



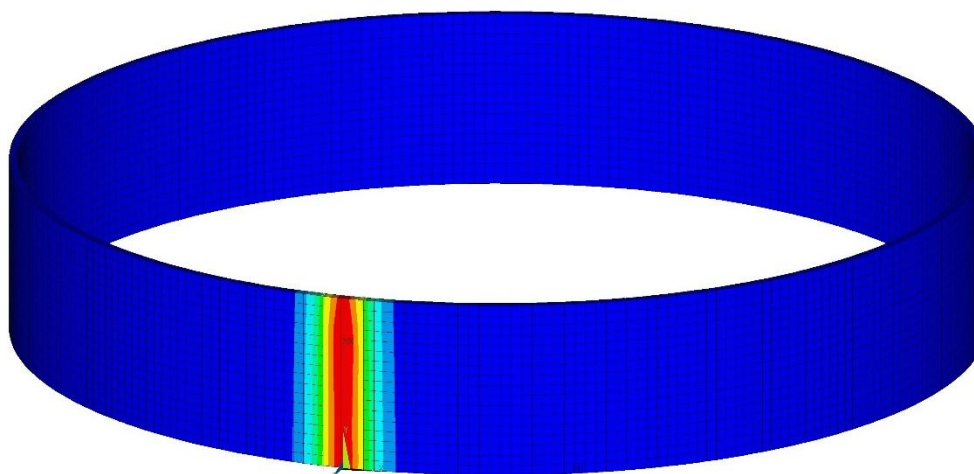
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Civil Engineering

Institute of Steel Structures



FE Simulation of Welding Distortion in Large Offshore Structures



Master Thesis

Varvara Pappa

EMK ME 2025/03

Supervisor: Prf. Charis Gantes

Co-Supervisor: Dr.-Ing Stefanos Gkatzogiannis

Athens, March 2025

Copyright © Βαρβάρα Παππά, 2025

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 της συγγραφέως. 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 την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Varvara Pappa, 2025

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).

Βαρβάρα Παππά (2025)

Αριθμητική Προσομοίωση Συγκολλήσεων με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2025/03

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Varvara Pappa (2025)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2025/03

FE Simulation of Welding Distortion in Large Offshore Structures

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

Preface

I would like to thank Prof. Charis Gantes and Dr.-Ing Stefanos Gkatzogiannis for entrusting and giving me the opportunity to work with them on this research.

I am especially grateful to my co-supervisor, Dr.-Ing. Stefanos Gkatzogiannis, for allowing me to build upon his previous work and his continued support that ensured the successful completion of this research.



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



MASTER THESIS
EMK ME 2025/03

FE Simulation of Welding Distortion in Large Offshore Structures

Varvara Pappa

Supervisor: Prf. Charis Gantes
Co-Supervisor: Dr.-Ing, Stefanos Gkatzogiannis

ABSTRACT

Welding is a critical process in the construction of offshore wind turbine towers, connecting individual sections to enable their assembly while ensuring structural integrity and sufficient strength. However, welding introduces residual stresses and distortions that can affect the structural behaviour. Standard finite element (FE) simulations, while capable of accurately modelling the mechanical behaviour of structures with residual stresses under certain conditions, come with a high computational cost, limiting their practical application in industrial design and optimization.

This study investigates computationally efficient approaches for welding simulation, focusing on offshore wind turbine towers. Two different heat source models were employed to simulate the moving heat input along the weld seam: one assuming a rectangular heat distribution for simplicity and another utilizing the Goldak heat source model to achieve more accurate results. Based on these models, a hybrid finite element approach was developed, combining solid and shell elements to strike a balance between computational efficiency and accuracy.

The methodology was initially validated on small-scale specimens and later applied to full-scale wind turbine tower sections. The small-scale specimens were modelled entirely with 3D solid finite elements, a method that has been previously validated against experimental reference data. These reference models were used to assess the accuracy of the hybrid models. The comparison between hybrid and reference models demonstrated that the hybrid approach reduces computational time while maintaining a realistic temperature distribution. The Goldak heat source model was found to provide a more precise thermal distribution, whereas the rectangular heat source overestimated peak temperatures and prolonged cooling times, making it less computationally efficient.

