

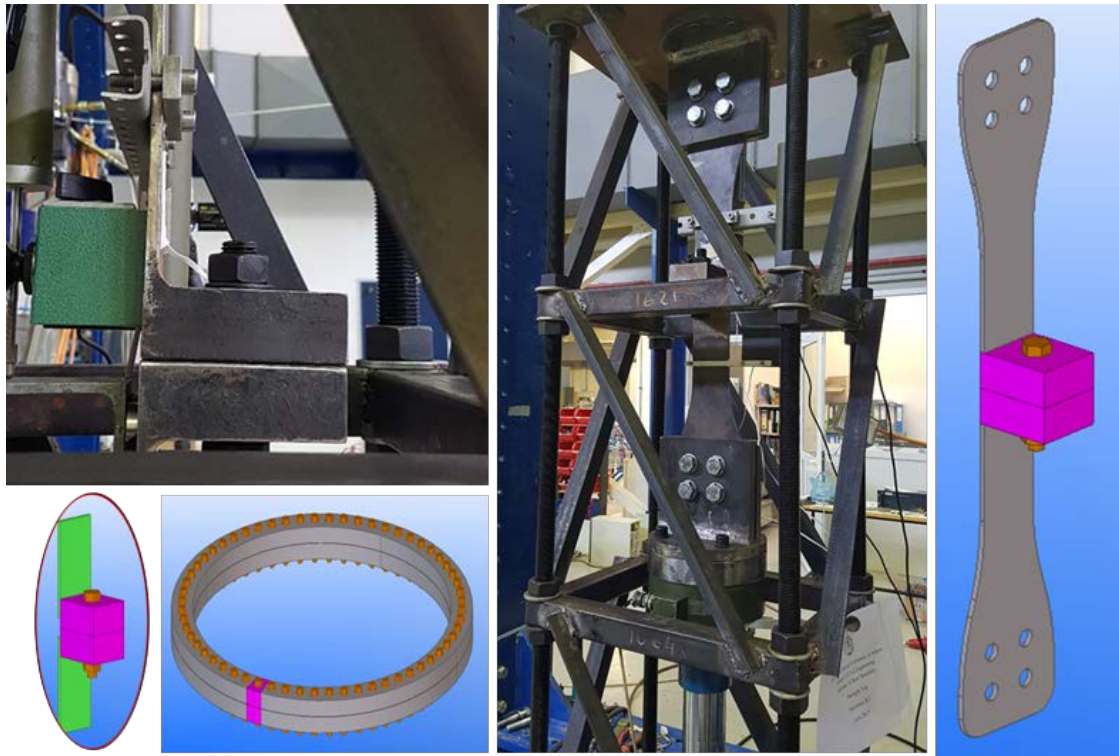


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Σχολή Πολιτικών Μηχανικών**

**Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ελένη Ι. Κοσμίδου**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

**Αθήνα, Οκτώβριος 2017**

**ΕΜΚ ΜΕ 2017/12**

Copyright © Ελένη Κοσμίδου, 2017  
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 Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Eleni Kosmidou, 2017  
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).

Ελένη Ι. Κοσμίδου (2017)

Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση

Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2017/12

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Eleni I. Kosmidou (2017)

Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2017/12

Experimental evaluation of the behavior of wind turbine tower connections under static loading  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., που ήταν ο επιβλέπων της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Η διαρκής και υποδειγματική του καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου αυτής. Η προθυμία, το ήθος και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε τον καθιστούν πρότυπο δασκάλου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. για την ουσιαστικότερη συνεργασία που είχαμε όλο το διάστημα εκπόνησης της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας.

Σε αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Ξενοφώντα Λιγνό, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π., για την εκτέλεση των πειραμάτων, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την ενασχόλησή μου με τις πειραματικές δοκιμές. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Στέλιο Κατσατσίδα για την βοήθειά του κατά την προετοιμασία και εκτέλεση των πειραμάτων.

Για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Βαμβάτσικο, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Αικατερίνη Νταϊφώτη, Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό και Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π, καθώς και στον Ηλία Θανάσουλα, Υποψήφιο Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. για την βοήθεια και τον χρόνο που πρόθυμα μου αφιέρωσαν για την διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράστασή της σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου, δίπλα στον οποίο εξασκώ το επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού, ο οποίος μου έχει δώσει σημαντικές πρακτικές συμβουλές, γνώσεις και με έχει βοηθήσει να αποκτήσω ορθότερη σκέψη μηχανικού... και ακόμη έχει να μου διδάξει πολλά.

