

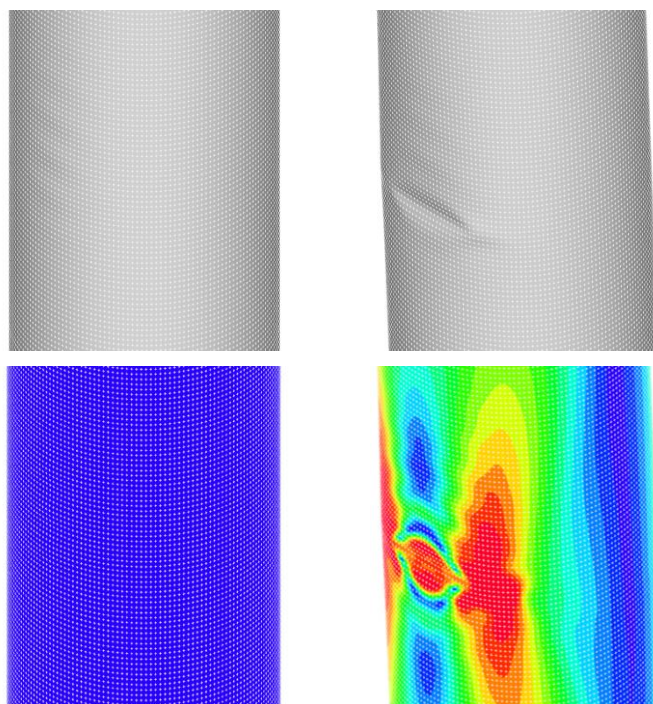


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ Ή ΚΟΛΟΥΡΟΚΩΝΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ



Διπλωματική Εργασία  
Ντόναλντ Κ. Κόρακα

ΕΜΚ ΔΕ 2018/37

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2018

Copyright © Ντόναλντ Κόρακα, 2018

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 Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Ntonalnt (Donald) Koraka, 2018

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).

Ντόναλντ Κόρακας (2018)

Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών μορφής κυλινδρικού ή κολουροκωνικού κελύφους

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2018/37

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ntonalnt (Donald) Korakas (2018)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2018/37

Design of wind turbine towers comprised of cylindrical or conical frustum shells

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

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Χάρη Γαντέ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ενασχοληθώ με το θέμα της παρούσας διπλωματικής και την ελευθερία που μου έδωσε στον τρόπο αντιμετώπισής της. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για το υλικό και την βοήθεια που μου παρείχε κατά την διάρκεια υλοποιήσεως της εργασίας, ιδίως στα τελικά της στάδια.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ηλία Θανασούλα και την Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό Κατερίνα Νταιφώτη, για την άμεση βοήθεια που μου παρείχαν επί της προσομοίωσης των συνδέσεων, όταν την χρειάστηκα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Δήμητρα Καματέρη που με βοήθησε με την γλωσσική επιμέλεια όλου του κειμένου και στον Πατέρα μου για την επιπλέον συμβολή του σε αυτήν.

Θα ήθελα να ζητήσω μία συγγνώμη σε όλους όσους έλειψα κατά τα τελικά στάδια της εργασίας και να εκφράσω τις πιο θερμές ευχαριστίες προς αυτούς, που συμπληρώνουν την ζωή μου.

Τέλος, η εργασία αυτή δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την βοήθεια που μου παρείχαν διαρκώς οι γονείς μου, τόσο σε υλικό επίπεδο (thanks for all the coffee mum), όσο και σε πνευματικό επίπεδο. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για αυτά τα πέντε χρόνια, που με υποστήριξαν με όλες τους τις δυνάμεις, ώστε να μπορώ να επικεντρωθώ στις σπουδές μου απρόσκοπτα. Η παρούσα εργασία αφιερώνεται σε σας για την συνεχή αγάπη και την στήριξη που παρέχετε ανιδιοτελώς σε μένα και την οικογένεια μας.

*Στους γονείς μου*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2018/37

## **Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών μορφής κυλινδρικού ή κολουροκωνικού κελύφους**

**Ντόναλντ Κόρακας**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Νοέμβριος 2018

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα τελευταία χρόνια η έρευνα και η μελέτη επί της λειτουργίας και του σχεδιασμού ανεμογεννητριών έχει φέρει την αιολική ενέργεια στο προσκήνιο του ενεργειακού κλάδου, καθιστώντας την μια συμφέρουσα εναλλακτική έναντι συμβατικών πηγών ενέργειας. Από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομική βιωσιμότητα των ανεμογεννητριών είναι το ύψος και το κόστος εγκατάστασης τους. Και οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τους πυλώνες των ανεμογεννητριών, κάνοντας τον σχεδιασμό τους από τα σημαντικότερα τμήματα μελέτης των ανεμογεννητριών.

