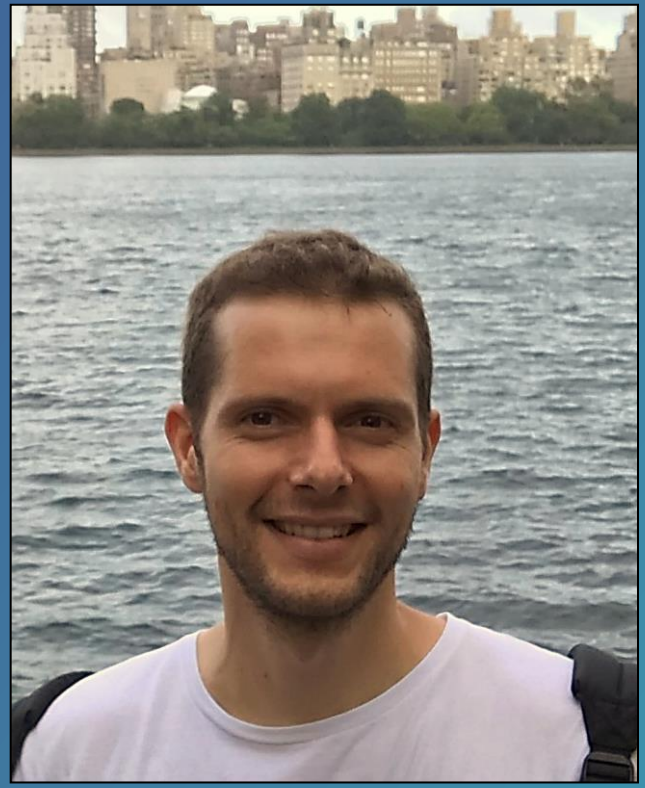




Ηλίας Δ. Θανάσουλας

Ilias D. Thanasoulas



Κριτήρια ευστάθειας χαλύβδινων τόξων κοίλης διατομής Stability criteria for hollow-section steel arches

Διδακτορική Διατριβή, 2020
Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Καθηγητής

Doctoral Thesis, 2020
Supervisor: Charis J. Gantes, Professor

Περίληψη

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η διερεύνηση της ευστάθειας χαλύβδινων τόξων κοίλης διατομής. Τα μεταλλικά τόξα κατασκευάζονται από κατεργασία ευθύγραμμων μελών με διάφορες μεθόδους. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την καμπύλωση μελών δομικού χάλυβα είναι η εν ψυχρώ διαμόρφωση με χρήση τυμπάνων. Στην περίπτωση αυτή, το ευθύγραμμο μέλος διέρχεται από κατάλληλη μηχανή καμπύλωσης, όπου η επιθυμητή καμπυλότητα επιτυγχάνεται μέσω της κάμψης τριών σημείων που προκαλεί πλαστικές παραμορφώσεις. Η εν ψυχρώ διαμόρφωση εισάγει σημαντικές παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις στα τόξα, επηρεάζοντας την μηχανική τους συμπεριφορά.

Στο πλαίσιο της διατριβής εφαρμόζεται ένας συνδυασμός πειραματικών, αριθμητικών και αναλυτικών μεθόδων έρευνας. Τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών σε χαλύβδινα τόξα, καμπυλωμένα εν ψυχρώ, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα, στοχεύοντας στην πιστοποίηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Η διαδικασία καμπύλωσης των τόξων προσομοιώνεται λεπτομερώς, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μέσω επαφής του μέλους με τα τύμπανα της μηχανής. Πραγματοποιείται μια εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τις κατανομές παραμενουσών τάσεων σε κοίλες διατομές. Κατόπιν, αποτιμάται η ευστάθεια των τόξων από χάλυβα με χρήση αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων.

