

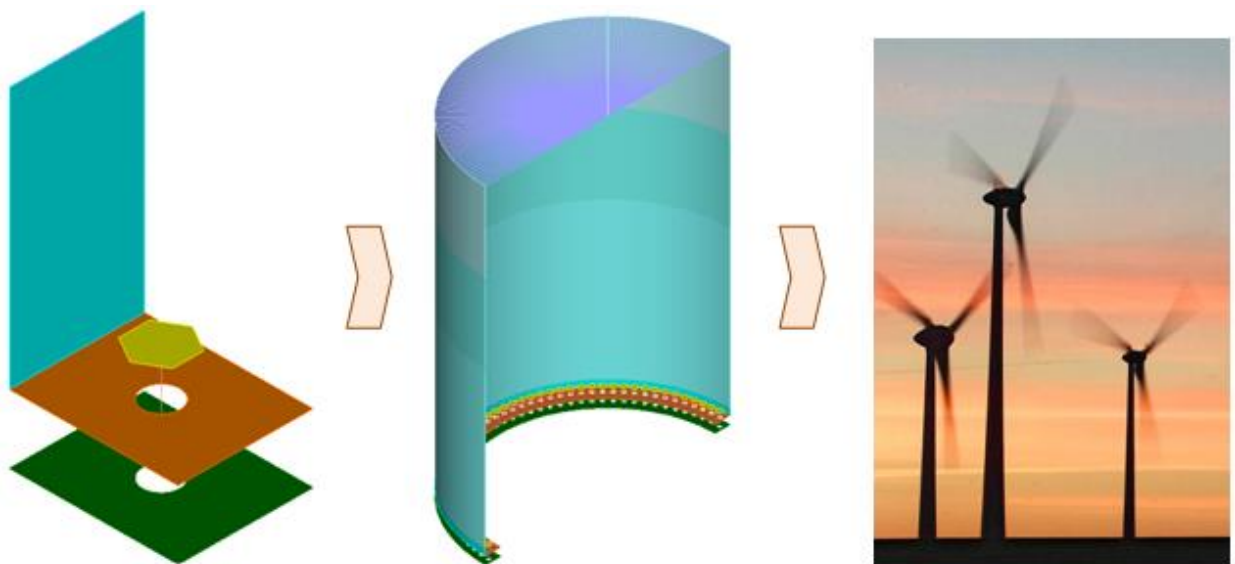


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ  
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία  
Αθηνά Σπινάσα

ΕΜΚ ΔΕ 2020 23

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές  
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας

Αθήνα, Ιούλιος, 2020

Copyright © Αθηνά Σπινάσα, 2020  
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 τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Athina Spinasa, 2020  
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).

Αθηνά Ι. Σπινάσα (2020)

Αριθμητική Προσομοίωση, Μελέτη Απόκρισης και Παραμετρική Διερεύνηση Συνδέσεων Αποκατάστασης  
Συνδέσεων Αποκατάστασης Συνέχειας Πυλώνων Ανεμογεννητριών  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2020 23  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Athina I. Spinasa (2020)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2020 23  
Numerical Simulation, Response Evaluation and Parametric Analysis of Splice Connections in Tubular  
Wind Turbine Towers  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή, κύριο Χάρη Γαντέ όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την βοήθεια του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά κυρίως για τη μύηση μου στις μεταλλικές κατασκευές. Η επιστημονική καθοδήγηση του, η διαθεσιμότητα του για την επίλυση των αποριών μου και οι συμβουλές του ήταν κεφαλαιώδους σημασίας και θα με συνοδεύουν εφεξής στην πορεία μου ως Πολιτικό Μηχανικό.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου για τη σημαντική συνεισφορά της, στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστίες οφείλονται και στον Δρ Πολιτικό Μηχανικό Ηλία Θανασούλα, για την συμβολή του σε θέματα προσομοίωσης.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2020 23

## **ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

**Αθηνά Ι. Σπινάσα**

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές  
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας  
Ιούλιος 2020

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα τελευταία χρόνια όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον αναπτύσσεται για την αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα η απαίτηση για τη διερεύνηση διαφόρων θεμάτων όσον αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών να αυξάνεται συνεχώς. Οι ανεμογεννήτριες μεγαλώνουν όλο και περισσότερο, τόσο ως προς την προσβαλλόμενη από τον άνεμο επιφάνεια, λόγω αύξησης του μήκους των πτερυγίων, όσο και σε ύψος των πυλώνων, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό, με αποτέλεσμα να αυξάνονται και τα φορτία του ανέμου που καταπονούν τα δομικά μέρη των ανεμογεννητριών. Συνεπώς, η μελέτη της αντοχής και κόπωσης των συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα έναντι αυτών των φορτίων κρίνεται απαραίτητη. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προταθεί μία βέλτιστη αριθμητική προσομοίωση για την παραμετρική διερεύνηση και τη μελέτη απόκρισης των συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας των πυλώνων ανεμογεννητριών.

