



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων ανεμογεννητριών



Διπλωματική Εργασία
Νικόλαος Παπαγεωργίου
ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Στυλιανός Μ. Βερνάρδος, Υπ. Διδάκτωρ
Αθήνα, Νοέμβριος 2017

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

Copyright © Nikolaos Papageorgiou, 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).

Νικόλαος Παπαγεωργίου (2017)

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων
ανεμογεννητριών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Nikolaos Papageorgiou (2017)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Experimental and numerical investigation of innovative sandwich-type cross sections for wind turbine
towers

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

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση και η δημοσίευση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί τη λήξη μια πενταετούς φοίτησης στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτήν την προσπάθεια, αλλά και στη φοιτητική μου πορεία όλο αυτό το διάστημα, υπήρξαν άνθρωποι που με βοήθησαν είτε με τη στήριξη είτε με την καθοδήγησή τους, τους οποίους θα ήθελα και να ευχαριστήσω.

Πρωτίστως και σημαντικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χ. Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής, ο οποίος πέρα από την επιτυχημένη παράδοση των μαθημάτων του στην προπτυχιακή διδασκαλία, συντέλεσε με μέγιστη συνεισφορά στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Το κλίμα συνεργασίας που δημιούργησε, το ενδιαφέρον και η συχνή επίβλεψη του, συντέλεσαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτού του ερευνητικού θέματος που μου ανατέθηκε.

Εξίσου σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας είχε και ο συνεπιβλέπων υποψήφιος Διδάκτορας Σ. Βερνάρδος και τον ευχαριστώ για αυτό. Η συμμετοχή του στην εύρεση ικανοποιητικών πηγών σχετικά με το καινοτόμο αυτό θέμα ήταν σημαντική, όπως σημαντικές ήταν και οι οδηγίες του στη χρήση του λογισμικού Adina. Τα πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην εργασία μου, αποτελούν σημαντικό κομμάτι της διδακτορικής του διατριβής και για το λόγο αυτό η κρίση του και οι συμβουλές του σε αυτό το κομμάτι ήταν καθοριστικές.

Επίσης, με αφορμή το πειραματικό σκέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Ξενοφώντα Λιγνό, μέλος Ε.Ε.Δ.Ι.Π. του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, καθώς και το συνεργάτη του Στέλιο Κατσατσίδα, για την εξαιρετική προετοιμασία και εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.

Για τη συμμετοχής τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Π. Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής και τον κ. Ε. Μπαδογιάννη, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής.

Για τις σημαντικές οδηγίες της στη μορφοποίηση του κειμένου θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π.

Απαραίτητο είναι να ευχαριστήσω και γενικώς όλους τους καθηγητές που γνώρισα και από τους οποίους διδάχτηκα ένα κομμάτι, κάθε φορά, από το αντικείμενο και την ουσία του Πολιτικού Μηχανικού, στο διάστημα της πενταετούς προπτυχιακής μου φοίτησης.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω, ίσως λίγο περισσότερο, τους γονείς μου και την αδερφή μου για τη στήριξη και τη συμπαράστασή τους όλο αυτό το διάστημα, καθώς και τους συμφοιτητές και προπαντός φίλους μου που ήταν δίπλα μου στις εύκολες, αλλά κυρίως στις δυσχερείς καταστάσεις που αναπόφευκτα προέκυψαν στην περίοδο της φοίτησής μου.

