

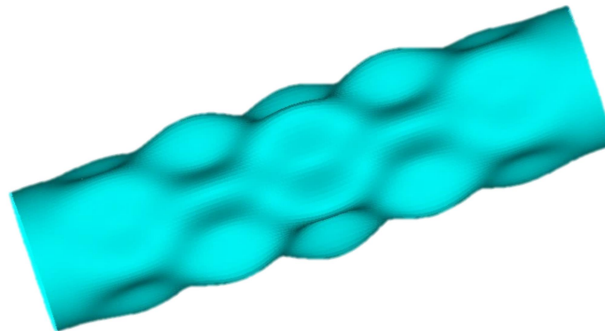


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ
ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ
ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ**



Διπλωματική Εργασία

Ευαγγελία-Νεκταρία Παλκάνογλου

ΕΜΚ ΔΕ 2016 42

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

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Copyright © Ευαγγελία-Νεκταρία Παλκάνογλου, 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 Παλκάνογλου Ευαγγελίας-Νεκταρίας. 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 συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Evangelia-Nektaria Palkanoglou, 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).

Ευαγγελία-Νεκταρία Παλκάνογλου (2016)

Συγκριτική αξιολόγηση της μεθόδου συνεχούς αντοχής και της κατάταξης σε κατηγορίες κοίλων κυκλικών μεταλλικών διατομών για τον σχεδιασμό τους έναντι τοπικού λυγισμού Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 42

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Evangelia-Nektaria Palkanoglou (2016)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 42

Comparative valuation of Continuous Strength Method and Classification of hollow circular sections in order to be suitably designed against local buckling

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

Ευχαριστίες

Ένας κύκλος κλείνει με τη συγγραφή τούτης της διπλωματικής εργασίας, καθώς σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Πρώτ' από όλα, θα ήθελα να πω στους γονείς και τον αδερφό μου ένα τεράστιο «ευχαριστώ» για τη στήριξη που μου πρόσφεραν, όχι μόνο κατά την ενασχόλησή μου με τη διπλωματική μου εργασία, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χάρη Γαντέ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Αποτέλεσε σημαντικό αρωγό της προσπάθειάς μου με τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του και ταυτόχρονα λαμπρό πρότυπο για την μελλοντική μου πορεία. Ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή Ιωάννη Ραυτογιάννη και τον καθηγητή Τάσο Αμβραάμ. Τέλος, χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ σε φίλους και γνωστούς που έδιναν κάθε φορά ένα λόγο να συνεχίσω να αγωνίζομαι.

Ευαγγελία-Νεκταρία Παλκάνογλου

Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΚ ΔΕ 2016 42

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ
ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ
ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ**

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ-ΝΕΚΤΑΡΙΑ ΠΑΛΚΑΝΟΓΛΟΥ

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η απόκριση μελών με κοίλες κυκλικές διατομές υπό αξονική θλίψη ή μονοαξονική κάμψη, καταπονήσεις που μπορούν να επιφέρουν την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στόχος είναι, μέσα από τη διερεύνηση αυτή, να ελεγχθεί η αξιοπιστία της μεθόδου συνεχούς αντοχής και συγχρόνως να πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση αυτής με τους κανονισμούς σχεδιασμού, ώστε να βρεθεί η καταλληλότερη μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι τοπικού λυγισμού.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην μεθοδολογία που ακολουθούν μέχρι σήμερα οι κανονισμοί σχεδιασμού και ειδικότερα ο Ευρωκώδικας 3, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή του τοπικού λυγισμού στην φέρουσα ικανότητα της διατομής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος της συνεχούς αντοχής. Γίνεται εκτενής αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου και ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη ή μονοαξονική κάμψη λαμβάνοντας υπόψη τον τοπικό λυγισμό.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις κοίλων κυκλικών διατομών υποβαλλόμενων σε κεντρική θλίψη. Συγχρόνως, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο με τις αναλυτικές λύσεις της μεθόδου συνεχούς αντοχής όσο και με τον Ευρωκώδικα 3 και αναφέρονται αναλυτικά σχετικά συμπεράσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο καταγράφονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων κοίλων κυκλικών διατομών υποβαλλόμενων σε μονοαξονική κάμψη. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται και πάλι με τις αναλυτικές λύσεις της μεθόδου συνεχούς αντοχής και τον Ευρωκώδικα 3, ενώ ακολουθούν και σχετικά συμπεράσματα.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα, ενώ παρουσιάζονται και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη μέθοδο συνεχούς αντοχής.



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

DIPLOMA THESIS

EMK ΔΕ 2016 42

**COMPARATIVE EVALUATION OF CONTINUOUS STRENGTH METHOD AND
CLASSIFICATION OF HOLLOW CIRCULAR SECTIONS IN SLENDERNESS CLASSES FOR
THEIR DESIGN AGAINST LOCAL BUCKLING**

EVANGELIA-NEKTARIA PALKANOGLOU

Supervisor: Professor Charis Gantes

ABSTRACT

In this diploma thesis, the response of members with hollow circular sections subjected to axial compression and uniaxial bending is investigated. These types of actions may cause the local buckling of the member. The main objective of this investigation is to test the reliability of the Continuous Strength Method, as well as, its comparative evaluation with design codes, in order to conclude with respect to the most suitable and reliable design method against local buckling.

In the first chapter, classification of sections is presented briefly. This is the method that is mainly used by design codes worldwide in order to take local buckling into account in the ultimate capacity of a section.

In the second chapter, the Continuous Strength Method is analyzed. The theoretical background of the method is extensively reported, and equations are presented for the calculation of the axial bending capacity of a section, taking local buckling into account.

In the third chapter, the presentation of results of numerical analyses of hollow circular sections, subjected to axial force, takes place. A comparison of results with both the analytical equations and Eurocode 3 follows and leads to interesting conclusions.

The fourth chapter refers to the results of numerical analyses of the hollow circular sections, subjected to uniaxial bending. Comparison of the results with the analytical equations and Eurocode 3 is presented, as well as the conclusions.

Finally, the fifth chapter includes all conclusions that were obtained from the numerical analysis for both axial compression and uniaxial bending. In the end of the chapter, proposals for further investigation concerning the Continuous Strength Method are suggested.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού	1
1.2	Σχεδιασμός διατομών έναντι τοπικού λυγισμού	2
1.2.1	Κατάταξη των διατομών	2
1.2.2	Υπολογισμός της αντοχής της διατομής, λαμβάνοντας υπόψη τον τοπικό λυγισμό	3
1.2.3	Ανακεφαλαίωση	5
2	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΙΛΕΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ	7
2.1	Γενικά	7
2.2	Ανηγμένη λυγηρότητα	7
2.3	Διαχωρισμός των διατομών	8
2.4	Ικανότητα παραμόρφωσης διατομής	10
2.5	Σχέση ανηγμένης λυγηρότητας - ικανότητας παραμόρφωσης της διατομής	11
2.6	Καταστατικός νόμος χάλυβα	12
2.6.1	Διατομές ψυχρής έλασης	14
2.6.2	Διατομές θερμής έλασης	15
2.6.3	Ανοξειδωτος χάλυβας	15
2.7	Υπολογισμός αντοχής της διατομής	15
2.7.1	Υπολογισμός αντοχής σε αξονική θλίψη	15
2.7.2	Υπολογισμός αντοχής σε μονοαξονική κάμψη	16
3	ΚΟΙΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΣΕ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	21
3.1	Γενικά	21
3.2	Αναλυτική Προσέγγιση	21
3.3	Αριθμητική Προσέγγιση	22
3.3.1	Χαρακτηριστικά των διατομών και των υλικών	22
3.3.2	Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία	24
3.3.3	Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	25
3.3.4	Υπολογισμός αρχικών ατελειών	26
3.4	Αριθμητικές Αναλύσεις	27
3.4.1	Λεπτότοιχη διατομή από χάλυβα ψυχρής έλασης	27
3.4.2	Λεπτότοιχη διατομή από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα	36
3.4.3	Μη λεπτότοιχη διατομή από χάλυβα ψυχρής έλασης	44
3.4.4	Μη λεπτότοιχη διατομή από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα	53
3.5	Συμπεράσματα	62
3.5.1	Αξιοπιστία της μεθόδου συνεχούς αντοχής	62
3.5.2	Ικανότητα παραμόρφωσης τη διατομής	65

3.5.3 Σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 3.....	66
4 ΚΟΙΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ	69
4.1 Γενικά	69
4.2 Αναλυτική Προσέγγιση	69
4.3 Αριθμητική Προσέγγιση	70
4.3.1 Χαρακτηριστικά των διατομών και των υλικών	70
4.3.2 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία	71
4.3.3 Πυκνότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.....	71
4.3.4 Υπολογισμός αρχικών ατελειών	71
4.4 Αριθμητικές Αναλύσεις	72
4.4.1 Λεπτότοιχη διατομή	72
4.4.2 Μη λεπτότοιχη διατομή	81
4.5 Συμπεράσματα	90
4.5.1 Αξιοπιστία της μεθόδου συνεχούς αντοχής	90
4.5.2 Ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής	91
4.5.3 Σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 3.....	92
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	95
5.1 Γενικά Συμπεράσματα	95
5.1.1 Κεντρική θλίψη	95
5.1.2 Μονοαξονική κάμψη.....	97
5.1.3 Ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής	98
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	99

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού

Ο τοπικός λυγισμός αποτελεί μια μορφή αστοχίας της διατομής, η οποία δεν οφείλεται στην υπέρβαση της αντοχής του υλικού, αλλά στην απώλεια της επιπεδότητας της. Αναλυτικότερα, η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων, από όποιο είδος καταπόνησης και αν προέρχονται, συνεπάγεται την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, στο σημείο της διατομής, όπου αναπτύσσεται η μέγιστη θλιπτική τάση. Η εμφάνιση του δεν επιτρέπει στη διατομή να φέρει επιπλέον φορτίο, συνεπώς οδηγεί στην μείωση της φέρουσας ικανότητάς της. Η τιμή της θλιπτικής τάσης, η οποία σηματοδοτεί την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, για την περίπτωση κοίλης κυκλικής διατομής υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{2t}{D} \quad (1.1)$$

όπου:

E: μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

ν : λόγος Poisson χάλυβα

t: πάχος κυλινδρικού κελύφους

D: διάμετρος κυλινδρικού κελύφους

Υπογραμμίζεται ότι, ως ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για την κοίλη κυκλική διατομή λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της κρίσιμης τάσης λυγισμού ενός κυλινδρικού κελύφους υποβαλλόμενο σε αξονική θλίψη

Επομένως, η εμφάνιση του τοπικού λυγισμού εξαρτάται από την τιμή του λόγου $\frac{D}{t}$, δηλαδή

αύξηση του λόγου συνεπάγεται μείωση της τιμής της κρίσιμης τάσης και αντίστροφα.

Ωστόσο, η τιμή της ελαστικής κρίσιμης τάσης λυγισμού είναι απαραίτητο να συγκριθεί με την τάση διαρροής του χάλυβα, προκειμένου να καθοριστεί εάν το τοπικός λυγισμός προηγείται η όχι της διαρροής του υλικού. Εισάγεται, επομένως, η έννοια της ανηγμένης λυγηρότητας, της οποίας η τιμή δίνεται από την σχέση:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (1.2)$$

Συνεπώς, αύξηση της τιμής της ανηγμένης λυγηρότητα, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σ_{cr} , υπογραμμίζοντας ότι σε κάποιες περιπτώσεις η τιμής δεν υπερβαίνει την τάση διαρροής, γεγονός που δηλώνει την ύπαρξη τοπικού λυγισμού στη διατομή πριν το υλικό αυτής διαρρεύσει.

Επιπλέον, από τις σχέσεις 1.1 και 1.2 προκύπτει ότι η ανηγμένη λυγηρότητα εξαρτάται από το λόγο $\frac{D}{t}$ και μάλιστα κατά τρόπο ανάλογο, δηλαδή αύξηση του λόγου συνεπάγεται και αύξηση της τιμής της $\bar{\lambda}_C$.





1.2 Σχεδιασμός διατομών έναντι τοπικού λυγισμού

Ο τοπικός λυγισμός επηρεάζει καθοριστικά την τελική τιμή της αντοχής της διατομής, συνεπώς ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί κατάλληλη μεθοδολογία, ώστε να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό.

1.2.1 Κατάταξη των διατομών

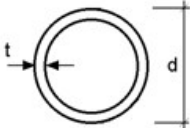
Μια διατομή, όταν υποβάλλεται σε μονοαξονική κάμψη, είναι θεωρητικά σε θέση να αναπτύξει ροπή αντοχής ίση με την πλήρη πλαστική ροπή της M_{pl} . Ωστόσο, η ύπαρξη του φαινομένου του τοπικού λυγισμού είναι αυτή που θα καθορίσει το αν θα αναπτυχθεί τελικά η πλαστική ροπή ή όχι. Επομένως, με βάση την επίδραση του τοπικού λυγισμού στην φέρουσα ικανότητα της διατομής σε κάμψη, οι διατομές χωρίζονται σε τέσσερις διακριτές κατηγορίες, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1-1).

Πίνακας 1-1: Κατηγορίες Διατομών

Κατηγορία Διατομής	Μορφή	Περιγραφή
1		Αναπτύσσουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, και παράλληλα εμφανίζουν δυνατότητα στροφής χωρίς μείωση της αντοχής
2		Αναπτύσσουν μεν την πλαστική ροπή αντοχής τους, ωστόσο η δυνατότητα στροφής τους καθίσταται περιορισμένη, εξαιτίας της εμφάνισης του τοπικού λυγισμού
3		Η τάση στην ακραία ίνα της διατομής μπορεί να λάβει την τιμή της τάσης διαρροής, ωστόσο η διατομή δεν αναπτύσσει την πλαστική ροπή αντοχής της εξαιτίας του τοπικού λυγισμού. Αναπτύσσει, επομένως μόνο την ελαστική ροπή αντοχής της
4		Ο τοπικός λυγισμός προηγείται της διαρροής, με αποτέλεσμα η διατομή να μην αναπτύσσει ούτε την ελαστική ροπή αντοχής της.

Η ένταξη στην κάθε κατηγορίας καθορίζεται από σαφή όρια του λόγου $\frac{D}{t}$, διότι όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μέσω αυτού εκφράζεται ουσιαστικά η ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής. Με άλλα λόγια ανάλογα με την τιμή της ανηγμένης λυγηρότητας της, η διατομή κατατάσσεται στην αντίστοιχη κατηγορία, επομένως, η τιμή της λυγηρότητας είναι εκείνη που τελικά θα καθορίσει την τελική της αντοχή, λαμβάνοντας υπόψη και το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού. Τα όρια κατάταξης για κοίλη κυκλική διατομή που υπόκειται σε κάμψη ή θλίψη φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-2).

Πίνακας 1-2: Όρια λόγου $\frac{D}{t}$ για κατάταξη κοίλης κυκλικής διατομής σε κατηγορίες σύμφωνα με τον EC3

Σωληνωτές διατομές						
						
Κατηγορία	Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$ ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για $d/t > 90\varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Τα όρια που ισχύουν για κάθε κατηγορία έχουν προκύψει ύστερα από την διεξαγωγή πληθώρας πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων με χρήση κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Εξαιρέση αποτελεί η ανίσωση που διαχωρίζει τις κατηγορίες 3 και 4, αφού που προέκυψε σύμφωνα με τη σχέση: $\sigma_{cr} < f_y$, καθώς διατομές που ανήκουν στην κατηγορία 3 αστοχούν σε τοπικό λυγισμό πριν το υλικό τους διαρρεύσει.

