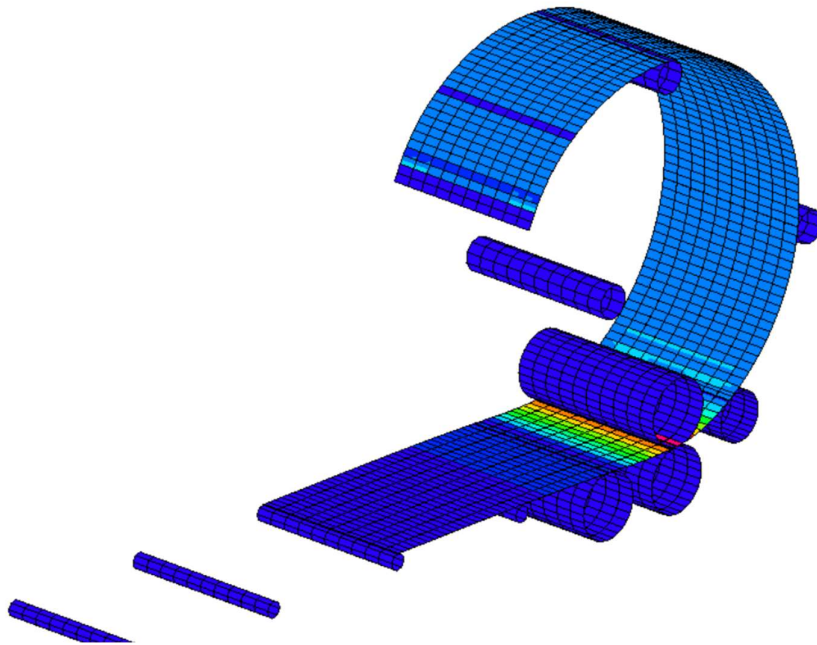




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Αριθμητική Προσομοίωση της Βιομηχανικής Διαδικασίας Καμπύλωσης Ελασμάτων για την Κατασκευή Πυλώνων Ανεμογεννητριών



Διπλωματική Εργασία
Απόστολος Τσελίκας

EMK ΔΕ 2023/24

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Copyright © Απόστολος Τσελίκας, 2023

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 © Apostolos Tselikas, 2023

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).

Τσελίκας Απόστολος 2023

Αριθμητική Προσομοίωση της Βιομηχανικής Διαδικασίας Καμπύλωσης Ελασμάτων για την Κατασκευή
Πυλώνων Ανεμογεννητριών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2023/24

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Apostolos Tselikas, 2023

Diploma Thesis ΕΜΚ ΕΜΚ ΔΕ 2023/24

Numerical Simulation of the Industrial Bending Procedure of Steel Sheets for the Production of Wind-
Turbine Columns

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

Ευχαριστίες

Κλείνοντας αυτήν την δαιδαλώδη μετάβαση από το μαθητικό στο ενήλικο-επαγγελματικό μέρος της ζωής επιβάλλεται ένας τελικός απολογισμός και η απόδοση ευχαριστιών στα άτομα, που με συνόδευσαν το καθένα με τον τρόπο του, σε αυτήν την πορεία.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον Καθηγητή κ. Γαντέ, ο οποίος με το άριστο γνωστικό του επίπεδο, την μεταδοτικότητα και την αυθεντική απλότητα του όχι μόνο αναζωπύρωσε το χαμένο γούστο μου στην ιδιότητα και το αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού, αλλά και πρότεινε και μια ιδέα κοινοτόμας διπλωματικής, η οποία με ανάγκασε να επικαλεστώ μεγάλο μέρος των δυνάμεων μου και να ξαναπιστέψω στον εαυτό μου. Με την συνεχή επίβλεψη, την πάντοτε άμεση ανταπόκριση, τον ενθαρρυντικό λόγο και τις παρατηρήσεις του καταφέραμε να παράξουμε μία λύση, που δύναται να ανταποκριθεί σε ένα μέχρι στιγμής αδιερεύνητο πρόβλημα.

Δευτερευόντως, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του φίλους εντός του Πανεπιστημίου, με τους οποίους συμπορευτήκαμε, σταθήκαμε ο ένας στον άλλο και εν τέλει ωριμάσαμε σε ενήλικες, οι οποίοι είναι έτοιμοι να αναλάβουν τα ηνία της ζωής τους και να υποστηρίξουν το τόσο σημαντικό αντικείμενο, που θα υπηρετήσουν, καθώς και τους φίλους εκτός του Πανεπιστημίου, οι οποίοι μου υπενθύμιζαν ότι υπάρχουν κι άλλα ζητήματα μείζονος σημασίας πέραν της αγωνίας για τα μαθήματα και το μετέπειτα στάδιο της επαγγελματικής καριέρας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να δώσω στην ATES Wind Towers για την συμβολή τους στην διαμόρφωση του θέματος και την παροχή χρήσιμου υλικού και στην EMEK Wind Towers και EMEK για την δυνατότητα επίσκεψης και παρακολούθησης των παραγωγικών τους μονάδων που μου δόθηκε και για την φιλοξενία τους.

Κυρίως όμως, και αυτό δεν μπορεί να τονιστεί αρκετά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τον αδελφικό μου φίλο για την άνευ κριτηρίων στήριξη τους, δίχως την οποία δεν θα μπορούσα να ξεπεράσω τις αμφιβολίες και τους προβληματισμούς, που αντιμετώπιζα όλα αυτά τα χρόνια.

