

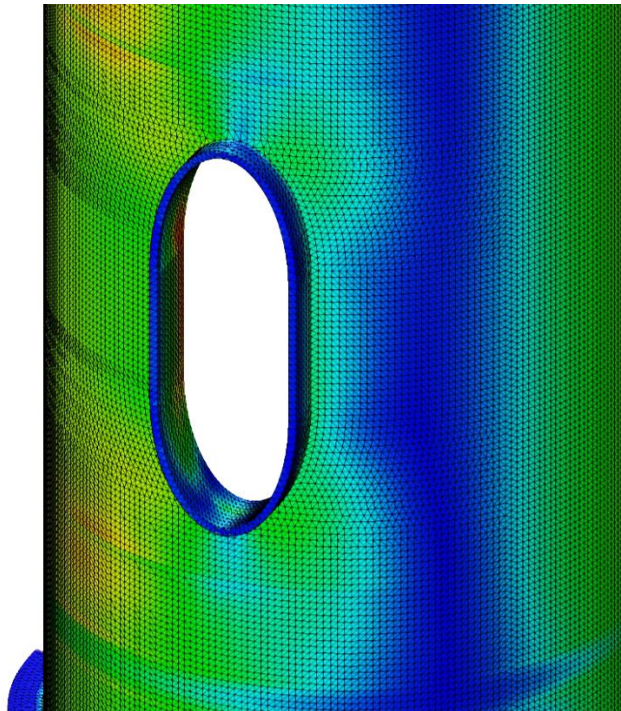


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ  
ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ  
ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ  
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία  
Αδαμοπούλου Δήμητρα

ΕΜΚ ΔΕ 2019 20

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές  
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Copyright © Αδαμοπούλου Δήμητρα, 2019  
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 την συγγραφέα.

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

Copyright © Adamopoulou Dimitra, 2019  
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).

Αδαμοπούλου Δήμητρα (2019)  
Διερεύνηση κόπωσης συγκολλητών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών μέσω αναλύσεων  
πεπερασμένων στοιχείων  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019 20  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Adamopoulou Dimitra (2019)  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019 20  
Fatigue investigation of wind turbine tower welded joints  
through finite element analysis  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χάρη Γαντέ αρχικώς για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για την πλήρη καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια υλοποίησης της. Οι συμβουλές του από τα πρώτα στάδια της εργασίας μέχρι και την σύνταξη αυτής, καθώς και η ανεκτίμητη βοήθεια του στην επίλυση των προβλημάτων που εμφανίζονταν στην πορεία ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου, για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου παρείχε για την προς έλεγχο κατασκευή, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια της πάνω στο αντικείμενο της εργασίας και τις γνώσεις τις οποίες μου μετέδωσε.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2019 20

## **Διερεύνηση κόπωσης συγκολλητών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων**

**Αδαμοπούλου Δήμητρα**

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές  
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π  
Νοέμβριος 2019

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην σημερινή εποχή, δεδομένης της συνεχώς μεγαλύτερης ζήτησης σε ενέργεια, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας κερδίζει συνεχώς έδαφος μεταξύ των υπόλοιπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την βελτίωση της τεχνολογίας παρατηρείται συνεχής αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών, τόσο ως προς το ύψος του πυλώνα όσο και ως προς το μήκος των πτερυγίων, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό. Αποτέλεσμα είναι η αύξηση των φορτίων που καταπονούν την κατασκευή, και κυρίως των φορτίων που οφείλονται στον άνεμο, τα οποία λόγω της δυναμικής τους φύσης δημιουργούν την ανάγκη ελέγχου των συνδέσεων του πυλώνα της ανεμογεννήτριας σε κόπωση.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 1993-1-9, της κόπωσης των συγκολλητών συνδέσεων γύρω από την οπή της ανθρωποθυρίδας του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας μορφής κυλινδρικού κελύφους, ύψους περί τα 118m και διαμέτρου 4.30m.