1.2.2 Υπολογισμός της αντοχής της διατομής, λαμβάνοντας υπόψη τον τοπικό λυγισμό

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η κατηγορία της διατομής είναι εκείνη που θα καθορίσει ποια θα είναι η τιμή της τελικής της αντοχής της σε μονοαξονική κάμψη. Επομένως, διατομές που κατατάσσονται στις κατηγορίες 1 και 2 εμφανίζουν ροπή αντοχής ίση με την πλήρη πλαστική ροπή τους. Ωστόσο, αξίζει να επισημανθεί ότι η διαφορά των 2 κατηγοριών έγκειται στην διαφορετική ικανότητα παραμόρφωσης που εμφανίζουν. Πιο αναλυτικά, μια διατομή κατηγορίας 1 εμφανίζει πρακτικά άπειρη δυνατότητα πλαστικής στροφής, διατηρώντας αμείωτη την αντοχή της. Αντίθετα, μια διατομή κατηγορίας 2 εμφανίζει μειωμένη δυνατότητα πλαστικής στροφής, καθώς περιορίζεται από την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού. Διατομές κατηγορίας 3 αναπτύσσουν ροπή αντοχής ίσης με την ελαστική ροπή τους. Τέλος, διατομές κατηγορίας 4 δεν αναπτύσσουν ούτε την ελαστική ροπή τους και διαστασιολογούνται σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ενεργούς διατομής, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

1.2.2.1 Διαστασιολόγηση διατομών κατηγορίας 4 – Η μέθοδος της ενεργούς διατομής

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή λαμβάνεται μια ισοδύναμη διατομή, η οποία αποτελείται από το εφελκόμενο τμήμα της διατομής και ποσοστό του θλιβόμενου και καλείται ενεργός διατομή. Το ποσοστό του θλιβόμενου τμήματος υπολογίζεται ως εξής:

- Υπολογίζεται ο λόγος $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, όπου σ_1 και σ_2 η εφελκυστική και θλιπτική τάση

αντίστοιχα που αναπτύσσεται στη διατομή με θετική τιμή αυτή της θλιπτικής τάσης

- Κατόπιν, υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής λ_c και μέσω αυτής ο συντελεστής $\rho = \frac{1 - 0.21}{\lambda_c} \cdot \frac{1}{\lambda_c}$, ο οποίος σχετίζεται με τη ποσοστό του θλιβόμενου

τμήματος που τελικά θα περιέχεται στην ενεργό διατομή.

- Υπολογίζεται το ενεργό θλιβόμενο τμήμα, μέσω της σχέσης: $b_{eff,C} = \rho \cdot b_C$, όπου

$b_{eff,C}$: μήκος ενεργού θλιβόμενου τμήματος

b_C : μήκος θλιβόμενου τμήματος

- Στη συνέχεια το ενεργό αυτό τμήμα κατανέμεται κατάλληλα, ανάλογα με την κατανομή των τάσεων, σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1-3: Κατανομή ενεργού θλιβόμενου τμήματος b_{eff}

Κατανομή τάσεων (η θλίψη θετική)		Ενεργό πλάτος b_{eff} του θλιβόμενου τμήματος του στοιχείου				
		$\psi = +1$: $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 0.5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.5 b_{eff}$				
		$+1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$				
		$0 > \psi \geq -1$: $b_{eff} = \rho b_C$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$				
		$\psi < -1$: $b_{eff} = \rho b_C$ $b_{e1} = 0.4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0.6 b_{eff}$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Συντελεστής Κύρτωσης K_σ	4.0	$\frac{8.2}{1.05 + \psi}$	7.81	$7.81 - 6.92\psi + 9.78\psi^2$	23.9	$5.98(1 - \psi)^2$
Εναλλακτικά για $1 \geq \psi \geq -1$:		$K_\sigma = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0.112(1 - \psi)^2]^{0.5} + (1 + \psi)}$				

- Τέλος, υπολογίζεται το εμβαδόν και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της ενεργούς διατομής, σύμφωνα με τα νέα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Επομένως, η αντοχής της υπολογίζεται όπως για την περίπτωση διατομής κατηγορίας κάνοντας χρήση των ενεργών γεωμετρικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών της.

1.2.3 Ανακεφαλαίωση

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η αντοχή σε θλίψη και κάμψη για όλες τις κατηγορίες.

Πίνακας 1-4: Κατηγορίες διατομών και αντοχή αυτών

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ
1	$M_{pl} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	$N_{pl} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
2	$M_{pl} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	$N_{pl} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
3	$M_{el} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	$N_{el} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
4	$M_{Rd} = \frac{W_{eff, min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	$N_{Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$

Αξίζει να σημειωθεί για την περίπτωση της κεντρικής θλίψης, οι κατηγορίες 1, 2 και 3 εμφανίζουν όμοια αντοχή, αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που οι κατηγορίες διαχωρίζονται σύμφωνα με την ροπή αντοχής τους.

2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΙΛΕΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ

2.1 Γενικά

Η CONTINUOUS STRENGTH METHOD αποτελεί μια μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής των διατομών, λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αποτελεί η συσχέτιση της αντοχής της διατομής με την ικανότητα παραμόρφωσης της, με την δεύτερη να καθορίζεται κυρίως από την ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής και την ευαισθησία της σε φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Παράλληλα, η CONTINUOUS STRENGTH METHOD υιοθετεί ένα πιο ακριβές μοντέλο για το υλικό, το οποίο εκμεταλλεύεται την κράτυνση του χάλυβα, σε αντίθεση, με τους ισχύοντες Δομικούς Κανονισμούς Σχεδιασμού, οι οποίοι βασίζονται σε ένα μοντέλο υλικού ελαστικό-απολύτως πλαστικό. Αποτέλεσμα των δυο αυτών βασικών χαρακτηριστικών της μεθόδου είναι η αντικατάσταση της ιδέας της κατηγοριοποίησης των διατομών με μια συνεχή σχέση μεταξύ της λυγηρότητας της διατομής (slenderness: $\bar{\lambda}_c$) και της ικανότητας της να παραμορφώνεται (deformation capacity), δημιουργώντας έτσι την καμπύλη βάσης (base curve)

2.2 Ανηγμένη λυγηρότητα

Η ανηγμένη λυγηρότητα ορίζεται ως:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (2-1)$$

όπου:

f_y :τάση διαρροής του χάλυβα

σ_{cr} :ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για κοίλη κυκλική διατομή που ορίζεται ως εξής:

$$\delta \epsilon \sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{2t}{D} \quad (2-2)$$

όπου:

E: μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

ν : λόγος Poisson χάλυβα

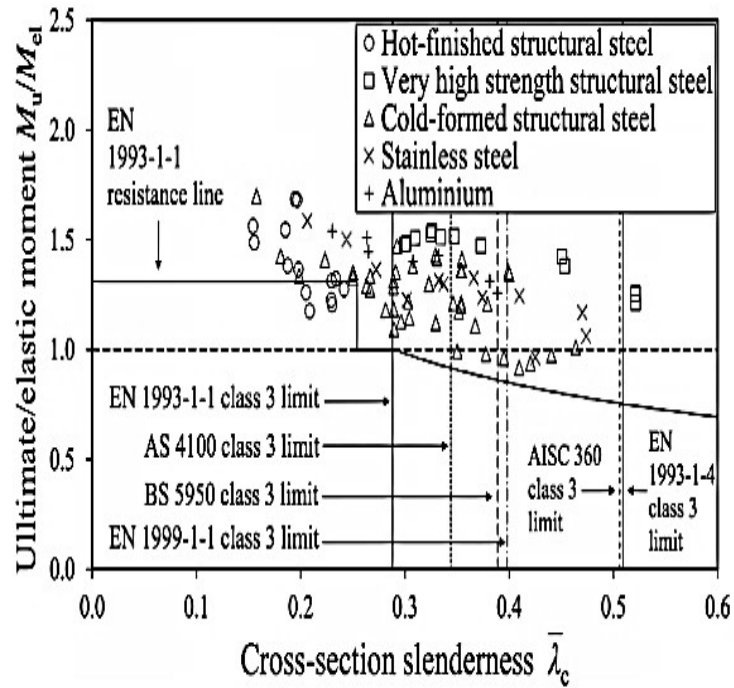
t: πάχος κυλινδρικού κελύφους

D: διάμετρος κυλινδρικού κελύφους

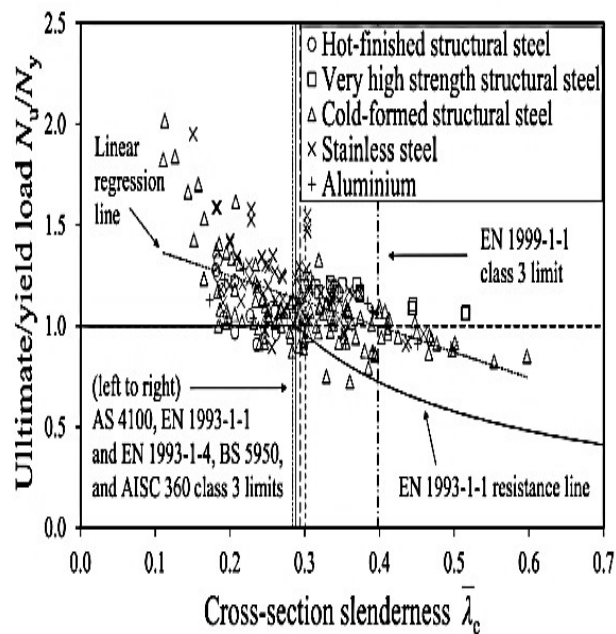
Υπογραμμίζεται ότι, ως ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για την κοίλη κυκλική διατομή λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της κρίσιμης τάσης λυγισμού ενός κυλινδρικού κελύφους υποβαλλόμενο σε αξονική θλίψη.

2.3 Διαχωρισμός των διατομών

Η μέθοδος, προκειμένου να αντικαταστήσει τις τέσσερις κατηγορίες των διατομών του Ευρωκώδικα 3, ορίζει μια οριακή τιμή της λυγηρότητας και με γνώμονα αυτή την τιμή χωρίζει τελικά τις διατομές σε δυο προφανείς κατηγορίες τις λεπτότοιχες και μη. Αναλυτικότερα, για τιμές λυγηρότητας μεγαλύτερες του ορίου αυτού, η διατομή καλείται λεπτότοιχη, δεν υπάρχει πλέον ουσιαστική εκμετάλλευση της κράτυνσης του υλικού και η διατομή αστοχεί σε τοπικό λυγισμό πριν φθάσει το φορτίο διαρροής της για αξονική θλίψη ή την ελαστική ροπή της για μονοαξονική κάμψη. Αντίθετα, μια μη λεπτότοιχη διατομή, εκμεταλλευόμενη της κράτυνσης του χάλυβα, αστοχεί από τοπικό λυγισμό σε φορτίο μεγαλύτερο από αυτό της διαρροής. Η οριακή αυτή τιμή της λυγηρότητας καθορίστηκε μέσω πειραμάτων. Πιο συγκεκριμένα, πληθώρα πειραμάτων αξονικής θλίψης και μονοαξονικής κάμψης διεξάχθηκαν σε κυλινδρικά δοκίμια και μετρήθηκε το φορτίο αντοχής τους για περίπτωση αξονικής θλίψης ή ροπή αντοχής του για περίπτωση μονοαξονικής κάμψης. Το φορτίο αντοχής ή η ροπή αντοχής, αφού αδιαστατοποιηθεί με το φορτίο διαρροής ή με την ελαστική ροπή αντίστοιχα, εισάγεται σε διάγραμμα συναρτήσει της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_C$. Τέτοια διαγράμματα φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 2-2-1: Σχέση ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_c$ - ροπής αντοχής M_{el} (Buchanan, Gardner and Liew 2015)



Εικόνα 2-2: Σχέση ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_c$ - αξονικού φορτίου αντοχής P_u (Buchanan, Gardner and Liew 2015)

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα η οριακή τιμή της λυγηρότητας είναι: $\bar{\lambda}_C = 0.3$ τόσο για κεντρική θλίψη όσο και για κάμψη. Επιπλέον, δεν χρησιμοποιείται διάκριση στα διάφορα είδη φόρτισης, όσον αφορά τον υπολογισμό της ανηγμένης λυγηρότητας, αφενός χάριν απλότητας και αφετέρου περιπλέκεται ιδιαίτερα η εκτίμηση της απόκρισης του τοπικού λυγισμού, ιδίως όταν αυτός λαμβάνει χώρα στην ανελαστική περιοχή. Τέλος, παρόμοια λογική ακολουθεί και ο Ευρωκώδικας 3, όπου εφαρμόζει κοινή λυγηρότητα τόσο για αξονική θλίψη όσο και για κάμψη.

2.4 Ικανότητα παραμόρφωσης διατομής

Η ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής εκφράζει την ικανότητα της διατομής να εκμεταλλευτεί την κράτυνση του χάλυβα και επομένως να αναπτύξει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό της διαρροής.

Ορίζεται ως:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y}, \text{ όπου:}$$

ϵ_y : η παραμόρφωση της διατομής κατά τη διαρροή και

ϵ_{csm} : η παραμόρφωση της διατομής στο φορτίο αντοχής.

Ο υπολογισμός της ϵ_{csm} σχετίζεται άμεσα με το είδος της καταπόνησης και υπολογίζεται ως εξής:

Αξονική θλίψη:

- Για $\bar{\lambda}_C \leq 0.3$, $N_U \geq N_Y$ και χάλυβες (π.χ. χάλυβες υψηλής αντοχής) των οποίων το σημείο διαρροής δεν είναι σαφές:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_{lb} - 0.002}{\epsilon_y} = \frac{\delta_U - 0.002}{L \epsilon_y} \quad (2-3)$$

- Για $\bar{\lambda}_C \geq 0.3$, $N_U \geq N_Y$ και χάλυβες (π.χ. μαλακοί χάλυβες), οι οποίοι εμφανίζουν άνω και κάτω όριο διαρροής:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_{lb}}{\epsilon_y} = \frac{\delta_U}{L \epsilon_y} \quad (2-4)$$

- Για $\bar{\lambda}_C \geq 0.3$ και $N_U \leq N_Y$:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{N_U}{N_Y} \quad (2-5)$$

Όπου: ϵ_{lb} : η ανηγμένη παραμόρφωση κατά την εμφάνιση τοπικού λυγισμού

δ_U : η βράχυνση του φορτιζόμενου άκρου όταν επιτυγχάνεται το φορτίο αντοχής N_U

L: μήκος δοκιμίου ϵ_{lb}

Να σημειωθεί ότι ο όρος 0.002 που αφαιρείται από την ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_{lb} σχετίζεται με το μοντέλο του υλικού που υιοθετήθηκε, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.