Η πρωτοτυπία της διατριβής και η συμβολή της στην έρευνα και στην πράξη του μηχανικού συνοψίζονται στην παρουσίαση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων σε χαλύβδινα τόξα, στην ανάπτυξη λεπτομερών αριθμητικών προσομοιωμάτων της διαδικασίας καμπύλωσης, στη δημιουργία μοντέλων παραμενουσών τάσεων για καμπυλωμένα εν ψυχρώ μέλη κοίλης διατομής, και στη διατύπωση κατάλληλων οδηγιών σχεδιασμού υπό τη μορφή καμπυλών λυγισμού. Οι προτεινόμενες καμπύλες λυγισμού μπορούν να εφαρμοσθούν αξιόπιστα στο σχεδιασμό χαλύβδινων τόξων.

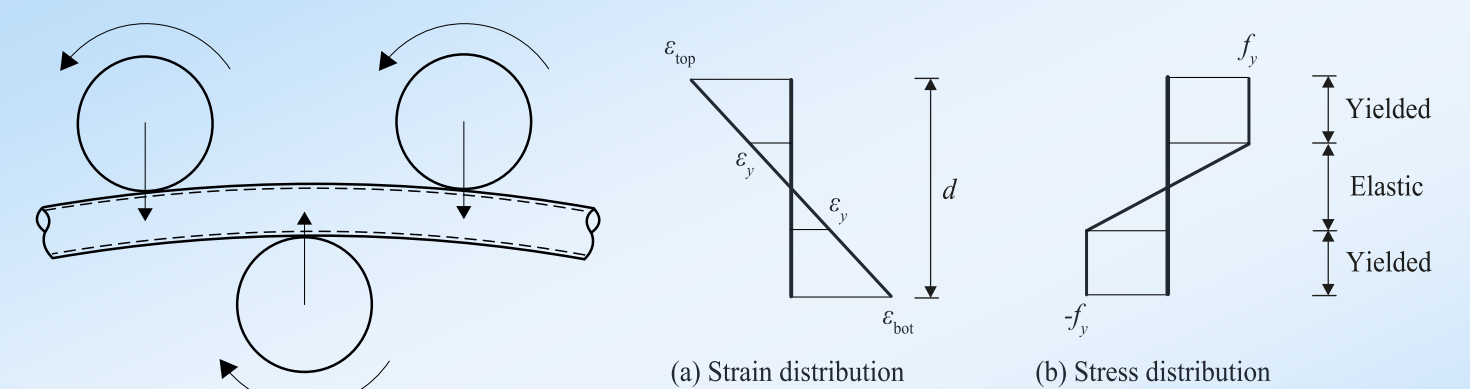
Abstract

Objective of the dissertation is to gain insight into the structural stability of steel arches comprising hollow sections. Steel arches are typically manufactured from initially straight members. The roller-bending process is the most used method for curving constructional steel members in the fabrication industry. It is a cold-forming process, in which a workpiece is passed iteratively through a three-roller-bending machine. Residual stresses along with significant plastic deformations are induced to steel members during cold-forming affecting their structural behavior. The present doctoral thesis aims at assessing the effects of residual stresses and geometric imperfections on the inelastic stability of steel arches.

A combined experimental, numerical, and analytical approach is implemented in the dissertation. A state-of-the-art experimental study is presented regarding the behavior of roller-bent arches. Detailed finite element simulations of pertinent experimental tests are carried out, aiming at validating the developed numerical models. The roller-bending process is explicitly simulated, accounting for the real contact interaction between the bending machine and the steel workpiece. Following validation of the developed numerical models, the residual stress/strain formations of roller-bent hollow sections are investigated, on the basis of comprehensive parametric studies. The stability of arches is finally assessed by means of analytical and computational methods.

