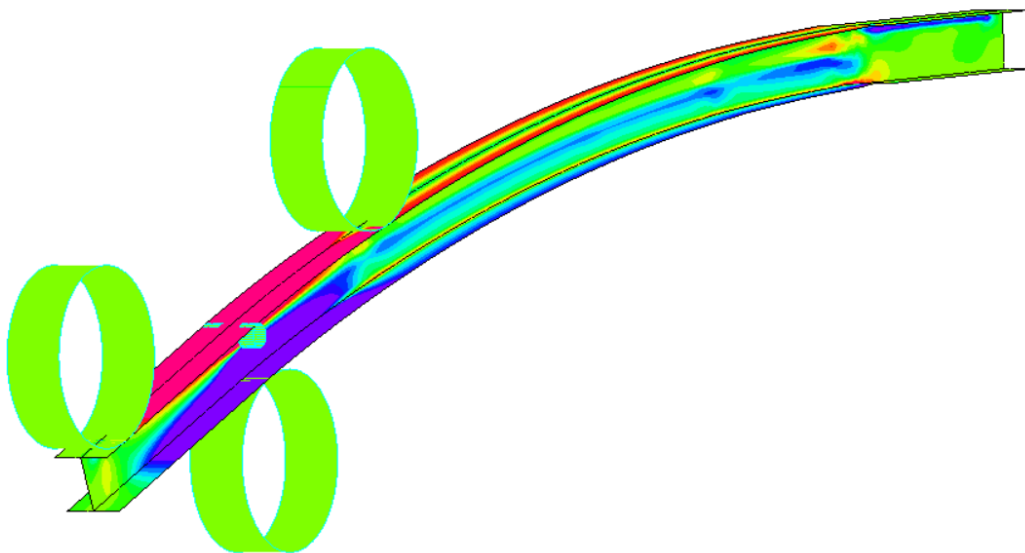




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΤΟΞΩΝ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ
ΚΑΜΠΥΛΩΣΗΣ**



Διπλωματική Εργασία
Σπυρίδων Βενέτης

ΕΜΚ ΔΕ 2018/29

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Ηλίας Θανάσουλας, Υποψήφιος Διδάκτωρ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Copyright © Σπυρίδων Βενέτης, 2018

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 © Spyridon Venetis, 2018

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).

Σπυρίδων Βενέτης (2018)
Αριθμητική Διερεύνηση Παραμενουσών Τάσεων Χαλύβδινων Τόξων Λόγω Της Διαδικασίας
Καμπύλωσης
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2018/29
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Spyridon Venetis (2018)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2018/29
Numerical Investigation of Residual Stresses in Steel Arches due to Curving Process
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Με την σύνταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται και επισήμως ένας πενταετής κύκλος της ζωής μου, κατά τη διάρκεια του οποίου φοίτησα στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Ένας κύκλος ο οποίος σηματοδότησε τη μετάβασή μου από την παιδική ηλικία σε αυτή του ενήλικα και παράλληλα από την ιδιότητα του μαθητή σε αυτήν του επαγγελματία μηχανικού. Ήταν μια περίοδος άλλοτε εξαιρετικά ευχάριστη και ανέμελη, και άλλοτε τρομερά δύσκολη και επίπονη. Κάνοντας, ωστόσο, τον τελικό απολογισμό το αποτέλεσμα έχει ξεκάθαρα θετικό πρόσημο, αφού αυτός ο κύκλος αποτέλεσε για μένα ένα μοναδικό ταξίδι στο οποίο απέκτησα πολύτιμες γνώσεις και εμπειρίες για το μέλλον. Όλα τα παραπάνω δεν θα είχαν ποτέ πραγματοποιηθεί, αν δεν γνώριζα ορισμένους ανθρώπους που, ο καθένας με τον τρόπο του, συνέβαλαν στο να ολοκληρώσω το ταξίδι αυτό και να διαμορφώσω την σημερινή μου προσωπικότητα. Αυτούς τους ανθρώπους, λοιπόν, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω μέσα σε αυτές τις λίγες γραμμές.