Μονοαξονική Κάμψη:

- Για $\bar{\lambda}_c \leq 0.3$, $M_u \geq M_{el}$ και χάλυβες (π.χ. χάλυβες υψηλής αντοχής) των οποίων το σημείο διαρροής δεν είναι σαφές:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_{lb}}{\epsilon_y} = \frac{k_u \cdot \gamma_{max}}{k_{el} \cdot \gamma_{max}} \quad (2-6)$$

- Για $\bar{\lambda}_c \geq 0.3$, $M_u \geq M_{el}$ και χάλυβες (π.χ. μαλακοί χάλυβες), οι οποίοι εμφανίζουν άνω και κάτω όριο διαρροής:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{\epsilon_{lb}}{\epsilon_y} = \frac{k_u \cdot \gamma_{max}}{k_{el} \cdot \gamma_{max}} \quad (2-7)$$

- Για $\bar{\lambda}_c \geq 0.3$ και $M_u \leq M_{el}$:

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{M_u}{M_{el}} \quad (2-8)$$

Όπου:

k_u : η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στην ροπή αντοχής

k_{el} : η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στην ελαστική ροπή

γ_{max} : η μέγιστη απόσταση από τον ελαστικό ουδέτερο άξονα

2.5 Σχέση ανηγμένης λυγηρότητας - ικανότητας παραμόρφωσης της διατομής

Η σχέση που συνδέει την ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_c$ και την ικανότητα της διατομής να παραμορφώνεται είναι συνεχής και προκύπτει μέσω κατάλληλης πολυωνυμικής παλινδρόμησης σε πειραματικά αποτελέσματα αξονικής θλίψης ή κάμψης. Η συνεχής αυτή σχέση καθορίζει την ανηγμένη παραμόρφωση που είναι σε θέση να αναπτύξει η διατομή πριν εκδηλωθούν φαινόμενα τοπικού λυγισμού.

Αναλυτικότερα:

- Για $\bar{\lambda}_c \leq 0.3$:

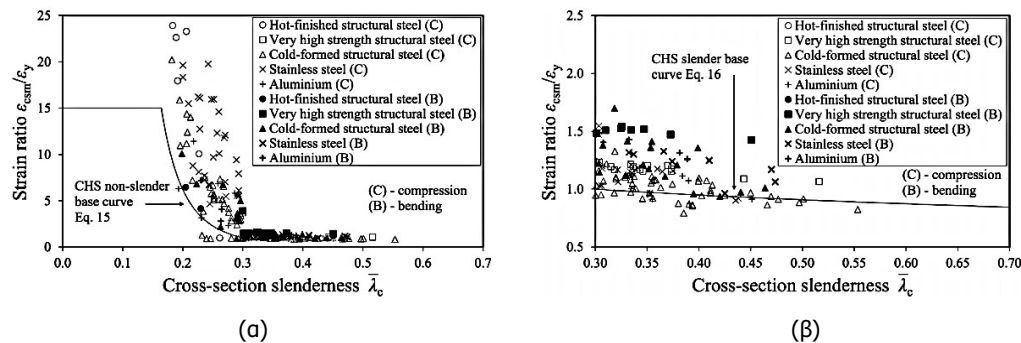
$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{4.44 \cdot 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{4.5}}, \text{αλλά:} \quad (2-9)$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right)$$

➤ Για $0.3 \leq \bar{\lambda}_c \leq 0.6$:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \left(1 - \frac{0.224}{\bar{\lambda}_c^{0.342}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_c^{0.342}} \quad (2-10)$$

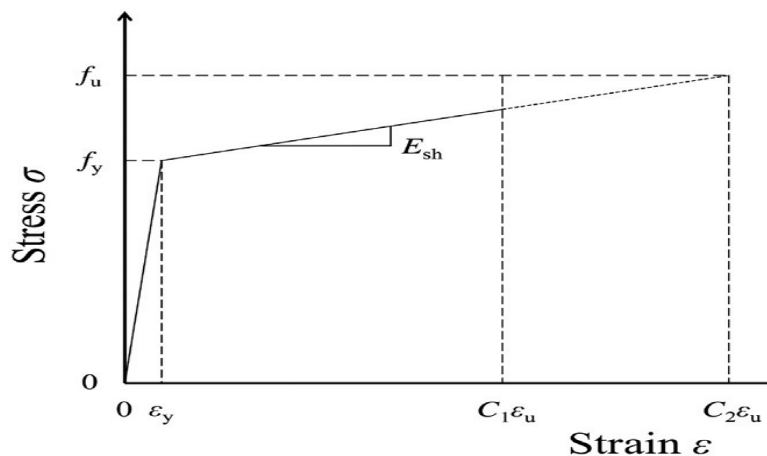
Η γραφική απεικόνιση των ανωτέρω σχέσεων ονομάζεται base curve και φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2-2-3: Base curve για (α) μη λεπτότοιχες διατομές και μη λεπτότοιχες και (β) λεπτότοιχες διατομές (Buchanan, Gardner and Liew 2015)

2.6 Καταστατικός νόμος χάλυβα

Η CONTINUOUS STRENGTH METHOD, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αντικαθιστά το ελαστικό-απολύτως πλαστικό προσομοίωμα υλικού για τον χάλυβα, το οποίο εφαρμόζεται στους Ισχύοντες Κανονισμούς Σχεδιασμού, με ένα γραμμικό ελαστικό-γραμμικά κρατυνόμο προσομοίωμα. Αναλυτικότερα, η συμπεριφορά του χάλυβα διέπεται από τον καταστατικό νόμο που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 2-2-4: Γραμμικά ελαστική- γραμμικά κρατυνόμο συμπεριφορά του χάλυβα (Buchanan, Gardner and Liew 2015)

Όπως φαίνεται στο ανωτέρω διάγραμμα τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις συνδέονται με γραμμική σχέση μέχρι την διαρροή του υλικού. Πέραν της διαρροής, όπου πλέον το υλικό εισάγεται στην πλαστική περιοχή, οι τάσεις συνδέονται και πάλι γραμμικά με τις ανηγμένες παραμορφώσεις, με την διαφορά ότι τώρα η κλίση της ευθείας είναι σαφώς μικρότερη της αρχικής. Η κεκλιμένη αυτή ευθεία περιγράφει την κράτυνση του χάλυβα, δηλαδή την δυνατότητά του να παραλάβει μεγαλύτερη τάση μετά την διαρροή. Επομένως, το γραμμικό ελαστικό- γραμμικά κρατυνόμενο προσομοίωμα για το χάλυβα διέπεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} & \text{➤ Για } \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} < 1: \\ & f = E\varepsilon \end{aligned} \tag{2-11}$$

$$\begin{aligned} & \text{➤ Για } \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \geq 1: \\ & f = f_y + E_{sh}\varepsilon_y\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} - 1\right) \end{aligned} \tag{2-12}$$

Όπου: f : η τάση που αντιστοιχεί στην ανηγμένη παραμόρφωση ε
 E_{sh} : κλίση του κρατυνόμενου κλάδου

Η κλίση του κρατυνόμενου κλάδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2\varepsilon_u - \varepsilon_y} \tag{2-13}$$

Όπου ο συντελεστής C_2 σχετίζεται με το είδος του χάλυβα και τον τρόπο δημιουργίας της διατομής, π.χ. ψυχρής ή θερμής έλασης.

Η ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης ε_u ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon_u = C_3\left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) + C_4 \tag{2-14}$$

Στον υπολογισμό της υπεισέρχονται οι συντελεστές $C_{i,j=1,2,3,4}$, οι οποίοι και πάλι σχετίζονται με το είδος του χάλυβα και τον τρόπο δημιουργίας της διατομής.

Στον Πίνακα 1 που τίθεται παρακάτω συνοψίζονται οι συντελεστές $C_{i,j=1,2,3,4}$ για τα διάφορα είδη χάλυβα, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα παρακάτω.

Πίνακας 2-1: Συντελεστές για το προσομοίωμα υλικού

	C_1	C_2	C_3	C_4
Θερμής έλασης δομικός χάλυβας	-	-	-	-
Υψηλής αντοχής δομικός χάλυβας	0.40	0.45	0.60	0
Ψυχρής έλασης δομικός χάλυβας	0.40	0.45	0.60	0
Ωστενιτικός και διφασικός ανοξείδωτος δομικός χάλυβας	0.10	0.16	1.00	0
Φερριτικός ανοξείδωτος δομικός χάλυβας	0.40	0.45	0.60	0
Αλουμίνιο	0.50	0.50	0.13	0.06

Επομένως, η τάση f_{CSM} , η οποία αντιστοιχεί σε ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_{CSM} και ουσιαστικά ταυτίζεται με την τάση κατά την αστοχία της διατομής από τοπικό λυγισμό, υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις (2-11) και (2-12), ανάλογα με την περίπτωση.

2.6.1 Διατομές ψυχρής έλασης

Η διαδικασία της ψυχρής έλασης επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού. Συγκεκριμένα, σε σύγκριση με το αρχικό υλικό, η ψυχρή έλαση αυξάνει το όριο διαρροής του υλικού, σε σχέση με την εν θερμώ κατεργασία.

Η κλίση του κρατυνόμενου κλάδου υπολογίζεται:

$$\text{➤ Για } \frac{\epsilon_y}{\epsilon_u} < 0.45:$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.45\epsilon_u - \epsilon_y} \quad (2-15)$$

$$\text{➤ Για } \frac{\epsilon_y}{\epsilon_u} > 0.45:$$

$$E_{sh} = 0$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για $\frac{\epsilon_y}{\epsilon_u} > 0.45$ το διάγραμμα τάσεων- ανηγμένων παραμορφώσεων

εμφανίζει σχεδόν οριζόντιο κλάδο για μεγάλες τιμές ανηγμένων παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να γίνεται εκμετάλλευση της ολκιμότητας του υλικού (της ιδιότητάς του να εμφανίζει μεγάλη παραμόρφωση διατηρώντας πρακτικά σταθερή την αντοχή του) και όχι της κράτυνσής του.

Η ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_u υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\epsilon_u = 0.6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) \quad (2-16)$$

2.6.2 Διατομές θερμής έλασης

Για την εν θερμώ κατεργασία του χάλυβα η κράτυνση δεν λαμβάνεται υπόψη. Ισχύει επομένως το μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενο διάγραμμα τάσεων- ανηγμένων παραμορφώσεων του υλικού, δηλαδή το ελαστικό-απολύτως πλαστικό. Η κράτυνση αμελείται τους χάλυβες που έχουν υποστεί εν θερμώ κατεργασία, διότι τέτοιου είδους χάλυβες εμφανίζουν μεγάλη ολκιμότητα, δηλαδή σχεδόν οριζόντιο κλάδο για μεγάλες τιμές ανηγμένων παραμορφώσεων. Προτιμάται, επομένως, η εκμετάλλευση της ολκιμότητάς τους (της ικανότητας τους δηλαδή να εμφανίζουν μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να χάνουν πρακτικά την αντοχής τους) και όχι της κράτυνσης τους.

Συνοψίζοντας: $E_{sh} = 0$ για διατομές θερμής έλασης. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι το προσομοίωμα για εν θερμώ επεξεργασμένους χάλυβες είναι υπό εξέλιξη, καθώς είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η κράτυνση στη συμπεριφορά τους.

2.6.3 Ανοξειδωτος χάλυβας

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες, σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες, παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε θραύση. Αν και παρατηρείται χαμηλότερη αντοχή σε διαρροή, οι ανοξειδωτοι χάλυβες εμφανίζουν μεγάλη τιμή κράτυνσης σε σχέση με του κοινούς χάλυβες. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορα είδη ανάλογα με τις αναλογίες των στοιχείων που περιέχουν και την κρυσταλλική τους δομή, ωστόσο η CONTINUOUS STRENGTH METHOD υιοθετεί κοινό προσομοίωμα για ωστενιτικούς και διφασικούς ανοξειδωτους χάλυβες.

Η κλίση του κρατυνόμενου κλάδου υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.16\epsilon_u - \epsilon_y} \quad (2-17)$$

Ενώ η ανηγμένη παραμόρφωση κατά την θραύση μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\epsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad (2-18)$$

Τέλος, εάν η τάση θραύσης, εφόσον δεν δίνεται, μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια μέσω της σχέσης:

$$f_u = \frac{f_y}{0.2 + 185 \frac{f_y}{E}} \quad (2-19)$$

2.7 Υπολογισμός αντοχής της διατομής

2.7.1 Υπολογισμός αντοχής σε αξονική θλίψη

Ανάλογα με την τιμή της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_c$, δηλαδή ανάλογα αν οι διατομή είναι λεπτότοιχη ή μη, η αντοχή της σε θλίψη υπολογίζεται κατά περίπτωση από τις παρακάτω σχέσεις:

- Για $\bar{\lambda}_c < 0.3$:

$$N_{csm} = A f_{csm} \quad (2-20)$$

- Για $0.3 < \bar{\lambda}_c < 0.6$:

$$N_{csm} = \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} Af_y \quad (2-21)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, για μια μη λεπτότοιχη διατομή, λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα προσομοιώματα υλικού που αναφέρθηκαν, η τάση f_{csm} θα έχει σίγουρα μεγαλύτερη τιμή από την τάση διαρροής f_y , λόγω της κράτυνσης του χάλυβα. Επομένως, η αντοχή της διατομής σε αξονική θλίψη θα προκύψει σίγουρα μεγαλύτερη από την $N_{pl} = Af_y$, που χρησιμοποιείται ως τώρα στους Κανονισμούς Σχεδιασμού.

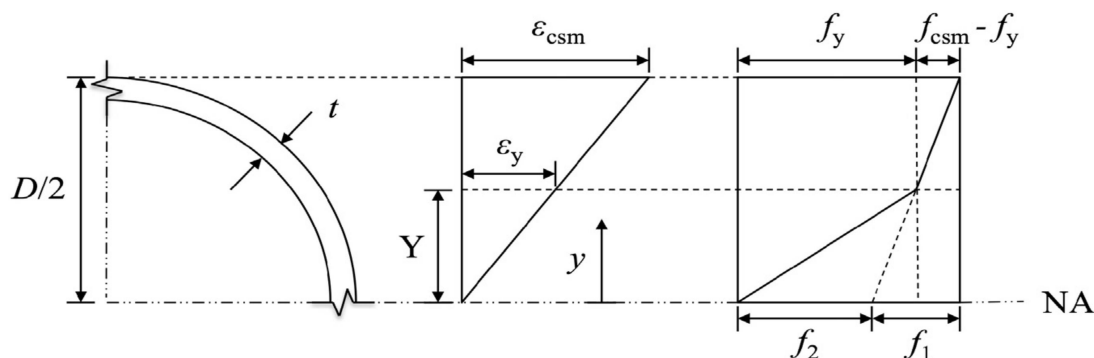
2.7.2 Υπολογισμός αντοχής σε μονοαξονική κάμψη

Με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται οι παρακάτω παραδοχές:

Κάθε διατομή, δηλαδή κάθε επίπεδη τομή κάθετη στον άξονα του στοιχείου, που πριν την κάμψη ήταν επίπεδη και κάθετη στον άξονα του, παραμένει επίπεδη και κάθετη στον παραμορφωμένο λόγω κάμψης άξονα του.