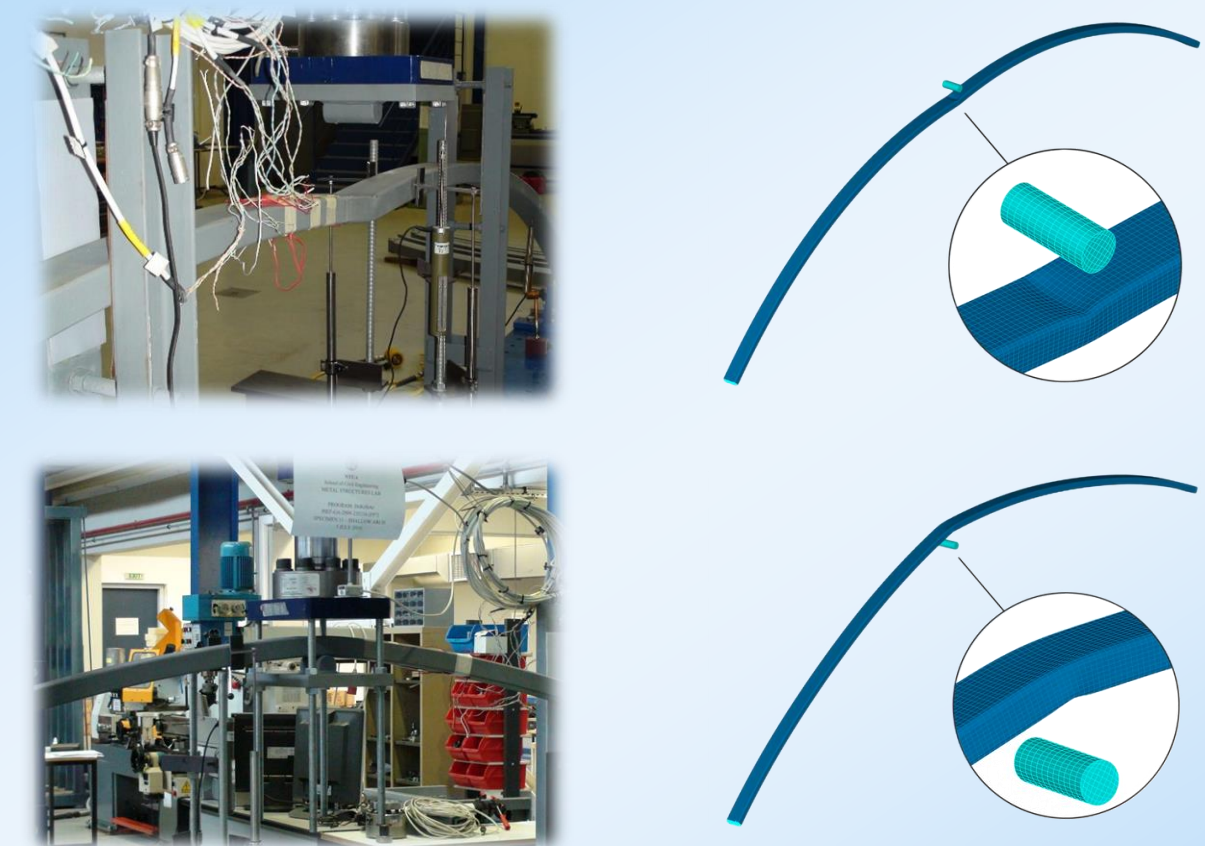
The contribution of this work to the advancement of engineering science and design practice includes, mainly among others, the presentation of experimental and numerical results on roller-bent arches, the development of sophisticated numerical models of the cold-curving process, the proposal of appropriate residual stress models for roller-bent hollow sections, and the recommendation of suitable buckling curves for hollow-section steel arches. The proposed buckling curves can be reliably implemented in the structural design practice according to modern structural design standards.