It is concluded that geometric simplification of the welding heat source model does not necessarily yield computational benefits. Instead, optimizing the discretization method by using a hybrid model (solid elements near the weld and shell elements elsewhere) offers a practical solution for large-scale welding simulations. This approach achieves an optimal balance between accuracy and computational efficiency, making it suitable for simulating welding in large structures. The methodology can be extended to full-scale wind turbine towers, facilitating the efficient analysis of welding-induced distortions and residual stresses.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2025/03

Αριθμητική Προσομοίωση Συγκόλλησεων με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Βαρβάρα Παππά

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής
Συνεπιβλέπων: Στέφανος Γκατζογιάννης, Δρ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκόλληση αποτελεί βασική διαδικασία στην κατασκευή πύργων ανεμογεννητριών, συνδέοντας επιμέρους τμήματα, κάνοντας έτσι εφικτή την κατασκευή τους, εξασφαλίζοντας παράλληλα την δομική ακεραιότητα και επαρκή αντοχή. Ωστόσο, εισάγει παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις που μπορούν να επηρεάσουν την δομοστατική συμπεριφορά. Οι κλασικές προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία (FE), αν και μπορούν να προσφέρουν, υπό προϋποθέσεις, μια αρκετά ακριβή προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής με παραμένουσες τάσεις, έχουν υψηλό υπολογιστικό κόστος, περιορίζοντας την πρακτική τους εφαρμογή στον βιομηχανικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση.

Η παρούσα εργασία εξετάζει μεθόδους για την μείωση του υπολογιστικού κόστους μιας προσομοίωσης συγκόλλησης, με έμφαση στους υπεράκτιους πύργους ανεμογεννητριών. Υιοθετήθηκαν στις παρούσες προσομοιώσεις δύο προσομοιώματα της θερμικής πηγής της συγκόλλησης που κινείται κατά μήκος της ραφής. Ένα με θεώρηση ορθογωνικής γεωμετρίας για χάρη απλότητας και ένα με θεώρηση πηγής Goldak για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Βάσει αυτών, αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που συνδυάζει στερεά (solid) και κελυφικά (shell) στοιχεία, με στόχο να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους.

Η μεθοδολογία επαληθεύτηκε αρχικά σε μικρής κλίμακας δοκίμια και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε τμήματα πύργων ανεμογεννητριών πραγματικής κλίμακας. Προσομοιώματα των μικρής κλίμακας δοκιμών, αποτελούμενα αποκλειστικά από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, μεθοδολογία η οποία έχει επικυρωθεί έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων αναφοράς σε προηγούμενες αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά επικύρωσης της ορθότητας των υβριδικών μοντέλων. Η σύγκριση των υβριδικών με τα προσομοιώματα αναφοράς έδειξε ότι η υβριδική προσέγγιση μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο, διατηρώντας παράλληλα ρεαλιστική κατανομή της θερμοκρασίας. Η θερμική πηγή Goldak θεωρείται πως αποδίδει την ακριβή κατανομή θερμότητας, και σε σύγκριση με αυτήν η ορθογωνική πηγή υπερεκτίμησε τις μέγιστες θερμοκρασίες και επιμήκυνε τους χρόνους ψύξης, καθιστώντας την λιγότερο αποδοτική υπολογιστικά.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι γεωμετρική απλοποίηση του προσομοιώματος της πηγής της συγκόλλησης δεν αποφέρει απαραίτητα υπολογιστικά οφέλη. Αντιθέτως, η σύγκριση των μεθόδων διακριτοποίησης της κατασκευής μακριά από την ραφή της συγκόλλησης (προσομοιώματα με πλήρως τρισδιάστατα στοιχεία - υβριδικά προσομοιώματα) μπορεί να αποτελέσει μια πρακτική λύση για προσομοιώσεις συγκόλλησης μεγάλης κλίμακας κατασκευών, επιτυγχάνοντας βέλτιστη σχέση μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικών απαιτήσεων. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί σε πραγματικού μεγέθους πύργους ανεμογεννητριών, διευκολύνοντας την αποτελεσματική ανάλυση των παραμορφώσεων συγκόλλησης και των παραμενουσών τάσεων.