Η διατομή δεν στρεβλώνει, μέχρις ότου να αναπτυχθεί ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_{csm} στην πλέον καταπονούμενη ίνα της διατομής.

Η κατανομή τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων καθ' ύψους της διατομής εικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 2-2-5: Κατανομή τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων καθ' ύψους της διατομής (εικονίζεται η μισή διατομή) (Buchanan, Gardner and Liew 2015)

Επομένως, η ροπή αντοχής της διατομής θα υπολογιστεί μέσω της σχέσης:

$$M_{csm} = W_{pl} f_{csm} - (W_{pl} - W_{el}) f_y - W_w f_2 \quad (2-22)$$

Όπου: W_{pl} : πλαστική ροπή αντίστασης της διατομής

W_{el} : ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής

W_w : ροπή αντίστασης που αντιστοιχεί στην τριγωνική κατανομή τάσεων

που σχετίζεται με την τάση f_2 για $|y| \leq Y$

Υ: η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την κοντινότερη σε αυτόν ίνα που έχει διαρρεύσει. Υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\gamma = \frac{0.5D}{\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y}} \quad (2-23)$$

Οι τάσεις f_1 και f_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$f_1 = \frac{E_{sh}}{E} \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \quad (2-24)$$

$$f_2 = 1 - \frac{E_{sh}}{E} \quad (2-25)$$

Τελικά, διαιρώντας την σχέση (2-22) με την τιμή της πλαστικής ροπής M_{pl} και αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των f_1, f_2 και f_{csm} καταλήγουμε:

$$\frac{M_{csm}}{M_{pl}} = 1 + \frac{E_{sh}}{E} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \frac{W_{el}}{W_{pl}} - 1 \right) - \frac{W_w}{W_{pl}} \left(1 - \frac{E_{sh}}{E} \right) \quad (2-26)$$

Η ροπή αντίστασης W_w υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$W_w = \int g(y) y dA_y \quad (2-27)$$

Όπου η συνάρτηση $g(y)$ σχετίζεται με την τριγωνική κατανομή στο τμήμα την διατομής από τον ουδέτερο άξονα μέχρι την ίνα που βρίσκεται πιο κοντά σε αυτόν και έχει διαρρεύσει. Η σχέση (27) για μια κυκλική διατομή, με χρήση πολικών συντεταγμένων προς διευκόλυνση της ολοκλήρωσης μετασχηματίζεται ως εξής:

$$W_{w,r} = 4 \int_0^Y y \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}} dy - \frac{4r}{Y} \int_0^Y y^2 \sqrt{1 - \frac{y^2}{r^2}} dy \quad (2-28)$$

Η λύση του ανωτέρω ολοκληρώματος είναι:

$$W_{w,r} = \frac{4r^3}{3} \left[1 - \left(1 - \frac{Y^2}{r^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] - \frac{r}{Y} \left[\frac{Y}{2} (2Y^2 - r^2) \sqrt{1 - \frac{Y^2}{r^2}} + \frac{r^3}{2} \sin^{-1} \left(\frac{Y}{r} \right) \right] \quad (2-29)$$

Τέλος, εάν η σχέση (2-29) υπολογιστεί τόσο για την εξωτερική όσο και για την εσωτερική ακτίνα της κοίλης κυκλικής διατομής η ροπή αντίστασης $W_{W,r}$ υπολογίζεται πλέον ως η διαφορά $W_{W,r_2} - W_{W,r_1}$.

Είναι:

$$W_{W,r_2} = \frac{4r_2^3}{3} \left[1 - \cos^3(\alpha) \right] - \frac{r_2^3}{\sin\alpha} \left[\sin^3(\alpha)\cos\alpha + \frac{\alpha}{2} - \frac{\sin\alpha\cos\alpha}{2} \right] \quad (2-30)$$

$$W_{W,r_1} = \frac{4r_1^3}{3} \left[1 - \cos^3(\beta) \right] - \frac{r_1^3}{\sin\beta} \left[\sin^3(\beta)\cos\beta + \frac{\beta}{2} - \frac{\sin\beta\cos\beta}{2} \right] \quad (2-31)$$

$$\text{Όπου: } \sin\alpha = \frac{Y}{r_2}, \cos\alpha = \sqrt{1 - \frac{Y^2}{r_2^2}}, \sin\beta = \frac{Y}{r_1}, \cos\beta = \sqrt{1 - \frac{Y^2}{r_1^2}}$$

Η αναλυτική σχέση για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης $W_{W,r}$ εφαρμόζεται για

$$\frac{r_2}{r_1} < \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y}$$

Ωστόσο, επειδή η αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής της διατομής είναι ιδιαίτερα σύνθετη για να εφαρμοστεί στα πλαίσια των Κανονισμών Σχεδιασμού, μια απλοποιημένη έκφραση, η οποία ικανοποιείται υπό κάποιες προϋποθέσεις, εφαρμόζεται τελικά. Αναλυτικότερα:

➤ Για $\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} < 1$:

$$f_{csm} = f_y \quad (2-32)$$

και

$$W_W = W_{pl} - W_{el}$$

$$\frac{M_{csm}}{M_{pl}} = 1 + \frac{E_{sh}}{E} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \frac{W_{el}}{W_{pl}} - 1 \right) - \frac{W_{pl} - W_{el}}{W_{pl}} \left(1 - \frac{E_{sh}}{E} \right) \quad (2-33)$$

➤ Για $\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} > 1$:

$$W_W = \frac{(W_{pl} - W_{el})}{\left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^2} \quad (2-34)$$

$$\frac{M_{csm}}{M_{pl}} = 1 + \frac{E_{sh}}{E} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \frac{W_{el}}{W_{pl}} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) \left(1 - \frac{E_{sh}}{E} \right) \quad (2-35)$$

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι $E_{sh} \ll E$ θα μπορούσε να ληφθεί: $1 - \frac{E_{sh}}{E} = 1$

Οπότε οι τελικές σχέσεις που δίνουν την ροπή αντοχής της διατομής θα είναι:

➤ Για $\bar{\lambda}_C < 0.3$:

$$M_{csm} = M_{pl} \left[1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \frac{\left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right)}{\left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^2} \right] \quad (2-36)$$

➤ Για $0.3 \leq \bar{\lambda}_C \leq 0.6$:

$$M_{csm} = \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} W_{el} f_y \quad (2-37)$$

3 ΚΟΙΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΣΕ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

3.1 Γενικά

Οι λεπτότοιχες διατομές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε τοπικό λυγισμό, όταν υποβάλλονται σε θλιπτικά φορτία. Μια ιδιαίτερα λεπτότοιχη διατομή εμφανίζει ως κύρια μορφή αστοχίας τον τοπικό λυγισμό, ο οποίος μάλιστα προηγείται της διαρροής του υλικού της. Αντίθετα, μια μη λεπτότοιχη διατομή αστοχεί λόγω αλληλεπίδρασης τόσο της διαρροής του υλικού όσο και του τοπικού λυγισμού, με τον δεύτερο να έπεται της διαρροής του υλικού και να χαρακτηρίζεται μάλιστα ως πλαστικός τοπικός λυγισμός. Οι Κανονισμοί Σχεδιασμού λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού κατατάσσοντας τις διατομές σε τέσσερις διακριτές κατηγορίες, οποίες αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Αντίθετα, η Μέθοδος της Συνεχούς Αντοχής καταργεί την έννοια της κατηγοριοποίησης των διατομών και εισάγει μια συνεχή σχέση μεταξύ της ανηγμένη λυγηρότητας και της ικανότητας παραμόρφωσης της διατομής. Ταυτόχρονα, υιοθετώντας και ένα πιο ακριβές μοντέλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς του χάλυβα, καταλήγει να υπολογίζει την αντοχή σε θλίψη της διατομής μέσω αναλυτικών εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη υπολογιστικά τον τοπικό λυγισμό. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν, διερευνάται η συμπεριφορά λεπτότοιχων και μη κοίλων κυκλικών διατομών υποβαλλόμενων σε κεντρική θλίψη και γίνεται σύγκριση των αναλυτικών λύσεων της Μεθόδου της Συνεχούς Αντοχής με τα αριθμητικά αποτελέσματα του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA (2008) και με τον Ευρωκώδικα 3. Η σύγκριση αφορά κυρίως την αντοχή σε θλίψη της κοίλης κυκλικής διατομής, όπως αυτή υπολογίζεται με βάση την μέθοδο.

3.2 Αναλυτική Προσέγγιση

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η Μέθοδος της Συνεχούς Αντοχής (Continuous Strength Method) συσχετίζει μέσω μια συνεχούς σχέσης την ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής ($\bar{\lambda}_c$) με την ικανότητα παραμόρφωσης της ($\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y}$). Ανάλογα με την τιμή της ανηγμένης, λυγηρότητας υπολογίζεται από την αντίστοιχη εξίσωση η ανηγμένη

παραμόρφωση ϵ_{CSM} (βλ. εξ. (2-9) και (2-10)) και στη συνέχεια ανάλογα με το είδος του χάλυβα και την τιμή του λόγου $\frac{\epsilon_{CSM}}{\epsilon_y}$ (μικρότερος ή μεγαλύτερος της μονάδας) υπολογίζεται μέσω των εξισώσεων (2-11) ή (2-12) η τάση f_{CSM} . Τελικά η αντοχή της διατομής σε κεντρική θλίψη, λαμβάνοντας υπόψη και τον τοπικό λυγισμό, υπολογίζεται από τις σχέσεις (2-20) ή (2-21), ανάλογα εάν η διατομή είναι λεπτότοιχη ή μη.

3.3 Αριθμητική Προσέγγιση

3.3.1 Χαρακτηριστικά των διατομών και των υλικών

Προκειμένου να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της Μεθόδου Συνεχούς Αντοχής σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής της διατομής σε κεντρική θλίψη, κρίθηκε σκόπιμο να προσομοιωθεί πλήθος διατομών με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των αναλύσεων να συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν μέσω των αναλυτικών λύσεων. Επιλέχθηκε να προσομοιωθούν 10 διατομές από κάθε είδος χάλυβα, οποίες έχουν σταθερή διάμετρο και μεταβλητό πάχος. Τα είδη του χάλυβα που επιλέχθηκαν είναι χάλυβας ψυχρής έλασης και ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας (1.4301(304)). Στους πίνακες 3-2 και 3-3 που εικονίζονται παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά των διατομών που επιλέχθηκαν για τα δυο είδη χάλυβα, ενώ στους πίνακες 3-4 και 3-5 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για χάλυβα ψυχρής έλασης

D (mm)	t(mm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	Wel (cm ³)	Wpl (cm ³)
168.3	1	5.25322	183.798939	22.23503865	28.32489
	1.5	7.85628	273.2462304	33.35255798	42.487335
	2	10.44364	361.0848061	44.4700773	56.64978
	2.1	10.959228	378.4611851	46.69358117	59.482269
	2.3	11.98852	413.0238455	51.1405889	65.147247
	3	15.57126	532.0133137	66.70511595	84.97467
	3.5	18.11152	615.1417028	77.82263528	99.137115
	4	20.63608	696.7382906	88.9401546	113.29956
	5	25.5	855.4116813	111.1751933	141.62445
	6.3	32.1	1052.88651	140.0807435	178.446807

D (mm)	t(mm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	Wel (cm ³)	V (cm ³)
168.3	1	5.25322	183.798939	22.23503865	3.14159265
	1.1	5.775088	201.81803	24.45854252	3.14159265
	1.2	6.296328	219.7721483	26.68204638	3.14159265
	1.3	6.81694	237.6614504	28.90555025	3.14159265
	1.5	7.85628	273.2462304	33.35255798	4.71238898
	2	10.44364	361.0848061	44.4700773	6.28318531
	2.5	13.0153	447.3340714	55.58759663	7.85398164
	2.6	13.527748	464.3949066	57.81110049	7.85398164
	3	15.57126	532.0133137	66.70511595	9.42477797
	4	20.63608	696.7382906	88.9401546	12.56637061

D (mm)	t(mm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	Wel (cm ³)	Wpl (cm ³)
168.3	1	5.25322	183.798939	22.23503865	28.32489
	1.1	5.775088	201.81803	24.45854252	31.157379
	1.2	6.296328	219.7721483	26.68204638	33.989868
	1.3	6.81694	237.6614504	28.90555025	36.822357
	1.5	7.85628	273.2462304	33.35255798	42.487335
	2	10.44364	361.0848061	44.4700773	56.64978
	2.5	13.0153	447.3340714	55.58759663	70.812225
	2.6	13.527748	464.3949066	57.81110049	73.644714
	3	15.57126	532.0133137	66.70511595	84.97467
	4	20.63608	696.7382906	88.9401546	113.29956

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά χάλυβα ψυχρής έλασης

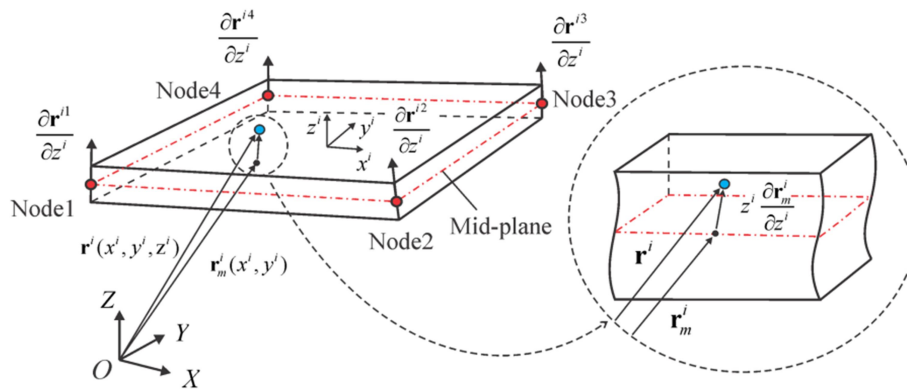
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (MPa)	210000
ΛΟΓΟΣ POISSON	0.3
ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ F_y (MPa)	315
ΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ F_u (MPa)	390
ε_y	0.0015
ε_u	0.193
E_{sh} (MPa)	1487.41

Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά ωστενιτικού ανοξειδωτου χάλυβα (1.4301(304))

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (MPa)	200000
ΛΟΓΟΣ POISSON	0.3
ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ F_y (MPa)	230
ΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ F_u (MPa)	570
ϵ_y	0.0015
ϵ_u	0.5965
E_{sh} (MPa)	3605.95

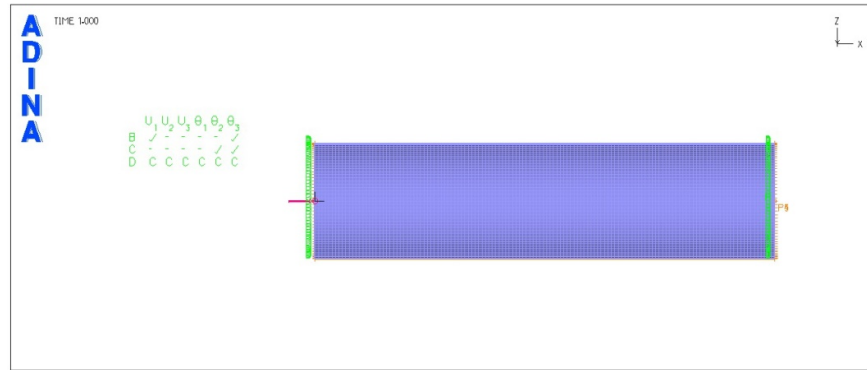
3.3.2 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία

Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA (2008) δημιουργήθηκε ένα κυλινδρικό κέλυφος ακτίνας $D=168.3\text{mm}$ και μήκους $L= 0.6732\text{m}$. Το μήκος του φορέα επιλέχθηκε να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με την διάμετρο του (βραχύς κύλινδρος), ώστε ο τοπικός λυγισμός να αποτελεί την κρίσιμη μορφή αστοχίας του. Εξαιτίας της φύσης του φαινομένου του τοπικού λυγισμού, επιλέχθηκε η προσομοίωση του με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά ισοπαραμετρικά στοιχεία κελύφους. Τα στοιχεία αυτά έχουν 2 κόμβους σε κάθε πλευρά τους, επομένως οι συναρτήσεις σχήματος τους είναι γραμμικές. Στην εικόνα 3-1 φαίνεται ένα τέτοιο στοιχείο.