1



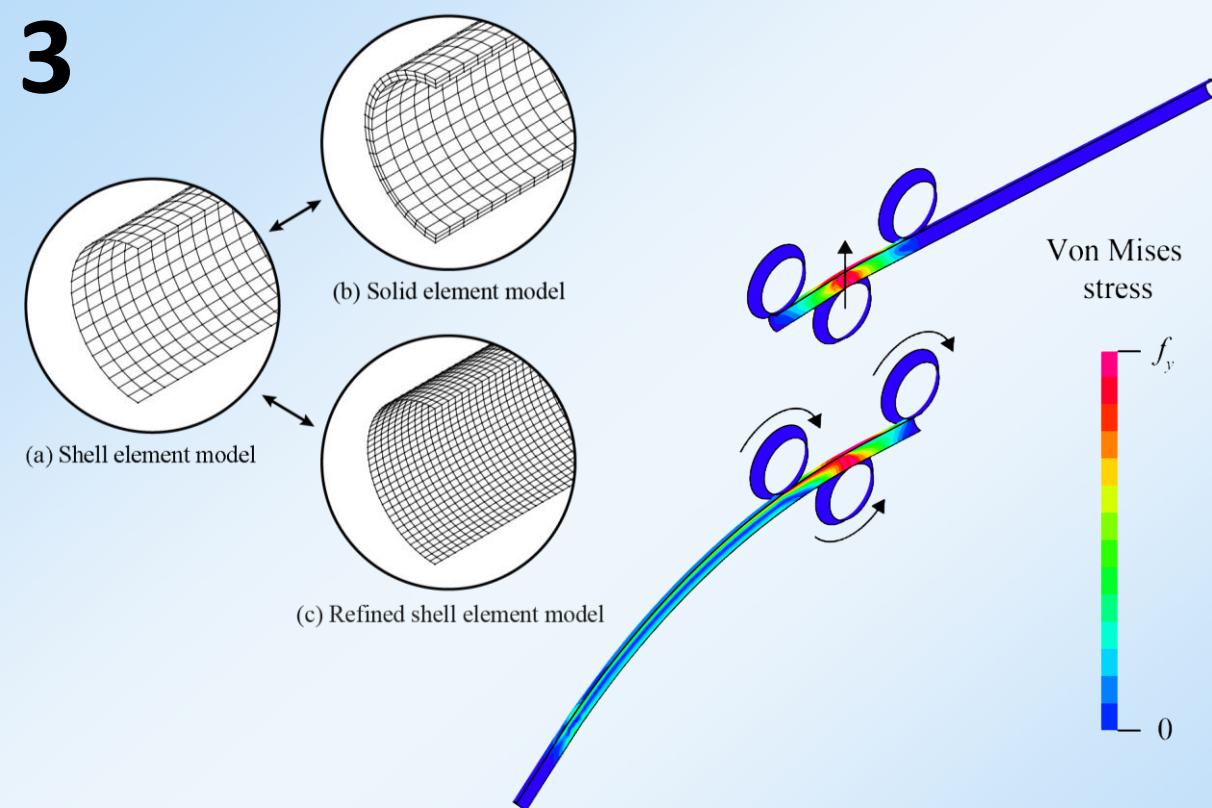
Καμπύλωση μέσω κάμψης τριών σημείων. Σχηματική απεικόνιση τάσεων και παραμορφώσεων πλαστικοποιημένης διατομής σύμφωνα με την θεωρία Euler-Bernoulli.
Curving of a beam through 3-point bending. Schematic illustration of plastic stress and strain of cross-section according to Euler-Bernoulli beam theory.

2



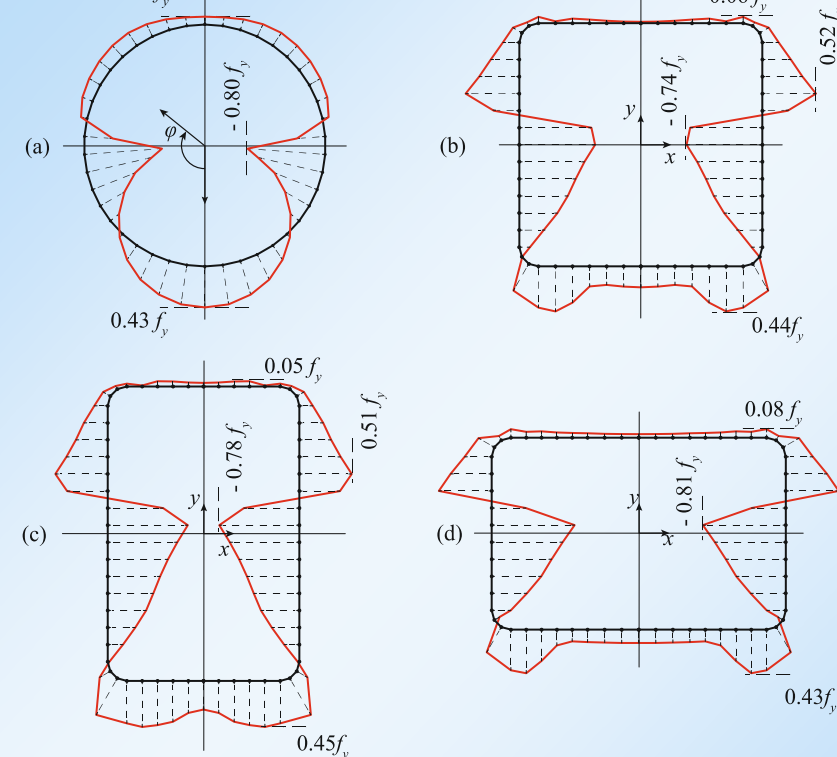
Πιστοποίηση αριθμητικών προσομοιωμάτων τόξων με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.
Validation of finite element models against experimental test data of steel arches.

