



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## **ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΑ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ**



Διπλωματική Εργασία  
Αντωνία Νούσιου

ΕΜΚ ΔΕ 2016 25

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Copyright © Αντωνία Νούσιου, 2016  
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 Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Antonia Nousiou, 2016  
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).

Αντωνία Νούσιου (2016)  
Δοκοί με διάκενα στους κορμούς  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 25  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Antonia Nousiou (2016)  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 25  
Normative and numerical investigation of steel beams with circular web openings  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτή την προσπάθεια καθοριστική υπήρξε η συμβολή, η καθοδήγηση και η στήριξη ορισμένων ανθρώπων που βρέθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε τη δυνατότητα να διεκπεραιώσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψη του δείχνοντας εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου. Η συστηματική καθοδήγηση και οι ποιοτικές παρατηρήσεις του διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Θανάσουλα, υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. για την εξαιρετική βοήθεια που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας. Οι άμεσες διορθώσεις και οι πολύτιμες συμβουλές του συνέβαλαν σε καθοριστικό βαθμό στη διαμόρφωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Βάγια, Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Για το ευχάριστο κλίμα όσο καιρό δουλέψαμε στον ίδιο χώρο και τις χρήσιμες συμβουλές τους ευχαριστώ το Βασίλη Μελισσιανό και το Στέλιο Βερνάρδο, υποψήφιους Διδάκτορες του Ε.Μ.Π.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να σταθώ και στα πρόσωπα που με στηρίζουν καθόλη τη διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Βασίλη και Ζωή, την αδερφή μου, Κωνσταντίνα, και τους συμφοιτητές και φίλους μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.

*Αντωνία Νούσιου*

*Ιούλιος 2016*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2016 25

## **Κανονιστική και αριθμητική διερεύνηση χαλύβδινων δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού**

**Αντωνία Νούσιου**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την κανονιστική και αριθμητική διερεύνηση χαλύβδινων δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Η δημιουργία διακένων κορμού εισάγει νέους τρόπους αστοχίας της δοκού και αναπτύσσονται πρόσθετα βέλη κάμψης. Ο έλεγχος δοκών με διάκενα κορμού σύμφωνα με το προσχέδιο του EN1993-1-13 αποτελεί μία νέα προτεινόμενη μέθοδο για την πρόληψη ενδεχομένων αστοχιών και διερευνάται η εγκυρότητα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή στη χρήση δοκών με διάκενα κορμού και περιγράφονται οι μέθοδοι κατασκευής που χρησιμοποιούνται, ενώ παρουσιάζεται η δυνατότητα δημιουργίας δοκών με διάκενα κορμού μεταβαλλόμενου ύψους και καμπυλωμένης γεωμετρίας. Ακολούθως, παρατίθενται παραδείγματα χρήσης δοκών με διάκενα κορμού και τονίζονται τα πλεονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά δοκών με διάκενα κορμού και η προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης τους ως μία ισοδύναμη δοκός Vierendeel. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι μορφές αστοχίας των δοκών και τονίζεται η σημασία σωστού σχεδιασμού και ελέγχου για τη διαφύλαξη της ακεραιότητάς τους. Παρατίθενται γενικοί κανόνες σχεδιασμού δοκών με διάκενα κορμού και πιο αναλυτικά για κυκλικά και ορθογωνικά διάκενα. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στους λόγους που οδηγούν στην ανάγκη ενίσχυσης των διακένων και παρατίθενται βασικοί κανόνες σχεδιασμού που προέκυψαν ύστερα από μελέτες.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του προσχεδίου του EN1993-1-13 που αναφέρεται στο σχεδιασμό δοκών με διάκενα κορμού. Αρχικά γίνεται αναφορά στο πεδίο εφαρμογής των κανονισμών και στους ορισμούς που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δοκών. Ακολούθως παρατίθενται οι γεωμετρικοί περιορισμοί δοκών με διάκενα κορμού και οι κανονισμοί για την κατηγοριοποίηση των διατομών. Περιγράφεται αναλυτικά ο υπολογισμός της αντοχής δοκών με διάκενα κορμού, μεμονωμένα ή πολλαπλά, στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και ο έλεγχος στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Με βάση το παραπάνω προσχέδιο γίνεται η επίλυση ενός παραδείγματος δοκού με διάκενα κορμού και σχεδιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται αριθμητικές αναλύσεις δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού. Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνεται αριθμητικά η δοκός και διερευνάται ο κατάλληλος τύπος μη γραμμικής ανάλυσης που θα υιοθετηθεί και το μέγεθος της αρχικής ατέλειας που εισάγεται. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ως προς το οριακό φορτίο της δοκού και το συνολικό βέλος που αναπτύσσεται. Με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών της δοκού εξετάζεται η δυνατότητα ανάπτυξης της πλαστικής και ελαστικής ροπής αντοχής και διερευνάται η αποτελεσματικότητα των κανονισμών ως προς την κατηγοριοποίηση της δοκού.

Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης μέσω μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού με αρχικές ατέλειες. Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της διαμέτρου ( $h_0$ ) στην απόκριση της δοκού και συγκρίνεται με την απόκριση της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού, ενώ στο έκτο κεφάλαιο η επιρροή της απόστασης μεταξύ των κέντρων γειτονικών διακένων ( $s$ ). Σε κάθε κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει της αντίστοιχης παραμέτρου. Ακολούθως τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων. Στο τέλος του έκτου κεφαλαίου συγκρίνεται η επιρροή της διαμέτρου και της αποστάσεως των κέντρων γειτονικών διακένων μέσω του λόγου  $a$  στην απόκριση της δοκού.

Στο έβδομο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή του πάχους του κορμού στην απόκριση δοκών με διάκενα κορμού. Το πάχος του κορμού καθορίζει τη λυγηρότητά του και κατά συνέπεια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τοπική ευστάθεια της δοκού. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των κανονιστικών διατάξεων ως προς τη μεταβολή του οριακού φορτίου συναρτήσει του πάχους κορμού και τη μορφή αστοχίας.

Στο όγδοο κεφάλαιο εξετάζεται η επιρροή της θέσης επιβολής συγκεντρωμένου φορτίου σε δοκό με κυκλικά διάκενα κορμού. Οι κανονιστικές διατάξεις δεν αναφέρουν κάποιο κανόνα για τη θέση επιβολής του φορτίου και την αναμενόμενη αστοχία. Για το λόγο αυτό υιοθετείται ένας γενικός κανόνας που αναφέρεται σε ορθογωνικά διάκενα κορμού που προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα. Ακολούθως διερευνάται η επιρροή του πάχους κορμού στη μορφή αστοχίας δοκού με διάκενα κορμού που καταπονείται από συγκεντρωμένο φορτίο. Τέλος, στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της απόκρισης των δοκών με κυκλικά διάκενα κορμού.



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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2016 25

## **Normative and numerical investigation of steel beams with circular web openings**

**Antonia Nousiou**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

### **ABSTRACT**

The present diploma thesis deals with the normative and numerical investigation of steel beams with circular web openings. Existences of web openings introduce new failure modes and leads to additional deflection. In the present thesis steel beams with web openings are verified according to the working draft of EN1993-1-13 and the results are compared with those of nonlinear finite element analyses performed with software ADINA.

In the first chapter, a historical review of the use of steel beams with web openings is presented. At the same time, the pertinent construction methods are mentioned, while the feasibility of steel beams with web openings of varied height and curved geometry are described. Examples of their use are mentioned and advantages are highlighted.

In the second chapter, the structural performance of steel beams with web openings is presented and a proposed method based on an equivalent Vierendeel girder is described. Furthermore, the modes of failure are briefly described and the significance of structural design and the verification of their strength is highlighted. General guidance for designing beams with web openings provided, specifically for circular and rectangular openings. Reasons for reinforced openings and simple design rules for reinforced rectangular openings are also presented.

In the third chapter, the working draft of EN1993-1-13, "Steel beams with large web openings", is presented. The scope and definitions for the purpose of this are mentioned. Dimensional limits for designing beams with web openings and their section classification of are presented. Ultimate limit state verifications rules for isolated and closely spaced web openings and serviceability performance are also described. The verification of strength of a beam with circular web openings is examined and the equilibrium path is evaluated.

In the fourth chapter, linear buckling as well as nonlinear numerical analyses of steel beams with circular web openings are presented. The numerical modeling of the beams is described and the appropriate type of nonlinear analysis and size of initial imperfection is investigated. Then, the results of the numerical analyses are presented and compared to the results of the working draft of EN1993-1-13. The verification of plastic and elastic bending resistance is based on the bending moment distribution and section classification is examined.

In the fifth and sixth chapter, the results of an extensive parametric investigation based on nonlinear analysis are presented. In the fifth chapter, the influence of the diameter ( $h_o$ ) is investigated and compared with the structural performance of a solid beam, while in the sixth chapter the influence of centre to centre spacing of adjacent openings ( $s$ ) is investigated. In each chapter, the variation of critical and ultimate loads versus the corresponding parameter is presented. The results of the numerical analyses are compared to the results of EN1993-1-13. At the end of the sixth chapter, the influence of the diameter and the centre to centre spacing of adjacent openings based on  $\alpha$ , the ratio of centre to centre spacing of adjacent openings to diameter, is compared.

In the seventh chapter, the influence of web thickness is investigated. The thickness of web defines the web slenderness. The results of nonlinear analysis are compared to the results of the working draft.

In the eighth chapter, the influence of the distance from any part of the opening to the nearest point load is investigated. The working draft of EN1993-1-13 does not mention any general rule of the proposed distance and the probable mode of failure. For that reason, a general design rule for rectangular openings is used. The influence of web thickness in the beam mode of failure is investigated. In the ninth and final chapter, the conclusions of the diploma thesis are presented and proposals for the further investigation of steel beams with circular web openings structural strength are suggested.