Εικόνα 3-1: Τετρακομβικό ισοπαραμετρικό στοιχείο κελύφους.

Οι δυο ακραίες διατομές του κελύφους δεσμεύτηκαν με άκαμπτο κόμβο (rigid link), στον οποίο επιβλήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες αμφιέριστης δοκού. Στον άκαμπτο κόμβο με συνοριακές συνθήκες όμοιες με αυτές της κύλισης επιβλήθηκε το αξονικό φορτίο. Σχηματικά τα παραπάνω φαίνονται στο στιγμιότυπο του ADINA (2008) (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση

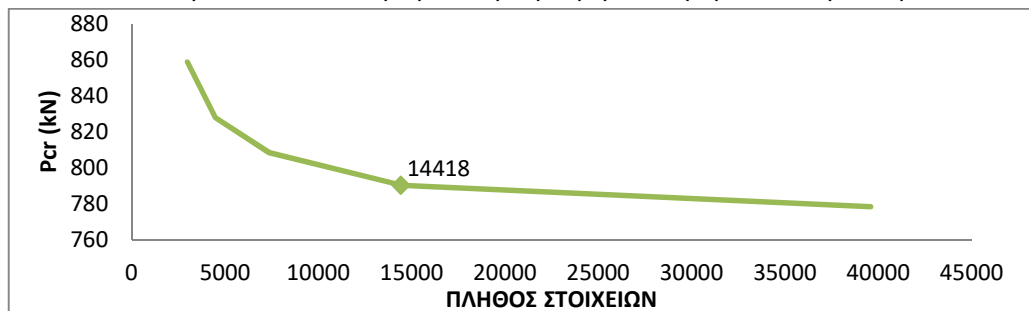
3.3.3 Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Επιπλέον, κρίθηκε σκόπιμο να ευρεθεί η κατάλληλη πυκνότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των κυλινδρικών κελυφών, προκειμένου αφενός να προκύπτουν ακριβή αποτελέσματα και αφετέρου να είναι διαχειρίσιμος ο υπολογιστικός όγκος, με στόχο την έγκαιρη πραγματοποίηση των αναλύσεων. Για τη διαδικασία αυτή εκτελέστηκαν γραμμικές αναλύσεις λυγισμού στη διατομή με πάχος $t=1\text{mm}$, η οποία προσομοιώνεται με διαφορετικό πλήθος πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε ανάλυση. Στον Πίνακα 3-6 που παρουσιάζεται στη συνέχεια περιγράφεται η πορεία πύκνωσης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 3-4: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

ΠΛΗΘΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	ΚΡΙΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΕΑ
2978	858.7
4486	827.9
7374	808.4
14418	790.2
39602	778.2

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3-5 απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα 3-1, όπου στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε ανάλυση και στον κατακόρυφο το κρίσιμο φορτίο λυγισμού που προέκυψε.



Διάγραμμα 3-1: Διάγραμμα πύκνωσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-1, η τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού μειώνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος. Ως κατάλληλη πυκνότητα πλέγματος λαμβάνεται αυτή, της οποίας η περαιτέρω αύξηση δεν μεταβάλλει ιδιαίτερα την τιμή του κρίσιμου φορτίου. Επομένως, επιλέχθηκε η προσομοίωση του κυλίνδρου με 14418 στοιχεία. Όπως

φάνεται και στον πίνακα 3-6, η επιλογή αυτή οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα, καθώς ενέχει το μικρότερο δυνατό σφάλμα.

Πίνακας 3-5: Ποσοστιαίο σφάλμα κατά την πυκνωση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

ΠΛΗΘΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	ΚΡΙΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΕΑ	ΣΦΑΛΜΑ (%)
2978	858.7	8.23%
4486	827.9	4.34%
7374	808.4	1.89%
14418	790.2	-0.41%
39602	778.2	-1.92%

3.3.4 Υπολογισμός αρχικών ατελειών

Οι κατασκευαστικές ατέλειες αποτελούν αναπόφευκτο γνώρισμα των κατασκευών. Επιφέρουν αποκλίσεις από την αρχική γεωμετρία του φορέα και επηρεάζουν την απόκριση του, μειώνοντας την φέρουσα ικανότητά του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με αρχική ατέλεια στο πρόγραμμα ADINA (2008), οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τη σχέση των Κανονισμών (Eurocode και British Standards):

$$a = \frac{0.0014 * d_{nom}}{4} \quad (3-1)$$

Όπου:

a: η τιμή της αρχικής ατέλειας

d_{nom} : η ονομαστική τιμή της εσωτερικής διαμέτρου

Στην Εικόνα 3-3 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ατέλειας με βάση το πρότυπο των Κανονισμών, ενώ στους Πίνακες 3-7 και 3-8 αναγράφονται οι τιμές των ατελειών που προέκυψαν από την Εξ. (3-1) για κάθε διατομή για τα δυο είδη χάλυβα.

No	Criteria and details																				
1	<p>Out-of-roundness: Difference between the maximum and minimum values of the measured internal diameter, relative to the nominal internal diameter:</p> $\Delta = \frac{(d_{max} - d_{min})}{d_{nom}}$ <p>Tolerances</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Permitted deviation Δ</th> </tr> <tr> <th>Diameter</th> <th>$d \leq 0,50$ m</th> <th>$0,50 \text{ m} < d < 1,25$ m</th> <th>$d \geq 1,25$ m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Class A</td> <td>$\Delta = \pm 0,014$</td> <td>$\Delta = \pm [0,007 + 0,009 \cdot 3(1,25 - d)]$</td> <td>$\Delta = \pm 0,007$</td> </tr> <tr> <td>Class B</td> <td>$\Delta = \pm 0,020$</td> <td>$\Delta = \pm [0,010 + 0,013 \cdot 3(1,25 - d)]$</td> <td>$\Delta = \pm 0,010$</td> </tr> <tr> <td>Class C</td> <td>$\Delta = \pm 0,030$</td> <td>$\Delta = \pm [0,015 + 0,020 \cdot 0(1,25 - d)]$</td> <td>$\Delta = \pm 0,015$</td> </tr> </tbody> </table> <p>NOTE _____ d is the nominal internal diameter d_{nom} in metres.</p>	Permitted deviation Δ				Diameter	$d \leq 0,50$ m	$0,50 \text{ m} < d < 1,25$ m	$d \geq 1,25$ m	Class A	$\Delta = \pm 0,014$	$\Delta = \pm [0,007 + 0,009 \cdot 3(1,25 - d)]$	$\Delta = \pm 0,007$	Class B	$\Delta = \pm 0,020$	$\Delta = \pm [0,010 + 0,013 \cdot 3(1,25 - d)]$	$\Delta = \pm 0,010$	Class C	$\Delta = \pm 0,030$	$\Delta = \pm [0,015 + 0,020 \cdot 0(1,25 - d)]$	$\Delta = \pm 0,015$
Permitted deviation Δ																					
Diameter	$d \leq 0,50$ m	$0,50 \text{ m} < d < 1,25$ m	$d \geq 1,25$ m																		
Class A	$\Delta = \pm 0,014$	$\Delta = \pm [0,007 + 0,009 \cdot 3(1,25 - d)]$	$\Delta = \pm 0,007$																		
Class B	$\Delta = \pm 0,020$	$\Delta = \pm [0,010 + 0,013 \cdot 3(1,25 - d)]$	$\Delta = \pm 0,010$																		
Class C	$\Delta = \pm 0,030$	$\Delta = \pm [0,015 + 0,020 \cdot 0(1,25 - d)]$	$\Delta = \pm 0,015$																		

Εικόνα 3-3: Υπολογισμός της ατέλειας με βάση το πρότυπο των Κανονισμών BS EN

Πίνακας 3-6: Τιμή ατέλειας σε διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης

Διατομή	Ατέλεια a (mm)
t=1mm	0.58205
t=1.5mm	0.57855

t=2mm	0.57505
t=2.1mm	0.57435
t=2.3mm	0.57295
t=3mm	0.56805
t=3.5mm	0.56455
t=4mm	0.56105
t=5mm	0.55405
t=6.3mm	0.54495

Πίνακας 3-7: Τιμή ατέλειας σε διατομές από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

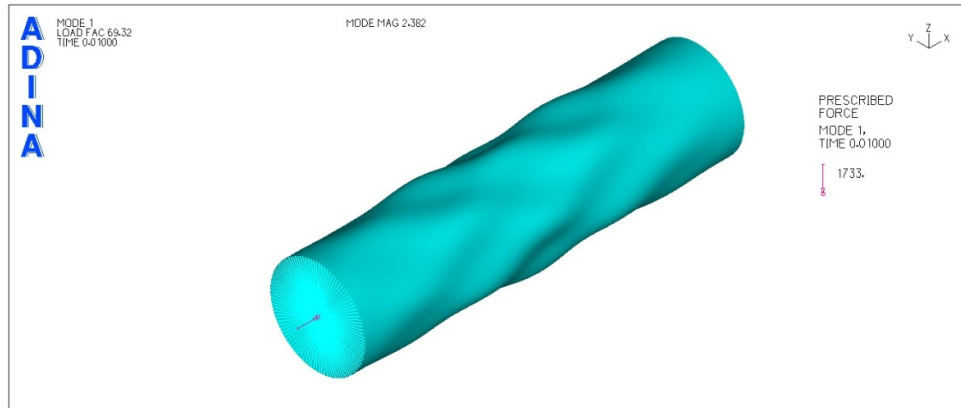
Διατομή	Ατέλεια α (mm)
t=1mm	0.58205
t=1.1mm	0.58135
t=1.2mm	0.58065
t=1.3mm	0.57995
t=1.5mm	0.57295
t=2mm	0.57505
t=2.5mm	0.57155
t=2.6mm	0.57085
t=3mm	0.56805
t=4mm	0.56105

3.4 Αριθμητικές Αναλύσεις

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για δυο διατομές (λεπτότοιχη και μη) και για τα δύο είδη χάλυβα που επιλέχθηκαν. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις δέκα διατομές από κάθε είδος χάλυβα, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για στατιστικούς σκοπούς και λόγους σύγκρισης.

3.4.1 Λεπτότοιχη διατομή από χάλυβα ψυχρής έλασης

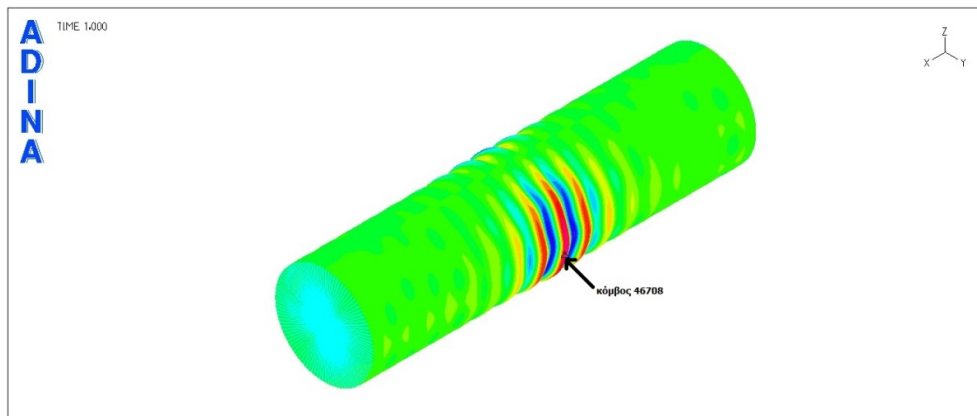
Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διατομή πάχους $t=1.5\text{mm}$, η οποία προσομοιώθηκε με 14418 στοιχεία. Η 1^η ιδιομορφή που προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού απεικονίζεται στην Εικόνα 3-4.



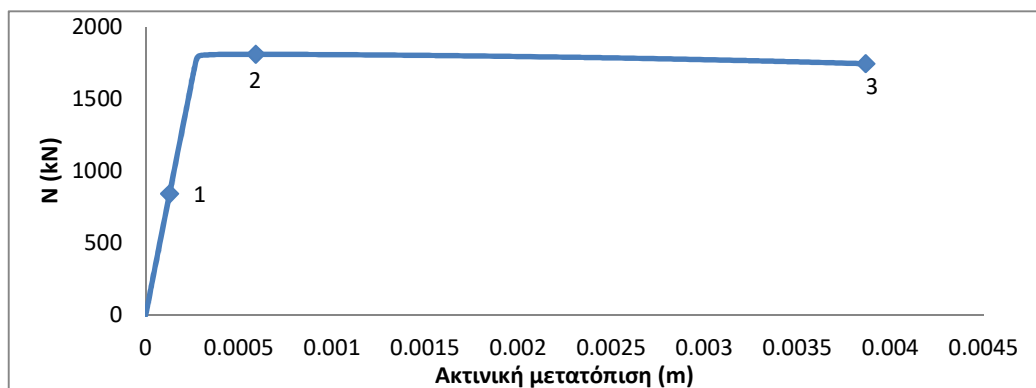
Εικόνα 3-4: 1η ιδιομορφή λυγισμού λεπτότοιχης διατομής- $N_{cr}=1733\text{kN}$

3.4.1.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από την ανάλυση φαίνεται στο Διάγραμμα 3-2, όπου κάθε σημείο του δρόμου ισορροπίας αντιστοιχεί και σε μια θέση ισορροπίας του συστήματος. Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται το ασκούμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 46708, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και φαίνεται στην Εικόνα 3-5.