Αρχικά, με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων μελετάται η συμπεριφορά ενός προσομοιώματος βραχέος «L», οι διαστάσεις του οποίου προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Αποτελεί τμήμα μιας σύνδεσης που περιλαμβάνει έναν κοχλία και το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή ελάσματα καθώς και ένα τμήμα του πυλώνα. Χρησιμοποιούνται επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για το τμήμα των δακτυλιοειδών ελασμάτων και του πυλώνα, γραμμικά στοιχεία τύπου "κοχλία" για τον κοχλία και στοιχεία επαφής για τις διεπιφάνειες μεταξύ ελασμάτων και μεταξύ του κοχλία και των ελασμάτων. Στις αναλύσεις εξετάζονται η επίδραση του τύπου των παραμορφώσεων, μικρές ή μεγάλες, και η επίδραση του τρόπου προσομοίωσης της σύνδεσης μεταξύ του κελύφους του πυλώνα και του δακτυλιοειδούς ελάσματος, ώστε να λαμβάνεται υπόψη το πάχος του ελάσματος. Επίσης, το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνεται με αντίστοιχο προσομοίωμα τρισδιάστατων στοιχείων όγκου αλλά και με τα αποτελέσματα πειράματος που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Επιπλέον, γίνονται δύο ομάδες παραμετρικών αναλύσεων, που αφορούν στα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων και στην διάμετρο του κοχλία σύνδεσης, ώστε να διερευνηθεί η επιρροή τους στην στατική συμπεριφορά του βραχέος L.

Στη συνέχεια, διερευνάται η αντοχή ολόκληρης σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας με χρήση κατάλληλου αριθμητικού προσομοιώματος από επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία που περιλαμβάνει το άνω και κάτω δακτυλιοειδές έλασμα της σύνδεσης, τους κοχλίες και τμήμα του πυλώνα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αναλυτικού υπολογισμού των ορθών τάσεων του πυλώνα. Τέλος, με το υπόψη προσομοίωμα πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις όπως και με το προσομοίωμα του βραχέος L διερευνώντας επιπλέον την επιρροή της δύναμης προέντασης των κοχλιών.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2020 23

## **Numerical Simulation, Response Evaluation and Parametric Analysis of Splice Connections in Tubular Wind Turbine Towers**

**Athina I. Spinasa**

Supervisor: Professor Charis Gantes  
Co-supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD candidate  
July, 2020

### **ABSTRACT**

Nowadays, there has been a growing interest in wind energy. Thus, the demand for investigation of various issues related to the design, construction and operation of wind turbines is constantly increasing. Wind turbines are continuously growing, both in terms of wind-blown surface, due to increased blades length, as well as regarding the height of the tower, in order to make better use of wind capacity, resulting in increasing wind loads, which are demanding for the structural parts of wind turbines. Therefore, the study of the strength and fatigue of wind turbine tower connections against these loads is considered necessary. The aim of this paper is to propose an optimal numerical simulation for the parametric and response analysis of the wind turbine tower connections.

Initially, a detailed L-stub model of the part of the connection corresponding to a single bolt, scaled from a real wind turbine tower connection, is studied by means of an appropriate finite element software. This model includes a bolt and the corresponding parts of the ring flanges and the pylon. For the two ring flanges and the pylon shell finite elements are used, while the bolt shank is modeled with "bolt-type" beam elements and contact elements are appropriately used between the top flange and bolt head and between the two flanges. Comparative analyses are performed regarding the type of strains, small or large, and the influence of the tower shell trim by means of rigid elements in order to account for the effect of flange thickness. Moreover, the model with shell finite elements is compared with a corresponding model comprising 3d solid finite elements and with the results of an experiment that took place at the Institute of Steel Structures of NTUA. In addition, two groups of parametric analyses are performed, concerning the thickness of the ring flanges and the diameter of the bolt, in order to investigate their influence on the static behavior of the model.

Then, the strength of the entire wind turbine tower connection is examined using a shell finite element model, which includes the upper and lower ring flange of the connection, the bolts and part of the pylon. The vertical normal stresses of the pylon obtained from the numerical analyses are compared with those of a detailed analytical model. Lastly, similar parametric analyzes as for the L-stub model, investigating in addition the influence of the prestressing force of the bolts.