*Ελένη Κοσμίδου*

*Οκτώβριος 2017*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΜΕ 2017/12

## **Πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών υπό στατική φόρτιση**

**Ελένη Κοσμίδου**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Με την πάροδο του χρόνου, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί στην ανάγκη καλύτερης εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού. Για αυτό τον λόγο, το ύψος των σύγχρονων ανεμογεννητριών διαρκώς αυξάνεται, με αποτέλεσμα να εντείνονται οι επιβαλλόμενες φορτίσεις. Ο άνεμος αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση μιας ανεμογεννήτριας, που λόγω της δυναμικής φύσης των ανεμοπιέσεων και της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, οδηγεί σε ενδεχόμενη αστοχία μίας τέτοιας κατασκευής εξαιτίας της κόπωσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων, οι οποίες καταπονούνται ιδιαίτερα από τις φορτίσεις του ανέμου και εμφανίζουν φαινόμενα αστοχίας. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων αποκατάστασης της συνέχειας μεταξύ τμημάτων του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας υπό στατική φόρτιση.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αιολική ενέργεια και περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι σύνδεσης διαδοχικών τμημάτων ενός χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα, που υλοποιούνται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκολλημένων σε κάθε τμήμα του πυλώνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη του πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, καθώς και τα σχέδια των εξεταζόμενων δοκιμίων. Οι κατηγορίες των υπό εξέταση δοκιμίων είναι: δοκίμιο εσωραφής στο κέλυφος του πυλώνα, δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα, δοκίμιο εσωραφής στην τομή φλάντζας – πυλώνα με σχισμή, δοκίμιο με εξωραφή και δοκίμιο εξωραφής με προεξοχή φλάντζας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό των δοκιμίων από την πειραματική διαδικασία, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 13 πειραματικά δοκίμια, τα οποία τοποθετήθηκαν και εξετάστηκαν σε πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών στο Ε.Μ.Π. Επιπλέον, στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν 2 ομάδες κοχλιών διαφορετικής προέλευσης. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας

είναι ο προσδιορισμός της αντοχής κάθε δοκιμίου και η διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας ελάσματος, κοχλία ή συγκόλλησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης και αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνονται προτάσεις για την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς των συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών.



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

POSTGRADUATE THESIS  
EMK ME 2017/12

## **Experimental evaluation of the behavior of wind turbine tower connections under static loading**

**Eleni Kosmidou**

Supervisor: Charis Gantes, Professor N.T.U.A.  
Co-Supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD Candidate

### **ABSTRACT**

Nowadays, growing energy consumption results in an effort for better exploitation of the available wind resources. For this purpose, the height of modern wind turbines continuously increases and so do the applied loads. Wind is the prevailing load of a wind turbine. Due to the dynamic and cyclic nature of wind loads, fatigue is one of the most common cause of failure. Investigation of the connections between adjacent parts, which are being stressed by wind loads, is of particular interest. The present postgraduate thesis deals with the experimental evaluation of the behavior of wind turbine tower connections under static loading.

In the first chapter, a brief introduction to wind power and manufacturing process of steel wind turbine tower are presented. In the second chapter, typical connections between adjacent parts of tubular wind turbine towers are described. 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 third chapter is about the design of the experimental set – up. The geometry of the specimens and the testing frame used to evaluate the specimens' behavior are described in detail. The types of specimens tested are: specimen with butt weld in tower's shell, specimen with butt weld in flange – tower's shell section, specimen with butt weld and defined contact area, specimen with fillet weld and specimen with fillet weld and projection.

In the fourth chapter, photos as well as experimental results of each specimen are presented. The 13 specimens were tested in a testing frame in the Institute of Steel Structure in National Technical University of Athens. Furthermore, 2 types of bolts were used in the experiments. The experiments aim at defining the ultimate strength of each specimen and evaluating the failure of plate, bolt or weld.

In the fifth chapter, the experimental results are compared and conclusions are extracted. In the sixth and last chapter, proposals for the further investigation of the behavior of wind turbine tower connections are suggested.