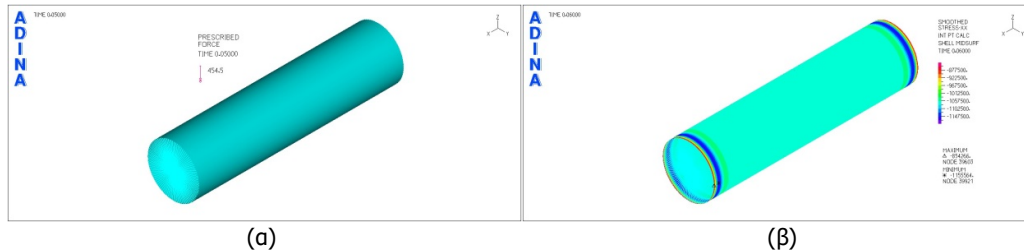


Εικόνα 3-5: Θέση του κόμβου 46708, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

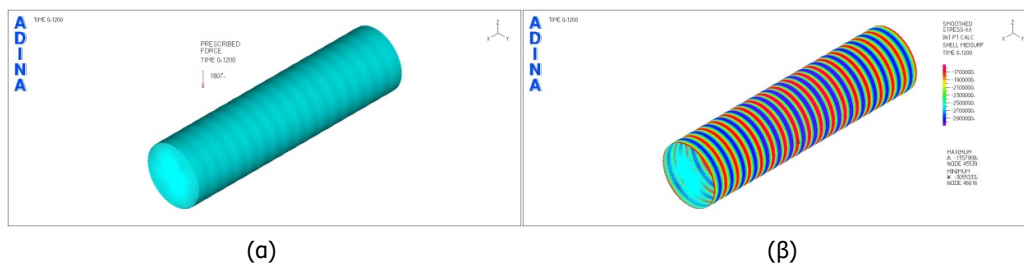


Διάγραμμα 3-2: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

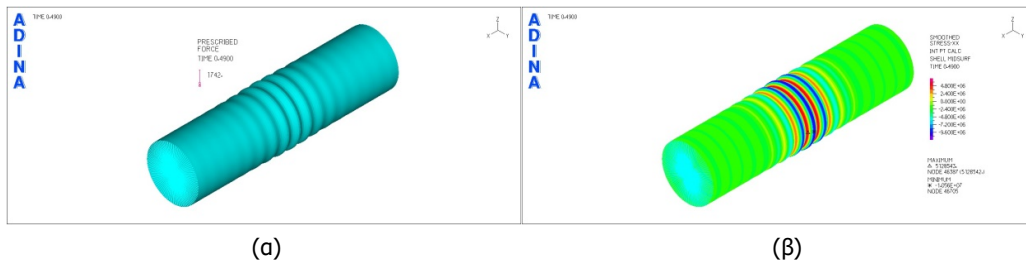
Από το διάγραμμα 3-2 προκύπτει ότι ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός, με όχι και τόσο έντονο καθοδικό κλάδο. Όπως φαίνεται το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται ισούται με $N_U = 1807.288\text{kN}$ και αντιστοιχεί στο οριακό σημείο, πέραν του οποίου το φορτίο μειώνεται με αργό ρυθμό, όσο αυξάνονται οι παραμορφώσεις. Χαρακτηριστικές εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων τόσο στο οριακό σημείο όσο και σε άλλα δυο χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-6, 3-7 και 3-8).



Εικόνα 3-6: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



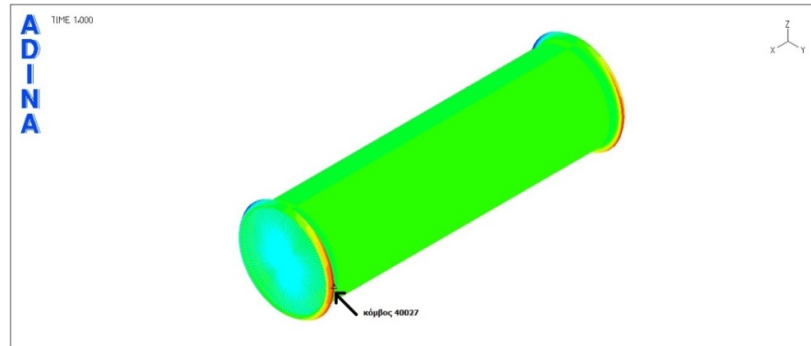
Εικόνα 3-7: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



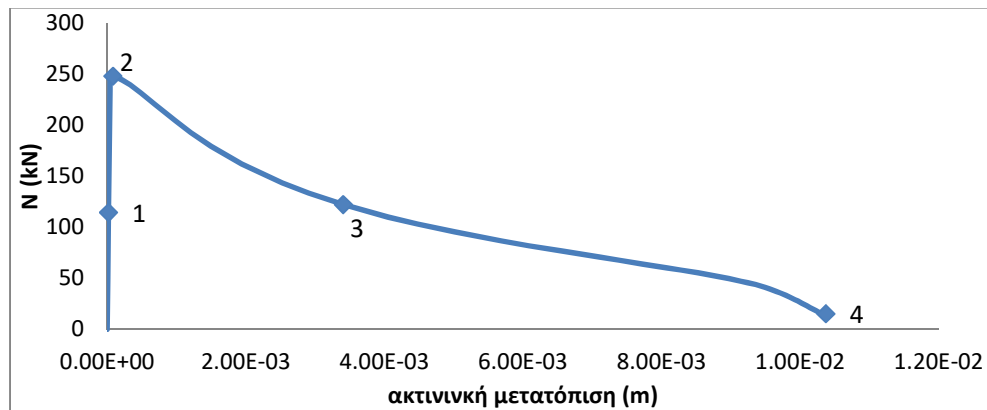
Εικόνα 3-8: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

3.4.1.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού λήφθηκε κράτυση για το χάλυβα, η οποία υπολογίστηκε για χάλυβα ψυχρής έλασης, σύμφωνα με την εξίσωση (2-15) του κεφαλαίου 2. Ο δρόμος ισορροπίας που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση απεικονίζεται στο διάγραμμα 3-3, όπου και πάλι στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί το ασκούμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 40027, ο οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και ο οποίος εικονίζεται στην Εικόνα 3-9.

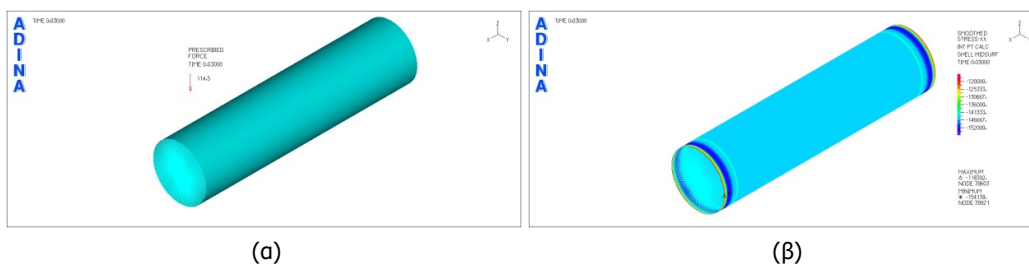


Εικόνα 3-9: Θέση του κόμβου 40027, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

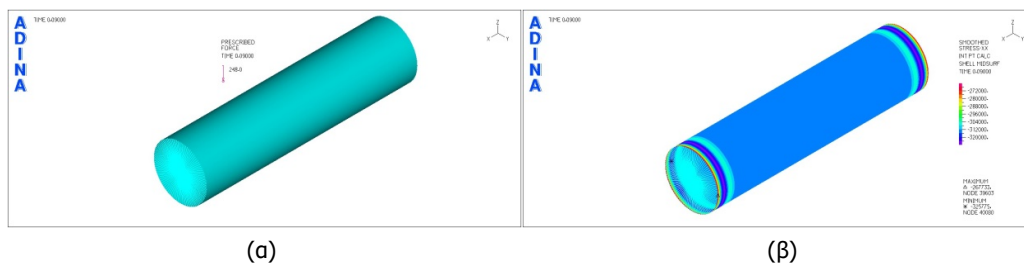


Διάγραμμα 3-3: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού

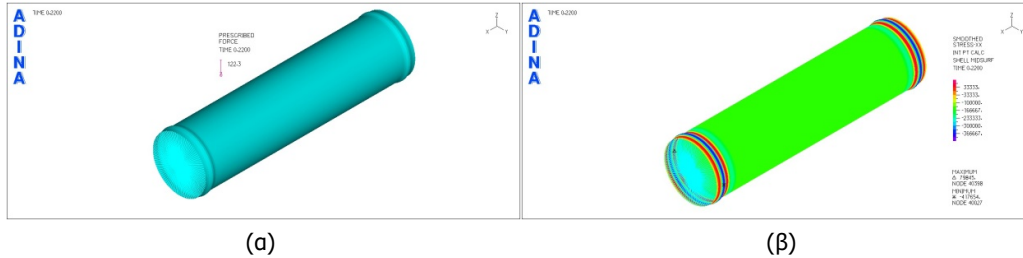
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 3-3 ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής, αφού εμφανίζει καθοδικό κλάδο. Το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται αντιστοιχεί σε $N_u = 248.034 \text{ kN}$ και εμφανίζεται προφανώς στο οριακό σημείο. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων τόσο στο οριακό σημείο όσο και σε άλλα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-10, 3-11 και 3-12 και 3-13).



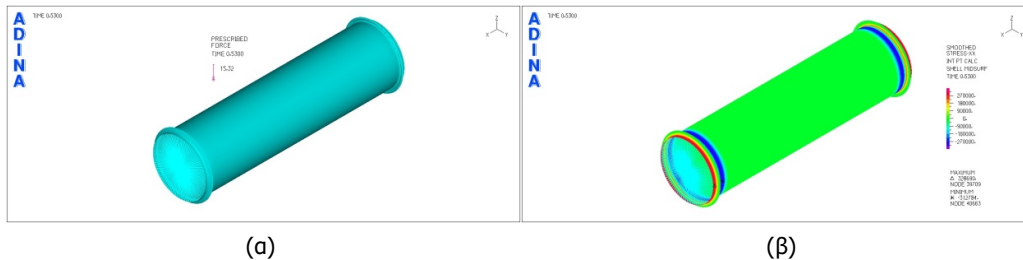
Εικόνα 3-10: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-11: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

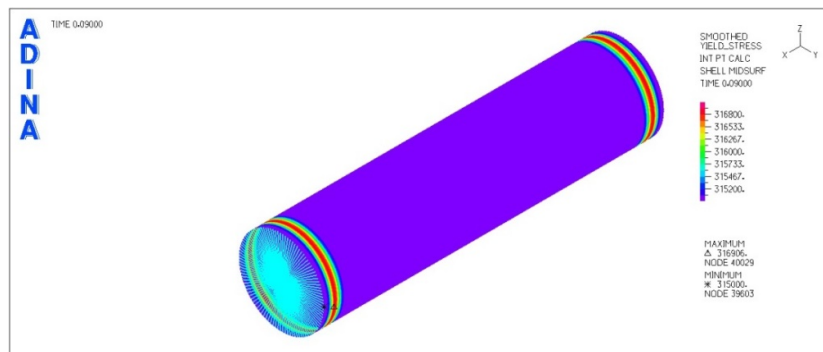


Εικόνα 3-12: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 3-13: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Όπως φαίνεται από την κατανομή των τάσεων για την μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται πριν τη διαρροή του υλικού. Στα άκρα του κελύφους, όπου πραγματοποιείται ο τοπικός λυγισμός, παρατηρείται, καθώς ο φορέας οδηγείται στην αστοχία, έντονη αύξηση των τάσεων, με τιμή πολύ κοντά στην τάση θραύση του υλικού, ενώ σε όλο το υπόλοιπο κέλυφος το υλικό είναι στην γραμμική περιοχή, με τις τιμές των τάσεων να μην ξεπερνούν αυτές της τάσης διαρροής (Εικόνα 3-14).

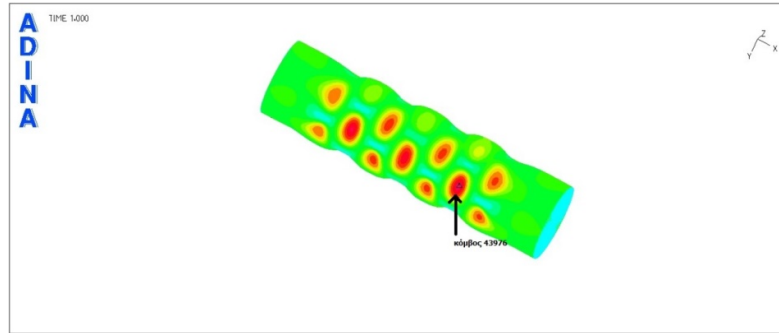


Εικόνα 3-14: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 2)

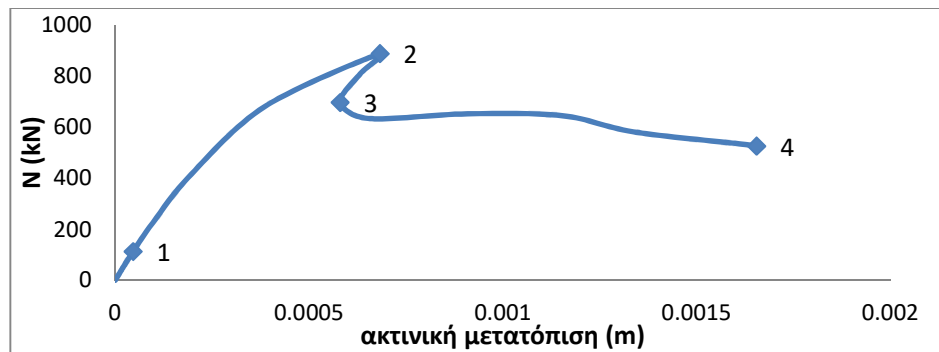
3.4.1.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

Λόγω της έντονης επιρροής των αρχικών ατελειών στην απόκριση των λεπτότοιχων κελυφών, πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας με ατέλεια. Η μορφή της ατέλειας που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πρώτη ιδιομορφή, όπως αυτή προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού, ενώ το μέγεθός της λήφθηκε από τον Πίνακα 3-7. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από την ανάλυση παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3-4, όπου στον κατακόρυφο άξονα αναγράφεται το επιβαλλόμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η αξονική μετατόπιση του

κόμβου 43976, οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και φαίνεται στην Εικόνα 3-15.