3



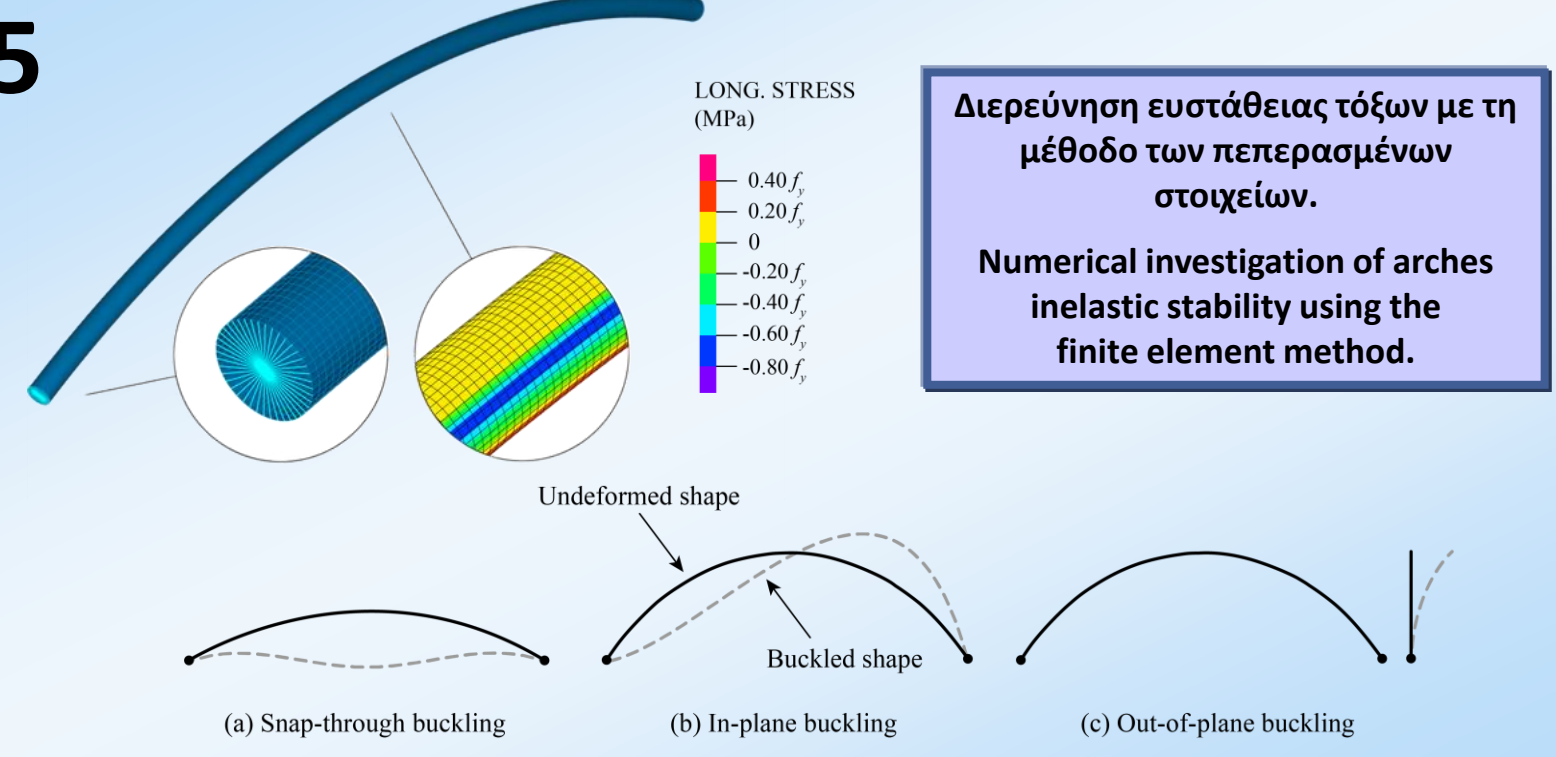
Προσομοίωση της διαδικασίας εν ψυχρώ καμπύλωσης των τόξων.
Αναλύσεις ευαισθησίας πλέγματος.
Finite element simulation of roller-bending. Mesh sensitivity analyses.

