται η απόκριση της γέφυρας και η τήρηση όλων των ορίων ασφαλείας που θέτει ο Ευρωκώδικας 1 στο σύνολό του για όλα τα στατικά (ίδια βάρη, φορτία κυκλοφορίας, θερμικά φορτία και φορτία ανέμου) και δυναμικά (σεισμός) φορτία που δρουν στην γέφυρα. Γενικά παρατηρείται ότι τα μέλη που επηρεάζονται περισσότερο από τα στατικά φορτία ανέμου είναι τα τόξα και οι κύριες δοκοί, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται κάποια υπέρβαση τάσεων. Από τα σεισμικά φορτία επηρεάζονται κυρίως το μεσόβαθρο καθώς και οι οριζόντιοι και διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Τέλος, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διενεργείται παραμετρική ανάλυση, όπου αξιολογούνται οι βασικές παραδοχές και η επιρροή τους στον υπολογισμό των φορτίων και των εντατικών μεγεθών των μελών της γέφυρας. Συγκεκριμένα, στην παραμετρική ανάλυση διερευνάται η επίδραση της βασικής ταχύτητας του ανέμου στα φορτία και την απόκριση της κατασκευής. Επίσης διερευνάται πώς επηρεάζει ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους τα αποτελέσματα διενεργώντας αναλύσεις για κάθε κατηγορία εδάφους, καθώς και πώς επηρεάζει τα φορτία ο συντελεστής αναγλύφου εδάφους επιλέγοντας διαφορετικό ύψος αναφοράς για τη γέφυρα και διαφορετική κλίση της κοιλάδας. Τέλος, γίνεται διερεύνηση του συνδυασμένου δυναμικού συντελεστή για τα φορτία ανέμου και της επίδρασης των γεωμετρικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της γέφυρας στον υπολογισμό του. Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψε πως η ταχύτητα του ανέμου είναι η βασική παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι μεταβάλουν κυρίως τα φορτία ανέμου και δευτερευόντως την απόκριση της γέφυρας. Συγκεκριμένα, η κατηγορία εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση έως 55% των φορτίων, ο συντελεστής αναγλύφου εδάφους σε αύξηση έως 16% και ο συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αύξηση 100%. Ωστόσο, επειδή τα φορτία του ανέμου είναι γενικώς μικρά συγκριτικά με τα υπόλοιπα φορτία της γέφυρας οι αυξήσεις αυτές δεν επηρεάζουν σημαντικά την συνολική απόκριση της γέφυρας.

Η διπλωματική αυτή εργασία διεξάγεται στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EUROSTARS "BridgeCloud" με τίτλο «Αεροδυναμική Ανάλυση βασισμένη σε προσομοίωμα γεφυρών μεγάλου ανοίγματος στο HPC Cloud», το οποίο έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός εικονικού εργαστηρίου σχεδιασμού για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης ανέμου-γέφυρας με ημι-αυτόματη προσομοίωση με τεχνολογία BIM που περιλαμβάνει δημιουργία πλέγματος, αριθμητική ανάλυση της αλληλεπίδρασης ανέμου-γέφυρας και τεχνολογία cloud computing, παρέχοντας έτσι μία εύκολη στη χρήση, εκλεπτυσμένη λύση για τον σχεδιασμό γεφυρών από MME.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2015 7

**Investigation of the Influence of Wind and Its Characteristic Parameters in the Design of a Steel Arch Bridge**

**Kontosi Eleni**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

Co-supervisor: Isabella Vassilopoulou, Dr. Civil Engineer

**ABSTRACT**

The calculation of wind loads for the structural design of a bridge is based on the provisions of EN 1991 Part 1-4.. However, this code is quite complex in its application, has significant limitations as well as several simplifications. For example, this code cannot be applied in cases of arch bridges and other bridges that are particularly sensitive to wind loads. It is thus important to analyze the parameters affecting the wind loads and to understand and parameterize the problem of the calculation of these loads in order to investigate the influence of each parameter separately as well as in combination with each other.

Part of this thesis is an analytical application of EN 1991 Part 1-4 in a steel arch bridge. The bridge consists of two simply supported spans with theoretical length equal to 42.00m, each. The connection between the two spans is realized by a continuous reinforced concrete slab. The theoretical width of the deck is equal to 14.70m. The composite deck consists of two main beams and seventeen transverse beams. Each main beam is suspended by one arch with the use of hangers. The two arches of each span are interconnected with horizontal and diagonal bracing members. The height of the arches is equal to 10.00m. The main and transverse beams, the arches and the bracing members are made of structural steel. The pier consists of three circular reinforced concrete columns, which are connected at the top with a concrete beam. The abutments are considered as rigid due to their significant stiffness.

In the present thesis, the wind parameters which determine the wind velocity, wind pressure and wind forces are presented in detail and explained. The necessary parameters for the analysis are properly chosen. These parameters include the wind velocity, the terrain roughness, the shape of the valley, the height of the pier and the structures' cross sections. The dynamic and geometric characteristics of the bridge are determined and the structural

factor of the bridge regarding wind loads is calculated. The response of the bridge and all safety limits set by Eurocode 1 for all static (self weight, permanent loads, traffic loads, thermal loads and wind loads) and dynamic (seismic) loads acting on the bridge are investigated. It is generally observed that the members most affected by static wind loads are the arches and main beams. Nevertheless, their stresses do not exceed the permissible ones. Seismic loads mainly affect the pier and the transverse and diagonal bracings.

Finally, a parametric analysis is conducted in order to investigate the influence of the basic assumptions made in the analysis on the calculation of loads and internal forces of the members of the bridge. Specifically, the parametric analysis refers to the effect of the basic wind velocity on the loads and response of the structure. The effects of the roughness factor on the results are also examined by conducting analyses for each terrain category as well as the effects of the orography factor by selecting different reference levels for the bridge and different slope of the valley. Finally, the influence of the structural factor amplifying the wind loads as well as the effect of the geometric and dynamic characteristics of the bridge are studied.

The parametric analysis showed that the parameter that affects mostly the response of the bridge is the wind velocity, while the other parameters used for the calculation of the wind pressures on the structure affect mostly the wind loads and secondarily the response of the bridge. Specifically, the terrain category can lead up to a 55% increase of the wind loads, the orography factor up to a 16% increase and the structural factor can even lead to 100% increase. Due to the small value of the wind loads compared to the other loads applied on the bridge, its response is not affected significantly.

This thesis is conducted within the research program EUROSTARS "BridgeCloud" entitled «Model-Based Aeroelastic Analysis of Long-Span Bridges on the HPC Cloud», which aims at developing a bridge-wind interaction virtual design lab that integrates semi-automatic modeling on a BIM basis with mesh generation, numerical wind-bridge interaction analysis and cloud computing power, providing for an easy-to-use sophisticated design tool to bridge design SMEs.