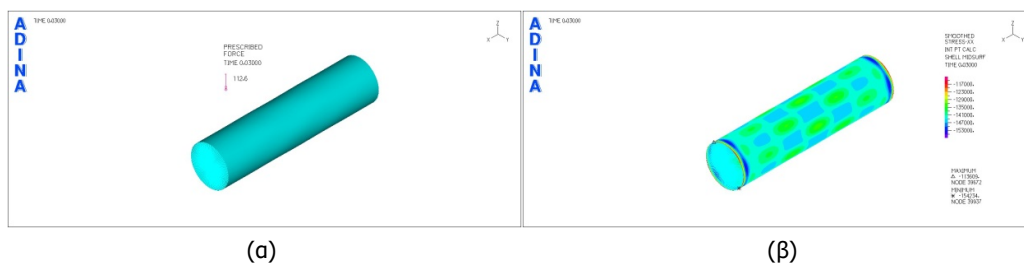


Εικόνα 3-15: Θέση του κόμβου 43976, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

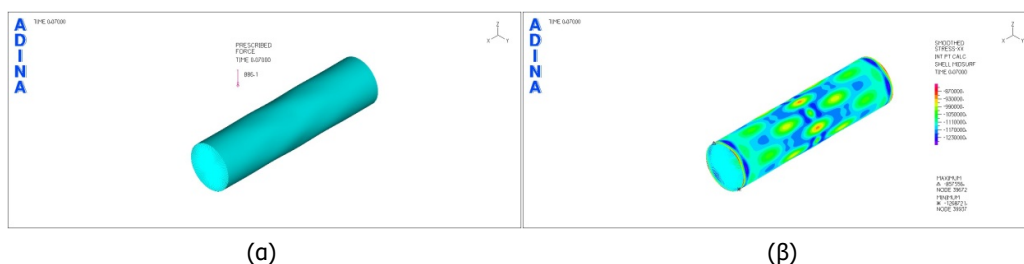


Διάγραμμα 3-4: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης με στέλειες

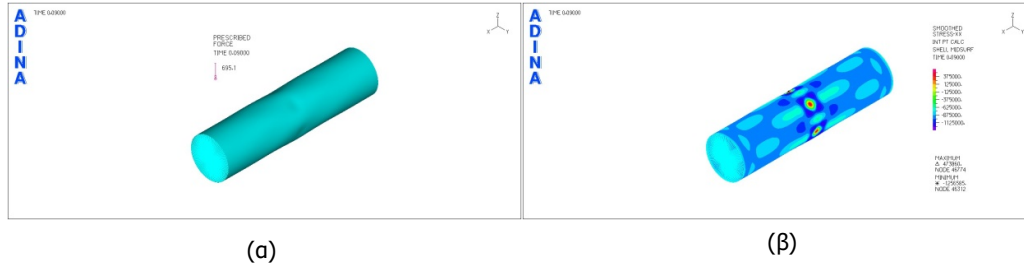
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 3-4, ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει έντονη μη γραμμικότητα, με εμφανές το οριακό σημείο, στο οποίο αναπτύσσεται και η μέγιστη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου $N_U = 886.09$ kN. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται ως ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων τόσο στο οριακό σημείο όσο και σε άλλα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-16, 3-17, 3-18 και 3-19).



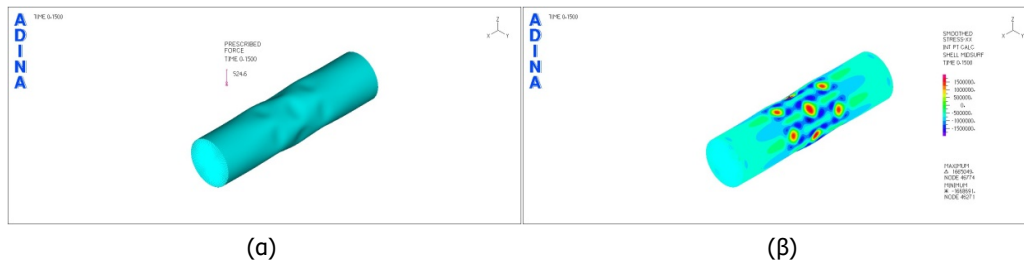
Εικόνα 3-16: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με στέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο1



Εικόνα 3-17: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

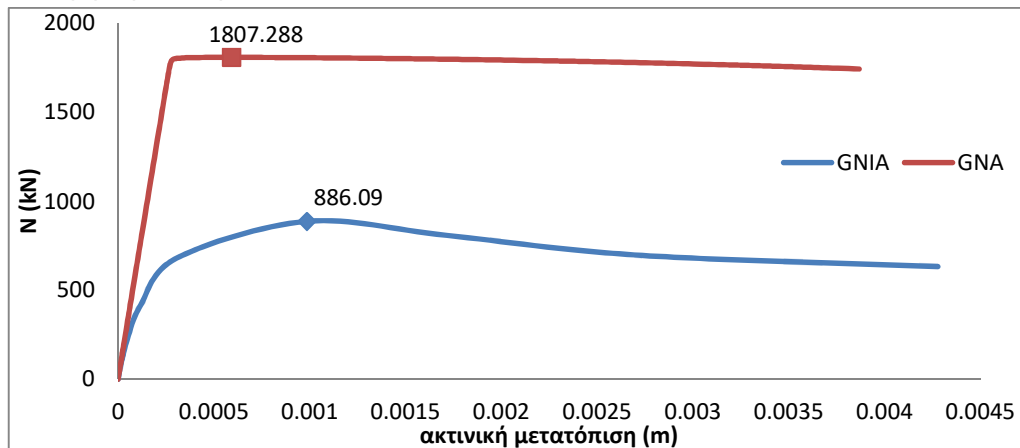


Εικόνα 3-18: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 3-19: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Η επιρροή των ατελειών είναι έντονη στην διαμόρφωση της απόκρισης του φορέα και της τελικής του αντοχής, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-5. Αναλυτικότερα, η ύπαρξη ατελειών καθιστά τον δρόμο ισορροπίας έντονα μη γραμμικό, ενώ το μέγιστο φορτίο μειώνεται στην δεύτερη περίπτωση κατά 50.98%.



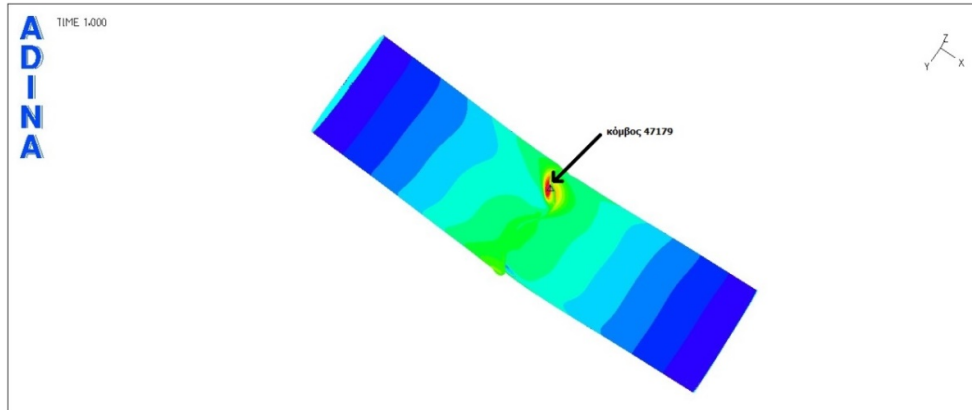
Διάγραμμα 3-5: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και χωρίς

3.4.1.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

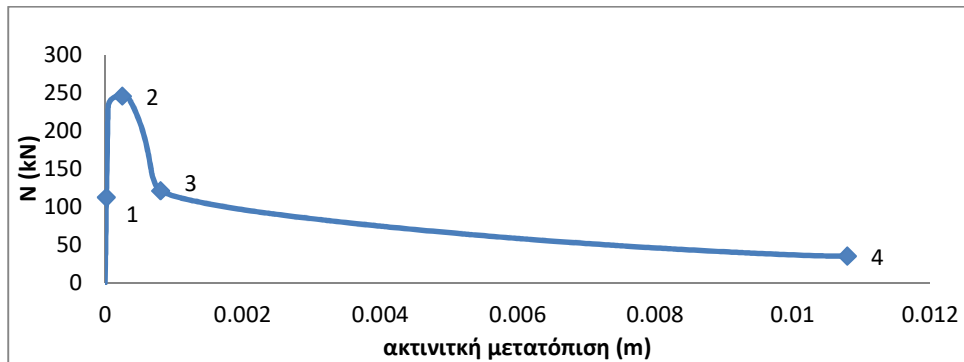
Εφόσον, η ατέλεια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του λεπτότοιχου κελύφους, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες, προκειμένου να υπολογιστεί με ακρίβεια η αντοχή του φορέα και να προσδιοριστεί η απόκριση, η οποία ταυτίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο με την πραγματική. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από την ανάλυση αυτή εικονίζεται στο διάγραμμα 3-6, όπου στον κατακόρυφο άξονα καταγράφεται το επιβαλλόμενο φορτίο και

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 47179, ο οποίος μετά το πέρας της ανάλυσης εμφάνισε την μεγαλύτερη ακτινική μετατόπιση και φαίνεται στην Εικόνα 3-20.

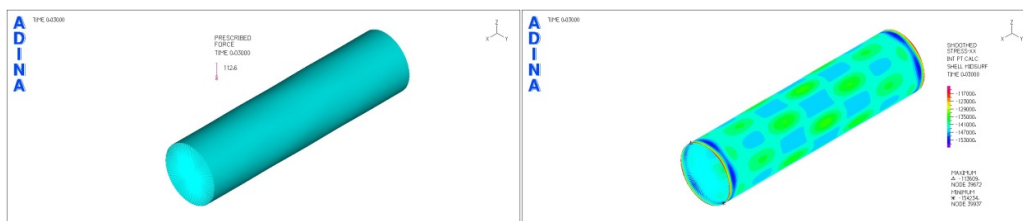


Εικόνα 3-20: Θέση του κόμβου 47179, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση



Διάγραμμα 3-6: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

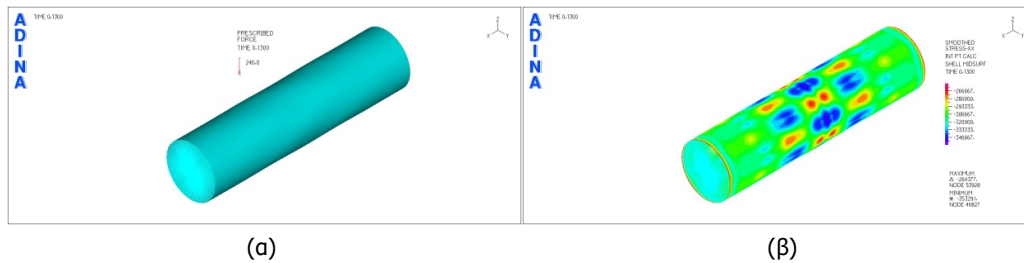
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-6 ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής, αφού εμφανίζει καθοδικό κλάδο, δηλαδή αύξηση των παραμορφώσεων προκαλεί μείωση του ασκούμενου φορτίου. Ο ρυθμός πτώσης του φορτίου είναι αρχικά έντονος, στη συνέχεια όμως ομαλοποιείται, δηλαδή η διατομή χάνει με αργό ρυθμό την υπόλοιπη αντοχή της πραγματοποιώντας πλαστικές παραμορφώσεις. Η μέγιστη τιμή του ασκούμενου φορτίου είναι $N_U = 246.028 \text{ kN}$. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-21, 3-22, 3-23 και 3-24).



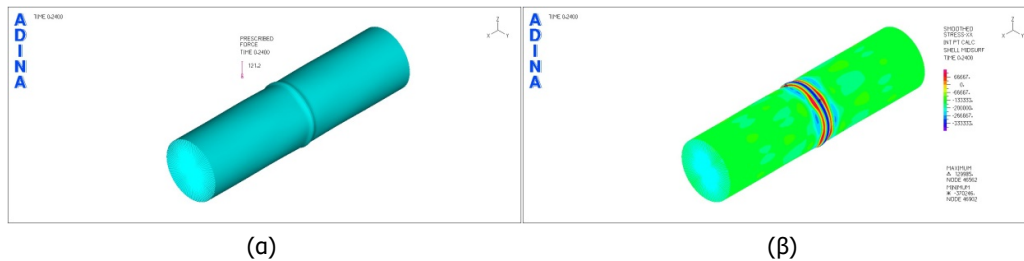
(α)

(β)

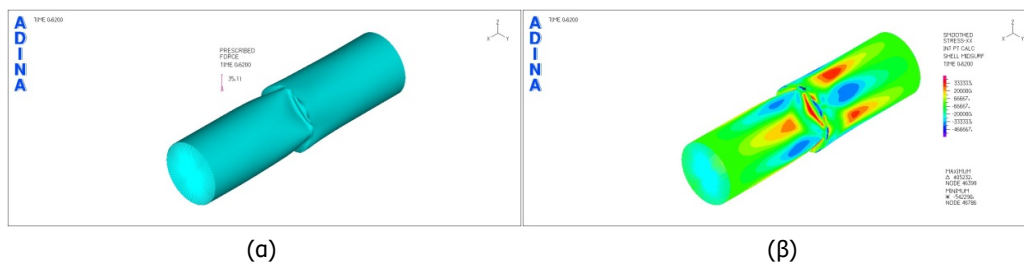
Εικόνα 3-21: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-22: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

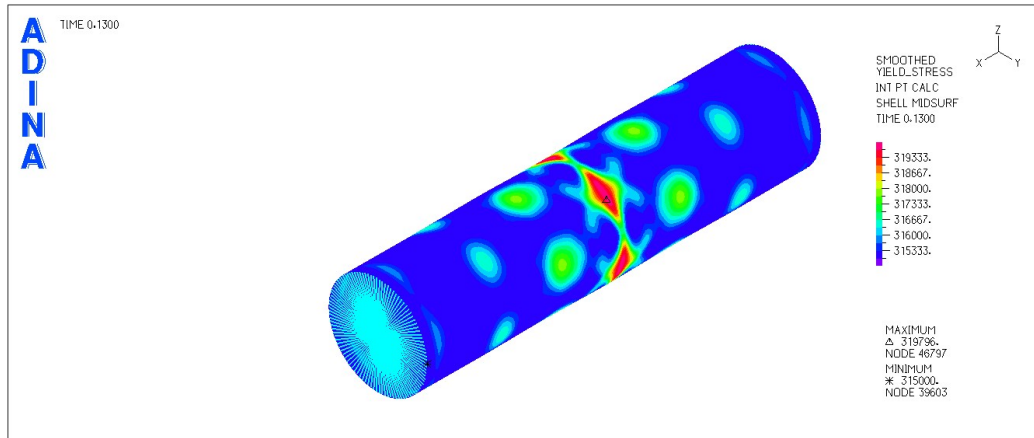


Εικόνα 3-23: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

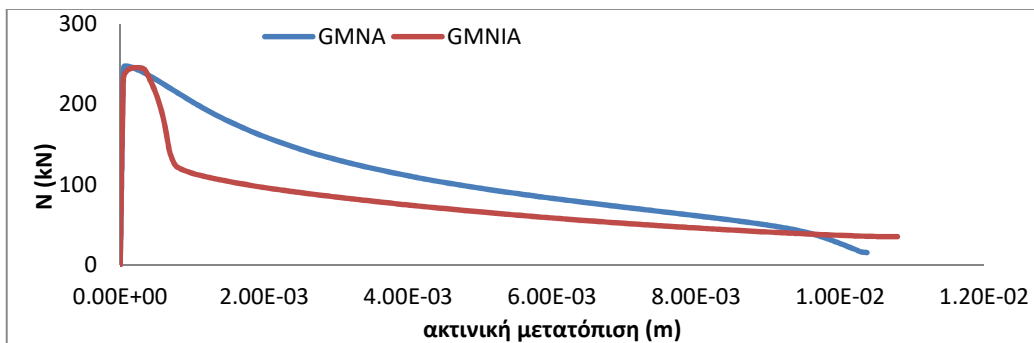


Εικόνα 3-24: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Όπως φαίνεται στις προηγούμενες εικόνες, η ατέλεια οδηγεί την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού στο μέσον του κελύφους. Ο τοπικός λυγισμός πραγματοποιείται και πάλι πριν την διαρροή του υλικού, με τη διαφορά ότι τώρα οι τάσεις σε όλο το εύρος του κελύφους έχουν τιμή πολύ κοντά στην τάση διαρροής (Εικόνα 3-25). Η ανάλυση έρχεται να επιβεβαιώσει το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου, που θέλει τις λεπτότοιχες διατομές να μην εκμεταλλεύονται την κράτυνση του χάλυβα, καθώς αστοχούν σε τοπικό λυγισμό, πριν το υλικό εισέλθει στην κρατυνόμενη περιοχή. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-7, η ατέλεια καθιστά τον δρόμο ισορροπίας μετά το οριακό σημείο έντονα καθοδικό, καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο μειώνεται με έντονο ρυθμό. Ωστόσο, η ατέλεια σε συνδυασμό με την μη γραμμικότητα του υλικού δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική αντοχή του φορέα, δηλαδή παρατηρείται μια μείωση του φορτίου της τάξης του 0.81%. Εξάγεται, τελικώς το συμπέρασμα ότι η ατέλεια παίζει καθοριστικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της τελικής αντοχής του φορέα, όταν το υλικό διατηρείται γραμμικό, αντιθέτως η ύπαρξη μη γραμμικότητας υλικού δεν επιτρέπει στην ατέλεια να συμβάλλει έντονα στην τελική τιμή της αντοχής του φορέα.