4



Προτεινόμενες κατανομές παραμενουσών τάσεων εν ψυχρώ καμπύλωσης σε κοίλες διατομές
Proposed residual stress distributions for roller-bent hollow sections.

5



Διερεύνηση ευστάθειας τόξων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
Numerical investigation of arches inelastic stability using the finite element method.

Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις Key publications

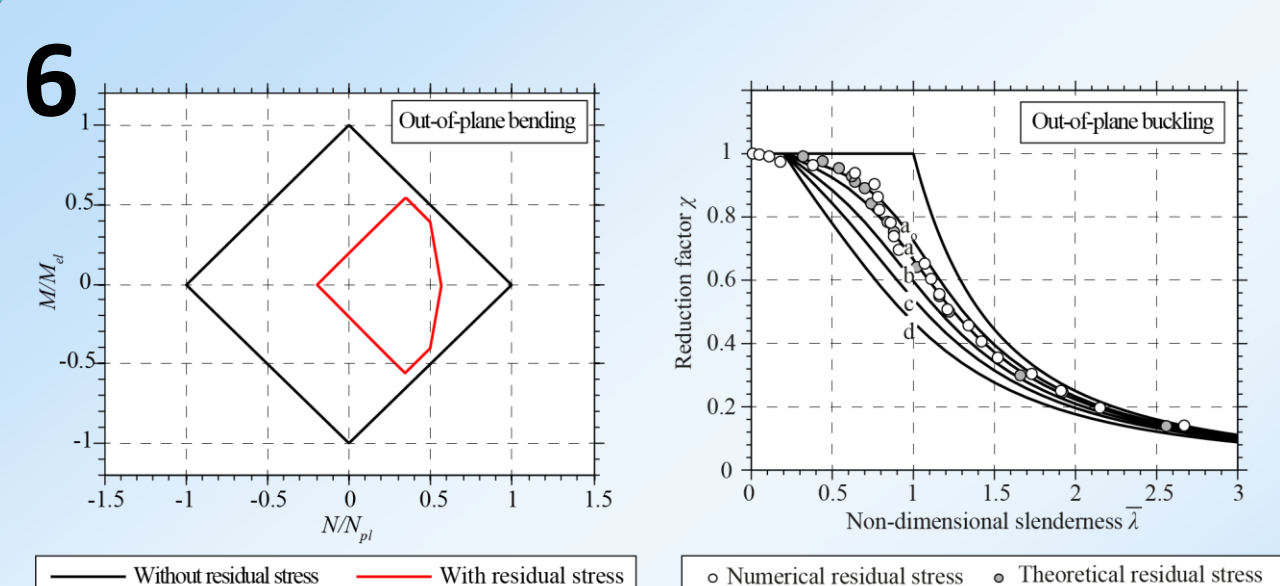
Thanasoulas, I. D., Gantes, C. J. (2021), "Stability criteria for circular-hollow-section steel arches", Journal of Constructional Steel Research, vol. 176, 106431.

Thanasoulas, I. D., Gantes, C. J. (2020), "Numerical investigation of the residual stresses of roller-bent circular-hollow-sections", Journal of Constructional Steel Research, vol. 164, 105777.

