



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ



Μεταπτυχιακή Εργασία  
Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη

ΕΜΚ ΜΕ 2016/07

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΜΕ 2016/07

## **ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ**

**Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη**

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές  
Οκτώβριος 2016

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα τελευταία χρόνια, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ανεμογεννήτριες γίνονται όλο και μεγαλύτερες αυξάνοντας το ύψος των πυλώνων και το μήκος των πτερυγίων, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Το γεγονός αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καταπόνησής τους από τα φορτία του ανέμου. Λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων ανέμου, τα οποία αποτελούν το κρισιμότερο φορτίο μίας ανεμογεννήτριας, η κόπωση είναι το κυρίαρχο φαινόμενο αστοχίας μίας τέτοιας κατασκευής, γι' αυτό και η μελέτη των συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο έλεγχος έναντι κόπωσης, σύμφωνα με τον EN 1993-1-9, μιας σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα μίας τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων, με ονομαστική ισχύ 1.5mW. Η υπό μελέτη σύνδεση βρίσκεται στα 0.85 του ύψους του πυλώνα και συνδέει το ανώτερο τμήμα ως το ρότορα με τον υπόλοιπο πυλώνα.

Αρχικά, χρησιμοποιώντας κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία από το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL), προσδιορίζονται ρεαλιστικές χρονοϊστορίες ανέμου και χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών από τον ρότορα στον πυλώνα. Οι χρονοϊστορίες αυτές επιβάλλονται, στην συνέχεια, ως φορτία ανέμου στην υπό μελέτη σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας.

Για την μελέτη της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας δημιουργείται κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0. Οι συνδέσεις αυτές υλοποιούνται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκολλημένων σε κάθε τμήμα του πυλώνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες. Το αριθμητικό προσομοίωμα περιλαμβάνει ολόκληρη την σύνδεση καθώς και το τμήμα του πυλώνα από την θέση της σύνδεσης ως την κορυφή. Τα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα της σύνδεσης, ο πυλώνας, καθώς και οι κεφαλές των κοχλιών προσομοιώνονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ οι κορμοί των κοχλιών με στοιχεία δοκού. Οι επαφές ανάμεσα στα δακτυλιοειδή ελάσματα, μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλία και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Στην κορυφή του πυλώνα του αριθμητικού προσομοιώματος επιβάλλονται οι χρονοϊστορίες απόκρισης από τα φορτία ανέμου στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και μέσω δυναμικών αναλύσεων προσδιορίζονται οι χρονοϊστορίες των τάσεων στα κρίσιμα μέλη.

Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος σε κόπωση, μέσω του συντελεστή συσσώρευσης βλάβης. Προσδιορίζεται η επάρκεια της σύνδεσης στην διάρκεια ενός έτους και ο υπολοίπομος χρόνος ζωής μέχρι την αστοχία λόγω κόπωσης και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την διαστασιολόγηση των συνδέσεων.



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

POSTGRADUATE THESIS  
EMK ME 2016/07

## **FATIGUE BEHAVIOR OF WIND TURBINE TOWER CONNECTIONS**

**Aikaterini I. Ntaifoti**

Supervisor: Professor Charis Gantes  
October 2016

### **ABSTRACT**

Nowadays, with the development of technology, the dimensions of the wind turbines increase continuously, in order to take better advantage of the available wind potential. This results to taller towers and longer blades. Due to the dynamic nature of the wind loads, which are the prevailing loads on wind turbines, fatigue is one of the most common types of structural failure. Thus, the investigation of the connections between adjacent parts is of particular interest.

Objective of the present postgraduate thesis is the fatigue analysis of a wind turbine tower connection, for a typical horizontal axis three-bladed wind turbine of rated power 1.5mW, according to Annex A of EN 1993-1-9. The connection is located at 85% of the tower height and connects the upper tower part up to the rotor with the rest of the tower.

Initially, realistic time histories of the wind velocity and of the wind loads acting on the tower from the rotor are obtained, via appropriate computational engineering tools from National Renewable Energy Laboratory (NREL), and applied at the connection.

For the investigation of the behavior of the connection between adjacent parts a proper numerical model is created, using finite element program ADINA v9.0.0. Such connections are realized by means of ring flanges that are pre-welded at each part of the tower and are bolted together with fully preloaded bolts. The numerical model includes the entire bolted ring flange connection, as well as the tower part from the connection until the top. For the numerical simulation, shell elements are employed for the flange and "bolt" beam elements for the bolts. The interaction between flanges and bolts and between nuts and flanges is appropriately taken into account using contact elements. The response time histories, produced by the wind pressures acting on the wind turbine blades, are applied at the top of the tower and stress time histories at critical parts are determined via dynamic analysis.

Finally, fatigue verification is performed via the calculation of the damage accumulation factor. The sufficiency of the connection and its remaining lifetime until fatigue failure are determined and useful conclusions for the proper design of such connections against fatigue are extracted.