

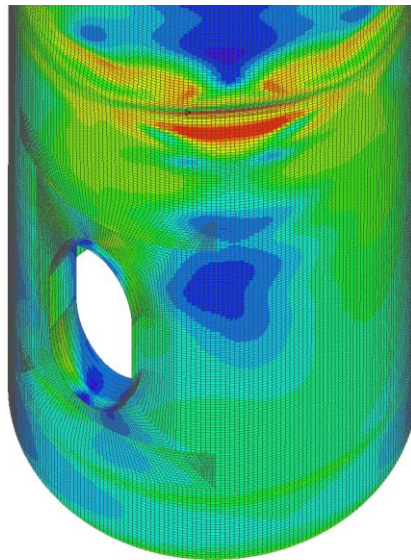


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΜΕΛΕΤΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΥΛΩΝΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης

ΕΜΚ ΔΕ 2019 11

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

Copyright © Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης, 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 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 © Kyriakos-Alexandros Chondrogiannis, 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).

Κυριάκος Αλέξανδρος Χονδρογιάννης (2019)
Μελέτη λυγισμού πυλώνων ανεμογεννητριών με χρήση μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων
στοιχείων
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019 11
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kyriakos-Alexandros Chondrogiannis (2019)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019 11
Buckling design of wind turbine towers with the use of nonlinear finite element analysis
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου Χάρη Γαντέ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο, πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο. Η συμβολή του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας ήταν καθοριστική καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης και οι συμβουλές του ήταν εξαιρετικά χρήσιμες και σαφείς δίνοντάς μου σημαντικές ιδέες και βοήθεια σε κομβικά σημεία. Εκτός από το επιστημονικό μέρος ο καθηγητής μου, μου μετέδωσε πολύτιμες δεξιότητες, που δύσκολα διδάσκονται στην τάξη, όπως η συνέπεια και η οργάνωση.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Κουλάτσου που με βοήθησε παρέχοντάς μου χρήσιμες πληροφορίες και δεδομένα για την προς έλεγχο κατασκευή, καθώς και για τις συμβουλές της σχετικά με την χρήση του λογισμικού που χρησιμοποίησα.

Για την εκπόνηση της εργασίας, καθοδήγηση μου έδωσε επίσης ο καθηγητής μου Μανόλης Παπαδρακάκης σχετικά με εξειδικευμένα θέματα επί των πεπερασμένων στοιχείων, τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερα για την συνεισφορά του.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες την οικογένειά μου, που μου παρείχε τόσο ηθική όσο και πρακτική βοήθεια σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής αλλά και όλων των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στην σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ που βοήθησαν στην επιστημονική μου κατάρτιση και επιβεβαίωσαν την αντίληψη που είχα πρωτίστως της εισαγωγής μου στην σχολή για την κορυφαία αυτή επιστήμη.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2019 11

Μελέτη λυγισμού πυλώνων ανεμογεννητριών με χρήση μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σύγχρονη εποχή, όπου οι απαιτήσεις στην ενέργεια αυξάνονται διαρκώς, παρουσιάζεται έντονο ενδιαφέρον προς την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών, με την αιολική ενέργεια να αποτελεί ένα ιδιαίτερα αναπτυσσόμενο τομέα. Καθοριστικός για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο βέλτιστος οικονομικά σχεδιασμός των ανεμογεννητριών, με τον πυλώνα αυτών να έχει την μεγαλύτερη βαρύτητα. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επιπλέον προσπάθεια αύξησης του ύψους των πυλώνων για την αξιοποίηση ισχυρότερων ανέμων που εμφανίζονται σε μεγαλύτερα υψόμετρα.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτική γεωμετρία ελέγχου χαλύβδινος πυλώνας ύψους περί τα 118m, σχήματος κυλινδρικού και κολουροκωνικού κελύφους. Πέραν της ακριβούς γεωμετρίας, παρασχέθηκαν επιπλέον δεδομένα περιβάλλουσας εντατικών μεγεθών σε συγκεκριμένες διατομές της κατασκευής, από τα οποία επιλέχθηκαν οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί.

Για την πραγματοποίηση των ελέγχων στον πυλώνα δημιουργήθηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στα οποία εφαρμόστηκαν μη γραμμικές αναλύσεις. Προκειμένου τα προσομοιώματα να είναι αποδοτικά από άποψη υπολογιστικού κόστους, διερευνήθηκε ο βέλτιστος τρόπος προσομοίωσης των συστατικών μερών της κατασκευής, χωρίς επίδραση στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τους ελέγχους έγινε σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστικών ποιτήτων, οι οποίες αναφέρονται στο ανεκτό μέγεθος αρχικών ατελειών. Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν διαγράμματα του βαθμού εκμετάλλευσης των διατομών στο ύψος του πυλώνα, για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κατηγορίες. Η αντοχή του φορέα προέκυψε από τους ελέγχους ευστάθειας με την χρήση μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού με εισαγωγή ατελειών, με την μορφή αστοχίας να καθορίζεται από την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της θεμελίωσης στην δυναμική απόκριση της κατασκευής και προσδιορίστηκαν οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται ούτως ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός της κατασκευής με τις δυναμικές και περιοδικές φορτίσεις.

Τέλος διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτιστοποίησης σχετικά με τις διατομές των φλαντζών στις θέσεις συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας, με κριτήριο την επάρκεια της αντοχής του φορέα σε λυγισμό. Η αποτελεσματικότητα των τροποποιήσεων επιβεβαιώθηκε από εφαρμογή μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, όπου διαπιστώθηκε η διατήρηση της αντοχής του φορέα. Ως εκ τούτου εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για τα περιθώρια εξοικονόμησης υλικού της κατασκευής.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2019 11

Buckling design of wind turbine towers with the use of nonlinear finite element analysis

Kyriakos-Alexandros Chondrogiannis

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

ABSTRACT

In the modern era, where energy requirements are constantly increasing, there is a strong interest in exploiting renewable sources, with one of the most growing sectors being wind power. Determining factor for the application of the method is the economically optimum design of wind turbines, in which the tower has the greatest role. In recent years an effort has been made to increase its height to take advantage of the stronger winds at higher altitudes.

In this work a representative control geometry of a steel tower of about 118m in height, shaped as a cylindrical and frusto-conical shell was used. In addition to the exact geometry, detailed data was provided regarding the internal forces in the form of an envelope, for specific sections of the structure, from which the most unfavorable combinations were selected.

For the tower checks, finite element models were created to which non-linear analyses were applied. For calculations to be effective, regarding the computational cost, the best way to simulate the components of the construction without affecting the reliability of the results was investigated. During the tests a comparison was made between different manufacturing qualities, which refer to the tolerable size of the initial imperfections. Utilization factor diagrams of the of cross sections at the height of the tower were then created for the different manufacturing categories. The capacity of the structure was derived from stability tests using geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections, while the form of failure is determined by the occurrence of local buckling. In addition, the effect of the foundation on the dynamic response of the structure was studied and the conditions to be met in order to avoid the resonance of the structure with the dynamic and periodic loads were determined.

Finally, the possibility of optimizing the flange cross sections at the connection points was investigated, based on the sufficiency of the buckling resistance. The effectiveness of the modifications was confirmed by the application of non-linear finite element analyses, where the capacity of the structure was found to be maintained. Therefore, significant conclusions were reached for the material saving margins of the construction.