Thanasoulas, I. D., Douthe C. E., Gantes, C. J., Lignos X. A. (2018), "Influence of roller-bending on RHS steel arches: Experimental and numerical investigation", Thin-Walled Structures, vol. 131, 668-680.

Thanasoulas, I. D., Gantes, C. J., "Effects of roller-bending on curved constructional steels of rectangular-hollow-section", IASS 2018 Symposium, Boston, USA, Jul. 16-20, 2018.

6

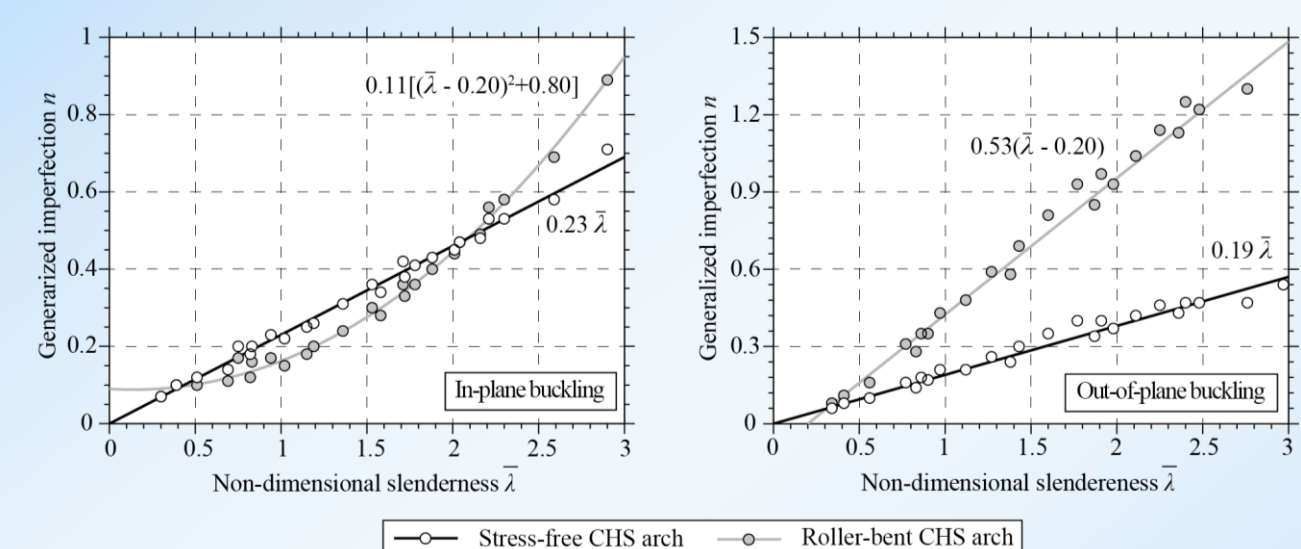


$$\frac{N}{A} + \frac{M}{I} z + \sigma_{res} \leq f_y \quad I_{eff} = \int_{A_{el}} z^2 dydz \text{ for } \sigma_{eff}(y,z) \leq f_y$$

Ενδεικτικά διαγράμματα αλληλεπίδρασης $N-M$ και ανελαστικού φορτίου λυγισμού κοίλης κυκλικής διατομής.
Indicative $N-M$ interaction diagrams and inelastic buckling loads for roller-bent circular-hollow-sections.

7

Προτεινόμενες καμπύλες λυγισμού τόξων καμπυλωμένων εν ψυχρώ.
Proposed buckling curves for roller-bent arches.



$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0, \text{ where } \phi = 0.5(1 + n + \bar{\lambda}^2)$$

Arch	In-plane buckling	Out-of-plane buckling
Stress-free	$n = 0.23\bar{\lambda} \geq 0$	$n = 0.19\bar{\lambda} \geq 0$
Roller-bent	$n = 0.11[(\bar{\lambda} - 0.20)^2 + 0.80] \geq 0$	$n = 0.53(\bar{\lambda} - 0.20) \geq 0$