Πρωτίστως, θα ήθελα να εκφράσω ένα τεράστιο «ευχαριστώ» στον κ. Χάρη Γαντέ, Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, ο οποίος ανέλαβε να επιβλέπει την παρούσα εργασία και να με καθοδηγήσει καθ' όλη τη διάρκεια της κοινής μας πορείας. Το άριστο γνωστικό του υπόβαθρο, σε συνδυασμό με την μεταδοτικότητα που διαθέτει και τον ευχάριστο χαρακτήρα του, αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες μιας άκρως επιτυχημένης συνεργασίας. Μέσω της διδασκαλίας του ανακάλυψα τα πραγματικά μου ενδιαφέροντα σχετικά με το αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού και έμαθα τον τρόπο για να τα υλοποιήσω. Πέρα όμως από εξαιρετικός δάσκαλος ήτανε κι ένας πολύτιμος σύμβουλος, παρέχοντάς μου μια έμπειρη γνώμη αναφορικά με τις μελλοντικές μου επιλογές.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά και τον κ. Ηλία Θανάσουλα, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ και συνεπιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής, για τη διαρκή βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνησή της. Η συνεισφορά του ήταν ανυπολόγιστη, καθώς χωρίς τις υποδείξεις του και τη βοήθεια του σε καίρια σημεία, η εργασία δεν θα είχε το ίδιο αποτέλεσμα ή δεν θα είχε καν ολοκληρωθεί.

Ευχαριστώ, επίσης, θερμά τους κ. Τάσο Αβραάμ, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα ΕΜΠ, που με τίμησαν με την παρουσία τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας, όπως και τους κ. Βλάσιο Κουμούση, Καθηγητή ΕΜΠ και Δημήτρη Βαμβάτσικο, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, οι οποίοι με τον ιδιαίτερο τρόπο διδασκαλίας τους με έκαναν να αγαπήσω το αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού.

Φυσικά, ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω και σε όλους τους φίλους μου, παλιούς και καινούριους, οι οποίοι φρόντισαν ώστε να κυλήσουν όμορφα αυτά τα πέντε έτη σπουδών. Τόσο στους φίλους που γνώρισα εντός σχολής και συμπορευτήκαμε μαζί, παρασύροντας ο ένας τον άλλο προς το καλύτερο είτε δίνοντας κουράγιο στα δύσκολα, όσο και σε αυτούς εκτός σχολής που με βοηθούσαν να ξεφύγω από το άγχος των μαθημάτων και να αποκτήσω και άλλες εμπειρίες από τη φοιτητική μου ζωή.

Πάνω απ' όλα, το μεγαλύτερο «ευχαριστώ» το οφείλω αποκλειστικά στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και την αδερφή μου. Αν και σε δύσκολη εποχή, φρόντισαν να μην μου λείπει ποτέ τίποτα, ώστε να μπορώ απερίσπαστος να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Μου στάθηκαν σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα, παρά τις όποιες δικές τους και γι' αυτό τους αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία.

*Στους γονείς μου, Αποστόλη και Ελένη
και στην αδερφή μου, Χρύσα
που τους οφείλω τα πάντα*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2018/29

Αριθμητική Διερεύνηση Παραμενουσών Τάσεων Χαλύβδινων Τόξων Λόγω Της Διαδικασίας Καμπύλωσης

Σπυρίδων Βενέτης

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων : Ηλίας Θανάσουλας, Υποψήφιος Διδάκτωρ
Οκτώβριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς και του ιδιαίτερου αισθητικού κάλλους από άποψη αρχιτεκτονικής καθιστά τη χρήση τόξων στις κατασκευές εξαιρετικά δημοφιλή. Η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής χαλύβδινων τόξων είναι η καμπύλωση, μέσω τυμπάνων, αρχικώς ευθύγραμμων μελών, κατά την οποία τα μέλη εισέρχονται στη διάταξη πυραμίδας που σχηματίζουν τα τύμπανα και μέσω της κίνησης των τελευταίων πραγματοποιείται η καμπύλωση της γεωμετρίας των πρώτων. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, συνεπώς απαιτεί την ανάπτυξη σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων για την επίτευξη της επιθυμητής καμπυλότητας. Αυτές όμως δεν εμφανίζονται ανεξάρτητες, αλλά συνοδεύονται και από παραμένουσες τάσεις, οι οποίες επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του τόξου, και κατ' επέκταση την αντοχή και ευστάθεια ολόκληρου του φορέα. Επιπλέον, η παραμένουσα αυτή ένταση δεν είναι πάντα σταθερή, αλλά διάφοροι παράγοντες μεταβάλλουν την κατανομή και το μέγεθος τάσεων και παραμορφώσεων. Στην παρούσα, λοιπόν, εργασία επιχειρείται η αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας καμπύλωσης χαλύβδινων μελών, με σκοπό τη μελέτη των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται εξ αιτίας της, καθώς και της επίδρασης σημαντικών παραμέτρων της καμπύλωσης, όπως η ακτίνα καμπυλότητας των τόξων και η απόσταση μεταξύ των τυμπάνων της διάταξης καμπύλωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης εξετάζεται η καμπύλωση ενός μέλους διατομής HEA100, ποιότητας χάλυβα S355, περί τον ισχυρό του άξονα. 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, έως την προσομοίωση της επαφής και της αλληλεπίδρασης μεταξύ του χαλύβδινου μέλους και των άκαμπτων τυμπάνων. Η ανάλυση χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα τόσο υλικού, όσο και γεωμετρίας και εκτελείται σε δύο στάδια, ακολουθώντας την πορεία της πραγματικής διαδικασίας. Διεξάγονται παραμετρικές αναλύσεις για διάφορες τιμές της παραγόμενης ακτίνας καμπυλότητας και της απόστασης μεταξύ των τυμπάνων και πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση κάθε παραμέτρου. Καλή, ποιοτικώς, συμφωνία βρέθηκε ανάμεσα στα παραγόμενα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης και άλλων θεωρητικών, πειραματικών ή αριθμητικών μελετών, επομένως το μοντέλο θεωρήθηκε αξιόπιστο και λειτουργικό. Η μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας φάνηκε να έχει αμελητέα επίδραση, όσον αφορά