Αρχικώς προσομοιώθηκε το κατώτερο τμήμα του πυλώνα, στο οποίο βρίσκεται και η οπή της ανθρωποθυρίδας, με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για να γίνουν οι απαραίτητες αναλύσεις του φορέα. Για να είναι αποδοτικό το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, τόσο από άποψη υπολογιστικού κόστους όσο και ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παρέχει, χρειάστηκε μια διερεύνηση του είδους των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και της πυκνότητας του πλέγματος αυτών. Ακόμη, κρίθηκε σκόπιμη μια διερεύνηση της επιρροής που έχει στην συμπεριφορά του πυλώνα της ανεμογεννήτριας η διάνοιξη της οπής της ανθρωποθυρίδας, καθώς και του ποσοστού βελτίωσης που προσφέρει κάθε είδος ενίσχυσης στην τοπικά απομειωμένη αντοχή του κελύφους. Στην συνέχεια, έγινε εφαρμογή των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από την ανάλυση για τον έλεγχο κόπωσης των συγκολλητών συνδέσεων του υπό μελέτη τμήματος του πυλώνα. Τα εντατικά μεγέθη που ασκήθηκαν ήταν σε όρους καμπτικής ροπής, για ένα εύρος ροπών από 200kNm έως 88400kNm με βήμα 200kNm, αντιπροσωπευτικό των πραγματικών φορτίων που καταπονούν τον πυλώνα της κατασκευής.

Με βάση τις αναπτυσσόμενες τάσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των συγκολλήσεων σε κόπωση, μέσω της μεθόδου συσσώρευσης βλάβης, για πλήθος κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης που αντιστοιχεί σε διάρκεια ζωής 25 ετών, και προσδιορίστηκε η κρισιμότερη θέση μεταξύ των συγκολλήσεων που μελετήθηκαν.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2019 20

## **Fatigue investigation of wind turbine tower welded joints through finite element analysis**

**Dimitra Adamopoulou**

Supervisor: Professor Charis Gantes  
Co-supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD Candidate, NTUA  
November 2019

### **ABSTRACT**

Nowadays, given the ever-increasing demand for energy, the exploitation of wind energy is constantly gaining ground among other renewable resources. With the improvement of technology there is a continuous increase in the size of the wind turbine, both in the height of the wind turbine tower and in the length of the blades, in order to make the most of the wind potential. As a result, there is a significant increase in the design loads of the construction, especially the wind loads, which due to their dynamic nature require fatigue verification of the welded connections of the wind turbine tower.

The purpose of this thesis is the investigation, according to the European Regulation EN 1993-1-9, of the fatigue of welded joints around the manhole cut-out of a typical wind turbine tower, having the shape of a cylindrical shell with about 118m height and 4.30m diameter.

Firstly, the lower part of the wind turbine tower, where the manhole cut-out is located, was simulated with a finite element model to perform the necessary analysis of the structure. Aiming at the efficiency of the model, both in terms of computational cost and accuracy of the analysis results, the investigation of the type and density of the finite element mesh used in the simulation was carried out. In addition to that, the investigation of the influence that the manhole cut-out has in the behavior of the tower is deemed as of great significance, as well as the degree of improvement that the different types of stiffening provide for the upgrade of the reduced shell strength. Subsequently, the design forces obtained from the analysis for fatigue verification of the wind turbine welded joints were applied at the examined tower part. The design forces applied were in terms of bending moment, ranging from 200kNm to 88400kNm with a step of 200kNm, which represent the actual loads that are applied on the tower during its lifetime.

The fatigue verification of the welded joints was carried out based on the stresses that resulted from the finite element analysis via the damage accumulation factor for a number of cycles corresponding to 25 years of wind turbine lifetime. According to the damage accumulation factor the most critical position for fatigue crack development among the welded joints being investigated in this thesis was also determined.