*Στους γονείς μου, Ιωάννη και Ζαχαρούλα, και στον
αδερφό μου, Χαράλαμπο, που ήταν πάντα παρόντες.*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2023/24

Αριθμητική Προσομοίωση της Βιομηχανικής Διαδικασίας Καμπύλωσης Ελασμάτων για την Κατασκευή Πυλώνων Ανεμογεννητριών

Απόστολος Τσελίκας

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Οκτώβριος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διανύοντας την εποχή της «Πράσινης Επανάστασης», δηλαδή μια εποχή μετάβασης από τη χρήση υδρογονανθράκων στη χρήση περιβαλλοντικά φιλικότερων μορφών ενέργειας, καθίσταται επιτακτική η έρευνα λύσεων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της αιολικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό έχει αυξηθεί ραγδαία η κατασκευή Ανεμογεννητριών. Η παραγωγή Ανεμογεννητριών απαιτεί την κατασκευή πολύ υψηλών φορέων, οι οποίοι πρέπει να ανταποκρίνονται στις υψηλές απαιτήσεις που επιβάλλουν τα μεγάλα εντατικά μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τέτοιου είδους φαινόμενα. Οι φορείς αυτοί αποτελούνται από επιμέρους κυλινδρικά κομμάτια, που συγκολλούνται μεταξύ τους, των οποίων η φυσική γεωμετρία είναι ευθύγραμμη, και προκειμένου να αποτελέσουν μέρος ενός πυλώνα θα πρέπει να περάσουν από διάταξη καμπύλωσης, η οποία θα τους δώσει το επιθυμητό σχήμα. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και συνεπώς απαιτεί την ανάπτυξη σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων για την επίτευξη της επιθυμητής διαμέτρου. Αυτές όμως δεν εμφανίζονται ανεξάρτητες, αλλά συνοδεύονται και από παραμένουσες τάσεις, οι οποίες επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος και κατ' επέκταση την αντοχή και ευστάθεια ολόκληρου του φορέα.

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης εξετάζεται η καμπύλωση ενός ευθύγραμμου χαλύβδινου ελάσματος με ποιότητα χάλυβα S355. Περιγράφονται αναλυτικά όλα τα απαραίτητα βήματα για την κατασκευή ενός προσομοιώματος, ικανού να αναπαραστήσει πιστά τις συνθήκες της πραγματικής διαδικασίας καμπύλωσης από την χάραξη της γεωμετρίας και τη σύνθεση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, την προσομοίωση της επαφής και της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ελάσματος και των άκαμπτων κυλίνδρων, έως και την βελτιστοποίηση του μοντέλου. Η ανάλυση χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα τόσο του υλικού, όσο και της γεωμετρίας. Διεξάγονται παραμετρικές αναλύσεις για διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης του τελευταίου κυλίνδρου της διάταξης καμπύλωσης, ως και του πάχους του εξεταζόμενου ελάσματος και πραγματοποιείται παραγωγή διαγραμμάτων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της κάθε παραμέτρου. Η μεταβολή της επιβαλλόμενης μετακίνησης του τελευταίου κυλίνδρου έχει μείζονα επίδραση όσον αφορά στην παραχθείσα διάμετρο, αλλά όχι τόσο αξιοσημείωτη επιρροή στην τιμή των παραμενουσών τάσεων.



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



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2023/24

**Numerical Simulation of the Industrial Bending Procedure of Steel Sheets for the
Production of Wind-Turbine Columns**

Tselikas Apostolos

Supervisor: Professor Charis Gantes

October 2023

ABSTRACT

Going through the so called «Green Revolution», an era of transition from the use of hydrocarbons to using more environmentally friendly energy sources, finding solutions for the production of electricity from wind energy is deemed imperative. In this framework the production of wind turbines has grown radically. This new demand requires the production of very tall structures needed to sufficiently bear the big internal forces that characterize such phenomena. These structures consist of smaller cylindrical pieces, which are welded and bolted together. The natural state of these pieces is straight and in order to be part of the turbine column and acquire the desired shape, they have to pass through a roller bending machine. The described process is implemented at ambient temperature, thus significant plastic deformations are demanded to evolve so that the desired diameter can be achieved. However, plastic deformations always appear in conjunction with residual stresses, which affect the structural properties of the steel sheet, and in consequence the strength and stability of the whole structure.

Within this investigation, the curving of a straight steel sheet, steel grade S355, is examined. All the necessary steps for the formulation of a proper model, capable of representing the conditions of the real curving process, are delineated. That includes creating the geometry and the mesh of the model, correctly simulating the contact between the steel sheet and the rigid cylindrical rollers, so as to reliably express the developed interaction, and optimizing the model. This is a non-linear analysis, concerning both material and geometry, and is implemented obeying as much as possible to the demands of the real physical process. Parametric studies are conducted for various values of the lateral displacement imposed on the last cylinder of the bending machine and for different sheet thicknesses, in order to create diagrams and deduce conclusions about the effect that each parameter induces. The variation of the lateral displacement had a major effect regarding the produced diameter, but the same cannot be said about the values of the residual stresses. The parametric studies do not include changing the distance between the cylinders due to the fact that the bending machines are not subjected to change in the manufacturing factories.