τις παραμένουσες τάσεις, στα πέλματα της διατομής και αξιοσημείωτη επιρροή στον κορμό, ενώ στις παραμένουσες παραμορφώσεις προκλήθηκε μια εύλογη μεταβολή των τιμών τους. Η παράμετρος της απόστασης των τυμπάνων έδειξε να είναι μεγαλύτερης βαρύτητας, αφού σημαντικές μεταβολές παρατηρήθηκαν με την αλλαγή της τιμής της. Ωστόσο, η συμπεριφορά που εμφανίστηκε δεν ήταν μονοσήμαντη, καθώς για τις παραμένουσες τάσεις διαφορετικές ήταν οι επιπτώσεις σε πέλματα και κορμό. Αντιθέτως, η μεταβολή των πλαστικών παραμορφώσεων είχε σταθερή κατεύθυνση σε όλα τα σημεία της διατομής.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2018/29

Numerical Investigation of Residual Stresses in Steel Arches due to Curving Process

Spyridon Venetis

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Ilias Thanasoulas, PhD Candidate
October 2018

ABSTRACT

Structural advantages combined with sensational architecture, render the use of steel arches in structures very popular. The most commonly used method for production of steel arches is roller-bending, whereat an initially straight member is fed through the system of three rollers at a pyramid arrangement, and by properly translating and rotating the rollers, the desirable curved geometry of the beam is obtained. The described process is implemented at ambient temperature, thus significant plastic deformations are demanded to evolve so that the desired curvature can be achieved. However, plastic deformations always appear in conjunction with residual stresses, which affect the structural properties of the arch, and in consequence the strength and stability of the whole structure. Furthermore, these residual stresses and strains are not constant for any curved beam, but several important factors exist that determine their ultimate distribution and magnitude. Hence, in this paper a numerical simulation of steel members curving process is presented, focusing on the developing residual stresses and strains, whose aim is to investigate the effect of significant parameters of curving process, such as the radius of curvature and the distance among rollers.

Within this investigation, the curving of a wide flange HEA100 section, steel grade S355, about its strong axis 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 from creating the geometry and the mesh of the model, to correctly simulating the contact between the beam and the rigid rollers, so as to reliably express the developed interaction. This is a non-linear analysis, both as far as it concerns the material and also regarding geometry, implemented in two distinct phases, obeying to the demands of the real physical process. Parametric studies about the curvature radius and the distance among the rollers of the bending machine are conducted and then comparison between the results of the aforementioned analyses are made to deduce conclusions about the effect that each parameter induces. Ultimately, good agreement, qualitatively speaking, amongst the emerging results of the current investigation and other analytical, experimental or numerical studies was found, hence the simulation model was deemed as reliable and functional. Variation of the curvature radius seemed to evoke a negligible and a noteworthy effect, correspondingly, on the residual stresses of the section flanges and of the web, while at the same time the residual strains showed a reasonable alteration. On the other hand, changing the distance of the rollers was of greater importance, since significant variations of the

residual values were observed. Nevertheless, the behavior of the flanges was utterly different from that observed in the web, declaring that the kind of the effect depends on the region of the section. On the contrary, plastic strains altered the same way in any part of the cross section.