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση των κυριότερων ελέγχων των συστατικών μερών των πυλώνων και των παραμέτρων που επηρεάζουν τον σχεδιασμό τους. Η εργασία επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό πυλώνων αποτελούμενων από κυλινδρικού ή κολουροκωνικού σχήματος κέλυφος και συνδέσεις φλάντζας για την αποκατάσταση συνέχειας, καθώς αποτελούν από τους πιο διαδεδομένους τύπους πυλώνων.

Αρχικώς γίνεται μια εισαγωγή στις αρχές σχεδιασμού που πρέπει να ακολουθούνται, ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα της κατασκευής, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο για την πιστοποίηση ανεμογεννητριών της εταιρείας Germanischer Lloyd. Αυτές περιλαμβάνουν τις γενικές αρχές που πρέπει να διέπουν το σχεδιασμό, τον τρόπο υπολογισμού των φορτίων και τους ελέγχους που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τα συστατικά μέρη των πυλώνων.

Για τους σκοπούς της διερεύνησης των ελέγχων χρησιμοποιήθηκε πυλώνας ανεμογεννήτριας ύψους 128.8 m, ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύς 3.8 MW. Έγινε ανάλυση των δυνατών τρόπων προσομοίωσης του πυλώνα, εντοπίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τρόπου, και εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων απλοποιήσεων, που είθισται να υιοθετούνται, στα τελικά αποτελέσματα, καθώς και ο τρόπος ελαχιστοποίησης των αποκλίσεων, εφόσον αυτές δεν ήταν δυνατόν να αμεληθούν.

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των κυριότερων ελέγχων του πυλώνα, ακολουθώντας τα πλαίσια που θέτονται από σύγχρονους κανονισμούς και πρότυπα. Δημιουργήθηκαν παραδείγματα εφαρμογής των κανονισμών και σχολιάστηκαν όσον αφορά την εφαρμογή τους σε πυλώνες ανεμογεννητριών. Έγινε σύγκριση μεταξύ των κλασικών μεθόδων ανάλυσης και ελέγχου κατασκευών και της χρήσης σύγχρονων μεθόδων ελέγχου, με αριθμητικά προσομοιώματα, εντοπίζοντας και προβάλλοντας την χρησιμότητα κάθε μεθόδου.

Τέλος, εξετάστηκε η επιρροή που έχει η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πυλώνα στην αντοχή της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος. Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα και κατευθυντήριες οδηγίες για τον βέλτιστο σχεδιασμό πυλώνων, τόσο από τεχνικής, όσο και από οικονομικής άποψης.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2018/37

## **Design of wind turbine towers comprised of cylindrical or conical frustum shells**

**Ntonalnt (Donald) Korakas**

Supervisor: Charis Gantes, Professor NTUA

November 2018

### **ABSTRACT**

In recent years the research and study of the operation principles and the design of wind turbines has brought wind energy to the forefront of the energy industry, making it a competitive alternative to conventional energy sources. Two of the most important factors that affect the economic sustainability of wind turbines are their height and their installation cost. Both of these factors are determined in large part from their tower, making the designing of the tower one of the most critical parts of the development of wind turbines.

This thesis aims to study in depth the most important design checks of the towers' components and the variables that affect their design. The thesis is focused on the design of towers comprised of cylindrical or conical frustum shells and flange connections, as they are some of the more widespread types of wind turbines.

Firstly, there is an introduction to the design principles that have to be followed in order to assure the safety of the structure, in accordance with international guidelines for the certification of wind turbines by the company Germanischer Lloyd. These include general principles that have to govern the design, load calculation principles and the design checks that have to be verified for the towers' components.

For the comprehensive study of the design checks the tower of an 128.8 m wind turbine, with 3.8 MW rated power generator, was used. Different ways of modelling the tower were analysed, finding advantages and disadvantages for each one. Simplifications that can usually be used and their effect on the final results were checked; as well as ways to minimize it, in case the deviations from the final results are too great to ignore.

An exhaustive study of the most important checks was performed, in accordance with contemporary design regulations and guidelines. Worked examples of the design regulations were produced and they were discussed with regard to their application to wind turbines. Classic analysis and verification methods were compared to modern verification processes, using numerical simulations, finding and presenting the usefulness of each method.

Lastly, the effect on the structural integrity of the structure was checked by changing the geometry and the components of the tower, taking into account the financial cost. From the above process useful conclusions were drawn and guidelines for the attainment of the optimal design from both a technical and a cost efficient standpoint were created.