



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΗΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Αναστάσιος Γ. Μαυραγάνης

ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

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

Αθήνα, Ιούλιος, 2021

Copyright © Αναστάσιος Μαυραγάνης, 2021

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 © Anastasios Mavraganis, 2021

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).

Αναστάσιος Μαυραγάνης (2021)

Αριθμητική Προσομοίωση και Παραμετρική Διερεύνηση Βάσης Πυλώνων Ανεμογεννητριών
Μορφής Τριπόδου

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Anastasios Mavraganis (2021)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

Numerical Simulation and Parametric Analysis of Tripod Base for Wind Turbine Towers

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

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ο ακαδημαϊκός κύκλος σπουδών μου ως προπτυχιακός φοιτητής στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω προσωπικά τον Καθηγητή μου Κ. Χάρη Γαντέ ο οποίος με εμπιστεύτηκε από την πρώτη στιγμή δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα το οποίο άπτεται του ενεργειακού τομέα. Η συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ήταν αναμφισβήτητα καθοριστική. Με άμεσες, σαφείς και εύστοχες διευκρινίσεις και συμβουλές με καθοδηγούσε πάντα στη σωστή πορεία εργασίας. Ήταν μία άριστη εμπειρία συνεργασίας τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο η οποία θα με συνοδεύει στο μέλλον.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Ι. Ψαρά για τις πολύτιμες συμβουλές και χρήσιμες πληροφορίες τις οποίες μοιράστηκε μαζί μου σχετικά με θέματα προσομοίωσης και χρήσης του λογισμικού που χρησιμοποίησα.

Επιπλέον θα ήθελα να μεταφέρω τις ευχαριστίες μου προς τους κυρίους Παύλο Θανόπουλο και Τάσο Αβραάμ, καθηγητές μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ τόσο για τις άριστες γνώσεις τις οποίες μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία κατέχει την μεγαλύτερη αξία στην ζωή μου, για την απεριόριστη και ανιδιοτελή υποστήριξη την οποία μου παρείχε τόσο σε υλικό όσο και σε πνευματικό επίπεδο σε όλα τα βήματα των ακαδημαϊκών μου χρόνων.

Αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στους γονείς μου Γεώργιο και Ευανθία, στην αδερφή μου Παναγιώτα, στον παππού μου Αναστάσιο και στην γιαγιά μου Παναγιώτα.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΗΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
ΜΟΡΦΗΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ**

Αναστάσιος Γ. Μαυραγάνης

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Ιούλιος 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σύγχρονη εποχή, όπου η ζήτηση ενέργειας διαρκώς μεγαλώνει, παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδίως της αιολικής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιτακτική ανάγκη για διερεύνηση διαφόρων κρίσιμων θεμάτων που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και λειτουργία των ανεμογεννητριών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την προσπάθεια να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό το μέγεθος των ανεμογεννητριών διαρκώς αυξάνεται, τόσο ως προς το ύψος του πυλώνα όσο και ως προς το μήκος των πτερυγίων τους. Αυτό έχει ως επακόλουθο την αύξηση του μεγέθους των φορτίων που καταπονούν τα δομικά μέρη των ανεμογεννητριών. Συνεπώς η μελέτη της απόκρισης των επιμέρους δομικών μελών της κατασκευής κρίνεται αναγκαία. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς και η παραμετρική διερεύνηση του τριπόδου στη βάση του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Αρχικά με την χρήση κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώθηκε ο υπό εξέταση φορέας ούτως ώστε να γίνουν οι απαραίτητες υπολογιστικές αναλύσεις. Ο φορέας αποτελείται από ένα κεντρικό κατακόρυφο στέλεχος, δύο ομάδες άνω και κάτω κεκλιμένων μελών και ένα γωνιακό μέλος σε κάθε ένα από τα τρία τμήματα του τριπόδου. Η στήριξη του φορέα επιτυγχάνεται με ζεύγη πασσάλων θεμελίωσης κάτω από κάθε γωνιακό μέλος, συνδεδεμένων μέσω κεφαλόδεσμου. Η προσομοίωση του κατακόρυφου στελέχους και των κεκλιμένων, γωνιακών μελών γίνεται με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων κοίλης κυκλικής διατομής, ενώ η προσομοίωση των πασσάλων θεμελίωσης και του κεφαλόδεσμου μέσω της χρήσης γραμμικών στοιχείων κυκλικής και ορθογωνικής διατομής αντίστοιχα. Η προσομοίωση του εδάφους έγινε με χρήση κατάλληλων ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς κατά μήκος των γραμμικών στοιχείων των πασσάλων και κεφαλόδεσμων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης του φορέα κατά την οποία έχουν αφαιρεθεί οι πάσσαλοι, οι κεφαλόδεσμοι και τα ελατήρια για την αποφυγή φαινομένων μη γραμμικότητας. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τρία βασικά σενάρια φόρτισης, στα οποία εξετάζονται οι μετατοπίσεις στην κορυφή του τριπόδου και του κεφαλόδεσμου καθώς και τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών των επιμέρους μελών, μέσω των οποίων εκτιμάται η συνολική απόκριση της κατασκευής.

Τέλος πραγματοποιείται διερεύνηση της απόκρισης της συνολικής κατασκευής μέσω της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα επιλέγονται τρεις γενικές κατηγορίες παραμετρικών αναλύσεων που σχετίζονται με την γεωμετρία των επιμέρους μελών του τριπόδου, το έδαφος θεμελίωσης και τα φορτία σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται σε συγκριτικά διαγράμματα ούτως ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS

EMK ΔΕ 2021 18

NUMERICAL SIMULATION AND PARAMETRIC ANALYSIS OF TRIPOD BASE FOR WIND TURBINE TOWERS

Anastasios G. Mavraganis

Supervisor: Professor Charis Gantes

July, 2021

ABSTRACT

In our era, when the demand for energy is constantly growing, there is a strong interest in the utilization of renewable energy sources and especially wind energy. This results in the urgent need to address various critical issues related to the design, construction and operation of wind turbines. With the development of know-how and the effort to make better use of the wind potential, the size of the wind turbines is constantly increasing, both in terms of the height of the pylon and in terms of the length of their blades. This results in an increase in the size of the loads exerted on the wind turbine components. Therefore the study of the response of the individual structural components of the construction is considered necessary. The purpose of this dissertation is to study the mechanical behavior and parametric investigation of the tripod at the base of a wind turbine tower with the help of appropriate numerical simulations.

Initially, with the use of appropriate finite element analysis software, the structure under examination was simulated in order to make the necessary computational analyses. The structure consists of a central vertical component, two groups of upper and lower inclined components and an angular component in each of the three parts of the tripod. The support of the structure is achieved by pairs of foundation piles, under each angular component, restrained by their pilecap. The simulation of the vertical stem and the inclined, angular members is done using linear finite elements of pipe cross section while the simulation of the foundation piles and the pilecap is done through the use of linear elements of circular and rectangular cross section respectively. The soil was simulated using suitable non-linear line springs along the linear elements of the piles and pilecaps. Next results of modal analysis of the structure are presented, during which the piles, pilecaps and springs have been removed to avoid non-linearity phenomena. The results of the analyzes for three basic load scenarios are then described, in which the displacements at the top of the tripod and the pilecap are examined as well as the axial, shear force and bending moment diagrams of the individual components, through which the overall response of the construction is estimated.

Finally, the response of the overall structure is tested through changing some critical parameters. In particular, three general categories of parametric analyses are selected related to the geometry of the individual components of the tripod, the soil foundation and the design loads. The results are presented in comparative diagrams so as to draw safe conclusions about the overall behavior of the construction.