Νικόλαος Παπαγεωργίου

Νοέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων ανεμογεννητριών

Νικόλαος Παπαγεωργίου

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Στυλιανός Μ. Βερνάρδος, Υπ. Διδάκτωρ
Νοέμβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση διατομών τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Ο νέος αυτός τύπος διατομής για πυλώνες ανεμογεννητριών εξετάζεται προς πιθανή αντικατάσταση των κλασικού τύπου αμιγώς χαλύβδινων διατομών σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η μεταφορά και ανέγερσή τους είναι οικονομικά ασύμφορη έως και απρόσιτη, ιδίως όταν πρόκειται για κατασκευή πυλώνων ύψους άνω των 100m, που απαιτούν διάμετρο διατομής βάσης τουλάχιστον 4m για αποφυγή φαινομένων λυγισμού. Το πρόβλημα συνίσταται κυρίως στις δυσπρόσιτες τοποθεσίες εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, είτε για επίγειες ανεμογεννήτριες για τις οποίες η μέγιστη διάμετρος μεταφοράς έχει όριο περί τα 4m λόγω οδικών περιορισμών, είτε για υπεράκτιες για τις οποίες τίθεται σημαντικό ζήτημα αυξημένου κόστους μεταφοράς.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ανεμογεννήτριες. Τονίζονται οι λόγοι που επιβάλλουν την ενασχόληση με την αιολική ενέργεια, ως μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, και τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εκμετάλλευσή της. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή από την εμφάνιση της πρώτης μορφής εκμετάλλευσής της μέσω των ανεμόμυλων για τοπικές χρήσεις, έως τις σημερινές ογκώδεις ανεμογεννήτριες ισχύος έως και μερικών MW, που συνδέονται στα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα. Περιγράφονται, επίσης, τα βασικά μέρη τα οποία συνθέτουν μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα περιστροφής, δίνοντας έμφαση στους πυλώνες ανεμογεννητριών του τύπου οριζοντίου άξονα. Δίνονται οι χαρακτηριστικοί τύποι πυλώνων και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται, αναλύοντας τις αμιγώς χαλύβδινες διατομές σε επίπεδο διαμόρφωσης, μεταφοράς και ανέγερσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια των διατομών τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Παρατίθενται οι λόγοι που οδήγησαν στην αναγκαιότητα της διερεύνησης αυτής της νέας διατομής και η διαφοροποίηση που μπορεί να προσφέρει έναντι του κλασικού τύπου της αμιγώς χαλύβδινης διατομής. Ακολούθως, παρουσιάζεται μια αναλυτική, αριθμητική και πειραματική σύγκριση από τη βιβλιογραφία, μεταξύ κυλινδρικών δοκιμών διατομής τύπου sandwich και αμιγώς χαλύβδινων διατομών, υπό αξονική καταπόνηση. Επιπροσθέτως, γίνεται αναφορά σε μια προκαταρκτική μεθοδολογία σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών διατομής τύπου sandwich, η οποία προτάθηκε από ερευνητική ομάδα της Σχολής

Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, καθώς και προτάσεων για κατασκευή και ανέγερση πυλώνων τέτοιου τύπου, οι οποίες συντάχθηκαν από την ίδια ερευνητική ομάδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς αυτών των διατομών τύπου sandwich, οι οποίες είχαν τσιμεντοειδές κονίαμα ως υλικό πλήρωσης του πυρήνα μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων, σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Επισημαίνονται οι γεωμετρικές διαστάσεις των δύο δοκιμίων διατομών τύπου sandwich που ελέγχθηκαν, οι οποίες προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία του 2ου κεφαλαίου, και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που επιλέχθηκαν για τα επιμέρους τμήματα της συνολικής πειραματικής διάταξης. Γίνεται αναφορά στον τρόπο κατασκευής των πειραματικών δοκιμίων και στον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών. Παρουσιάζεται η συνολική πειραματική διάταξη και διαδικασία με το πλαίσιο διάταξης, το πειραματικό δοκίμιο και το έμβολο άσκησης φορτίου. Αναλύεται η συμπεριφορά την οποία επέδειξαν τα πειραματικά δοκίμια και η εμφάνιση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού κοντά στη βάση τους. Τέλος, παρατίθενται και σχολιάζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν στις θέσεις τοποθέτησης γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μετασχηματιστών (LVDT) για έλεγχο των μετακινήσεων και στις θέσεις τοποθέτησης παραμορφωσίμετρων (strain gauges) για έλεγχο των παραμορφώσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική ανάλυση του πειράματος σε προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina. Περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα στο σύνολό του, με αναφορές στη μοντελοποίηση των επιμέρους μελών του πειραματικού δοκιμίου, στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών των μελών, στις συνθήκες στήριξης, στον τρόπο επιβολής φόρτισης, στα στοιχεία επαφής (contact elements) που προσομοίωσαν τη σχέση συνεργασίας μεταξύ του χάλυβα και του κονιάματος στη διατομή τύπου sandwich και στον αλγόριθμο της αριθμητικής επίλυσης. Παρατίθενται τα αποτελέσματα σε όρους δρόμων ισορροπίας και εξέλιξης παραμόρφωσης στις ίδιες θέσεις με αυτές που τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχοι καταγραφείς μετακινήσεων και παραμορφώσεων στα πειραματικά δοκίμια, σχολιάζονται και αξιολογούνται ως προς τη σύγκλισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά. Τέλος, δίνονται σχηματικά πληροφορίες για τη συμπεριφορά του δοκιμίου του προσομοιώματος σε τρεις χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές στη διάρκεια επιβολής της φόρτισης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνονται ορισμένες αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις με βάση το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε στο 4ο κεφάλαιο. Καταδεικνύεται η ανάγκη αυτών των αναλύσεων, ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος λειτουργίας και συμπεριφοράς των καινοτόμων διατομών τύπου sandwich, διαφορετικών ιδιοτήτων και υπό διαφορετικές συνθήκες. Παρατίθενται οι διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα γεωμετρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμίων στο προσομοίωμα αριθμητικής ανάλυσης, που αφορούν το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων, το πάχος του πυρήνα από κονίαμα, την ποιότητα του χάλυβα των ελασμάτων, την ποιότητα του κονιάματος του πυρήνα, καθώς και η αλλαγή στον τρόπο φόρτισης, ώστε να προσεγγίζει στατικά πιο ρεαλιστικές συνθήκες (αξονική καταπόνηση λόγω ιδίου βάρους, ατράκτου και πτερυγίων, τέμνουσα στο άκρο λόγω ανέμου). Πραγματοποιούνται επιπλέον ορισμένες αναλύσεις δίχως πλήρωση στο εσωτερικό του πυρήνα, ώστε να αξιολογηθεί η συνεισφορά του κονιάματος στο οριακό φορτίο και στη δυσκαμψία. Τέλος, παρουσιάζονται σε όρους δρόμων ισορροπίας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε διαφορετική αριθμητική παραμετρική ανάλυση και εξάγονται συμπεράσματα για τις παραμέτρους που διαδραματίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη φέρουσα ικανότητα του φορέα διατομής τύπου sandwich.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2017 37

Experimental and numerical investigation of innovative sandwich-type cross sections for wind turbine towers

Nikolaos Papageorgiou

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Stylianos M. Vernardos, PhD Candidate
November 2017

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the experimental and numerical investigation of innovative sandwich-type cross sections for wind turbine towers. This new type of cross section is examined as an alternative of the conventional tubular steel tower sections in cases that their transportation and construction are economically inefficient or even prohibitive —namely towers with height of over 100m, which demand tower-base diameters of over 4m, in order to avoid buckling issues. The problem is mainly caused by the usually inaccessible installation locations, either for terrestrial wind turbines for which the maximum transportable diameter is about 4m, because of road limitations, or for offshore wind turbines due to high transportation costs.

The first chapter is an introduction to wind turbines. The reasons wind energy is essential, as a renewable energy source, are noted and especially the advantages as a result of its exploitation. A chronology of wind turbines' evolution is presented, starting from wind mills which were made for local use, till today's large wind turbines that are capable of producing power in the order of some MW and are connected to the main electrical grids. The basic parts of a horizontal or vertical axis wind turbine are described, especially the tower of the horizontal axis wind turbine. The most common types of towers and the materials they are made of are given, analyzing the steps of manufacturing, transporting and erasing of steel tubular towers.

The second chapter is about the concept of the sandwich-type cross section. The reasons which led to the investigation of this innovative cross section are given, along with its difference from the classic type of tubular steel towers. Furthermore, an analytical, numerical and experimental comparison between the sandwich-type and the conventional steel cross section under axial loading is presented, found in literature. Additionally, a reference is made about a preliminary methodology for designing wind turbine towers made of such sandwich-type cross sections and suggestions for the construction of these towers, which were all developed by a research team from School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens.

In the third chapter the experimental investigation of the flexural behavior of the sandwich-type cross sections, with a cement-mortar core, is presented. The experiment took place in the Laboratory of Steel

Structures of the School of Civil Engineering, NTUA. The geometry, which was a result of the methodology described in the 2nd chapter, and the mechanical properties of the two identical, downscaled, sandwich-tower specimens, which were constructed for the bending tests, are given. A reference is made about the manufacturing process of these two specimens and the procedures for checking the mechanical properties of their materials. The implementation of the tests and the whole experimental procedure are presented, including the frame on which the specimens were placed, the cantilever set-up with the pertinent boundary conditions and the lateral quasi-static loading at the free end of the specimens. The flexural behavior and the local-buckling failure mechanism which occurred near the base of the specimen, are analyzed. Lastly, the measures obtained by extensive use of LVDT, strain gauges and optical means are presented and discussed.

In the fourth chapter the numerical investigation, comprising a simulation of the experiment and implemented with ADINA finite element software, is presented. The modelling procedure is described, involving the mechanical properties of the materials used for every part of the specimen, the boundary conditions, the type of loading applied, the contact elements simulating the interfaces between the two materials and the algorithm of the numerical solver. The numerical equilibrium paths at every LVDT and strain gauge position are presented, discussed and compared with the experimental ones, in order to evaluate the convergence between them. Lastly, information is given by contour depictions, referring to three characteristic phases of the tests.

In the fifth chapter some parametric numerical analyses, based on the model made in the fourth chapter, are carried out. The purpose of these analyses is the understanding of the way that these sandwich-type cross section towers would behave with different properties and under different conditions, beyond the ones selected in the experiment. The different geometrical and mechanical properties simulated are presented, including the variation of thickness of the inner and outer faces, the thickness of the core, the quality of steel used for the inner and outer faces, the quality of the mortar used for the core, as well as different types of loading applied, in order to statically simulate more realistic loading conditions (axial loads due to self-weight, the rotor and the nacelle, lateral quasi-static load at the free end simulating wind pressure). Some analyses are carried out without having a material inside the core of the sandwich-type cross section, in order to check the contribution of the core to the stiffness and the load capacity of the section. Lastly, the results of these parametric numerical analyses are presented in terms of equilibrium paths and comments are made on them, so as to clarify which of the parameters that were changed on these analyses, play a decisive role in the load-capacity of the structure.