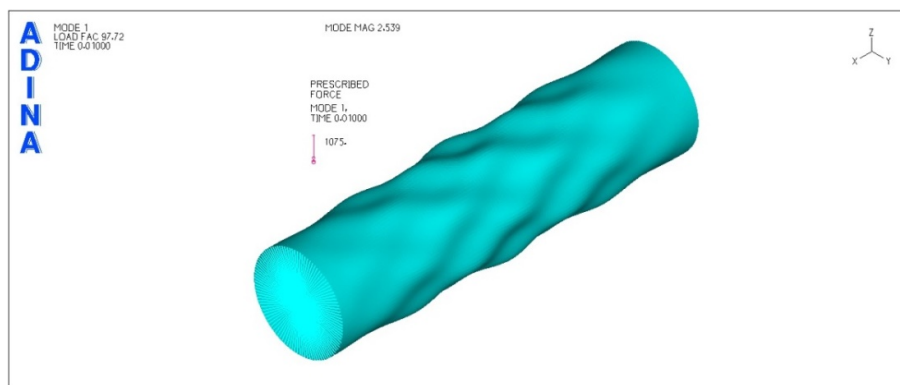
Εικόνα 3-25: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 2)



Διάγραμμα 3-7: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και χωρίς

3.4.2 Λεπτότοιχη διατομή από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα

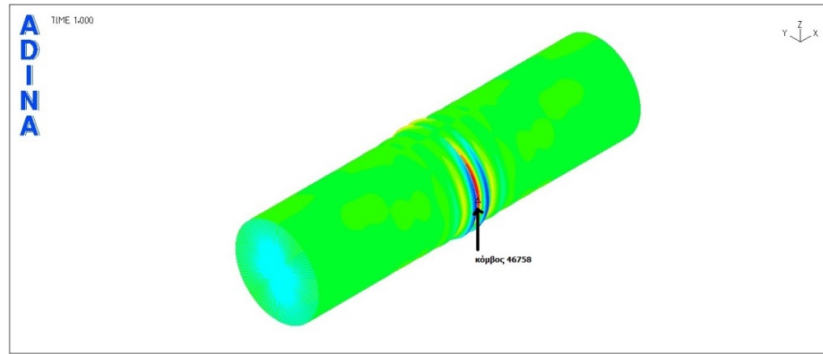
Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διατομή πάχους $t=1.2\text{mm}$, η οποία προσομοιώθηκε με 14418 στοιχεία. Η 1^η ιδιομορφή που προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού απεικονίζεται στην Εικόνα 3-26.



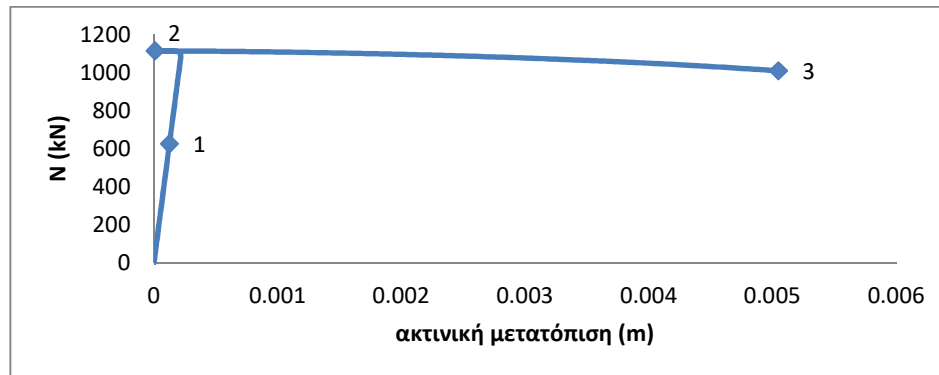
Εικόνα 3-26: 1η ιδιομορφή λυγισμού λεπτότοιχης διατομής- $N_{cr}=1075\text{kN}$

3.4.2.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από την μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας απεικονίζεται στο διάγραμμα 3-8, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται το ασκούμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 46758, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και φαίνεται στην Εικόνα 3-27.



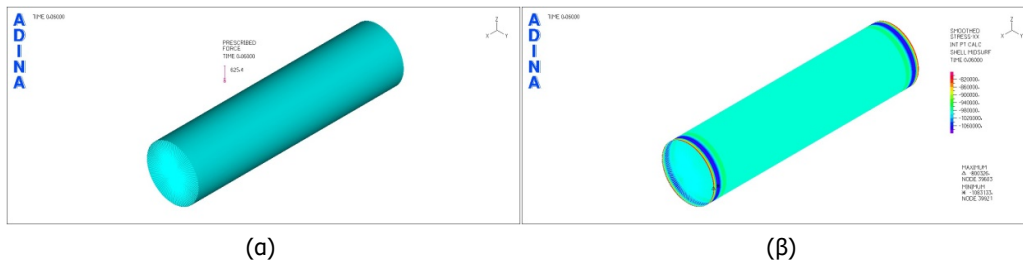
Εικόνα 3-27: Θέση του κόμβου 46758, ο οποίος αναπτύσσει τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση



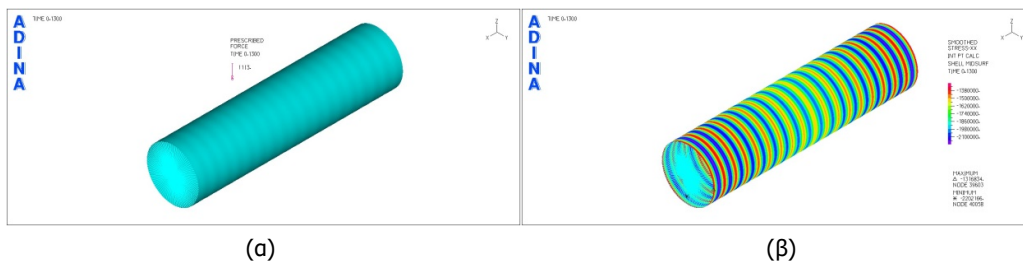
Διάγραμμα 3-8: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 3-8 ο δρόμος ισορροπίας δεν είναι έντονα μη γραμμικός. Είναι ωστόσο ασταθής, αφού αύξηση των παραμορφώσεων επιφέρει μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου, αλλά ο ρυθμός μείωσης αυτός δεν δύναται να χαρακτηριστεί έντονος. Το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο που αναπτύσσεται ισούται με $N_u = 1113.185 \text{ kN}$.

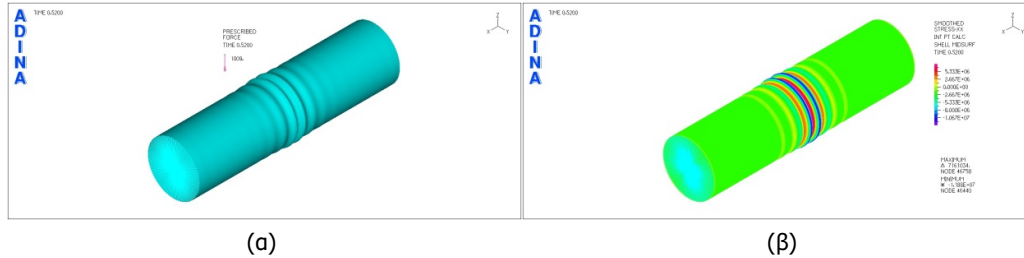
Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-28, Εικόνα 3-29 και Εικόνα 3-30).



Εικόνα 3-28(α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



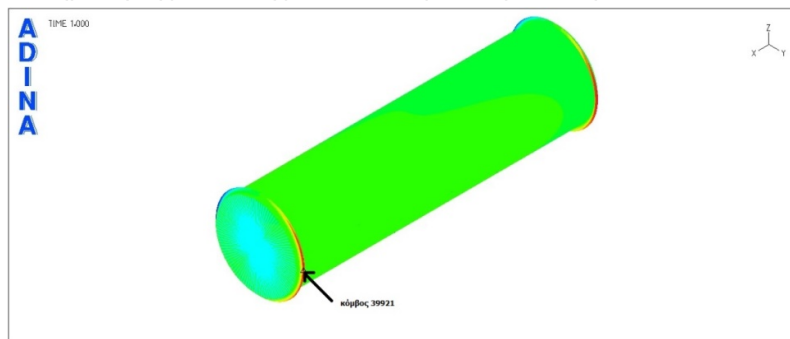
Εικόνα 3-29:(α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



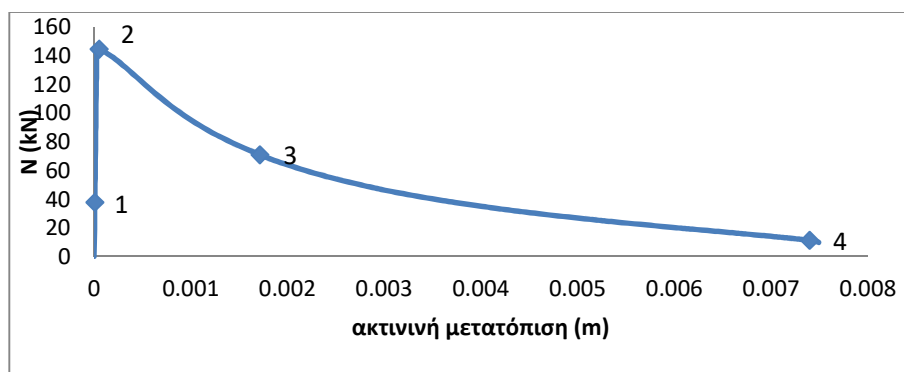
Εικόνα 3-30: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

3.4.2.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού λήφθηκε κράτυνση για το χάλυβα, η οποία υπολογίστηκε για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, σύμφωνα με την εξίσωση (2-17). Ο δρόμος ισορροπίας που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση απεικονίζεται στο διάγραμμα 3-9, όπου και πάλι στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί το ασκούμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 39921, ο οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και ο οποίος εικονίζεται στην Εικόνα 3-31.



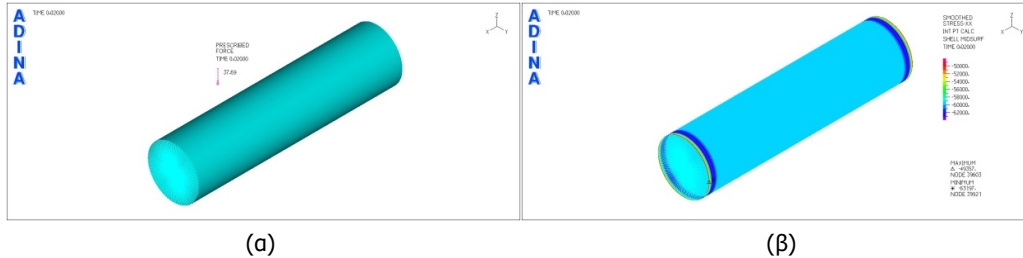
Εικόνα 3-31: Θέση του κόμβου 39921, ο οποίος αναπτύσσει τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση



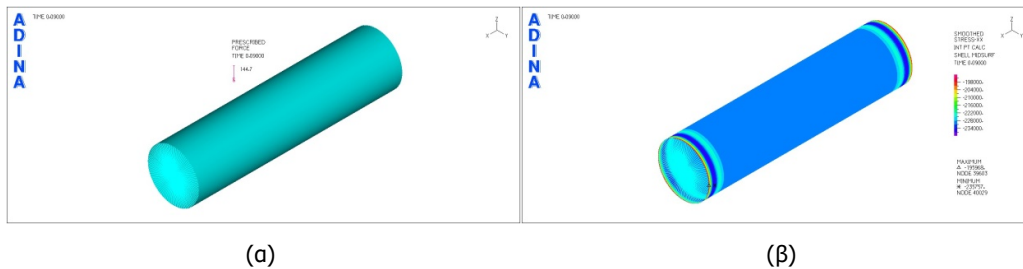
Διάγραμμα 3-9: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 3-9 ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής, αφού εμφανίζει καθοδικό κλάδο. Το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται ισούται με $N_U = 144.653\text{kN}$. Ο ρυθμός πτώσης του φορτίου μετά το οριακό σημείο είναι αρκετά έντονος, με αποτέλεσμα το φορτίο πρακτικώς να μηδενίζεται πριν η διατομή προλάβει να αναπτύξει σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων τόσο στο οριακό

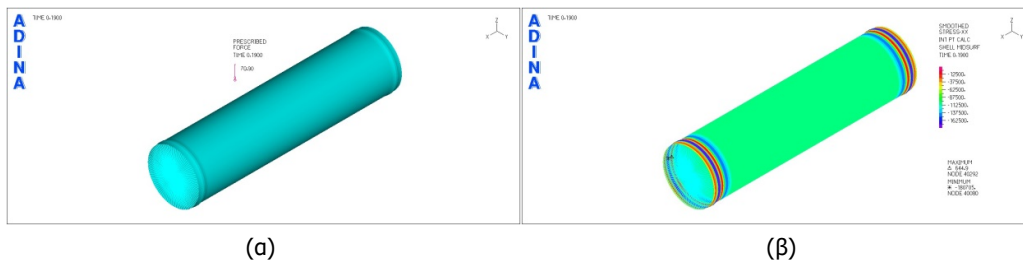
σημείο όσο και σε άλλα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-32, Εικόνα 3-33, Εικόνα 3-34 και Εικόνα 3-35).



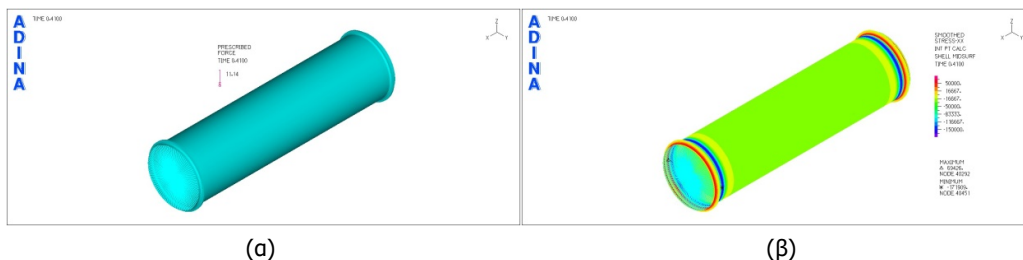
Εικόνα 3-32: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-33: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

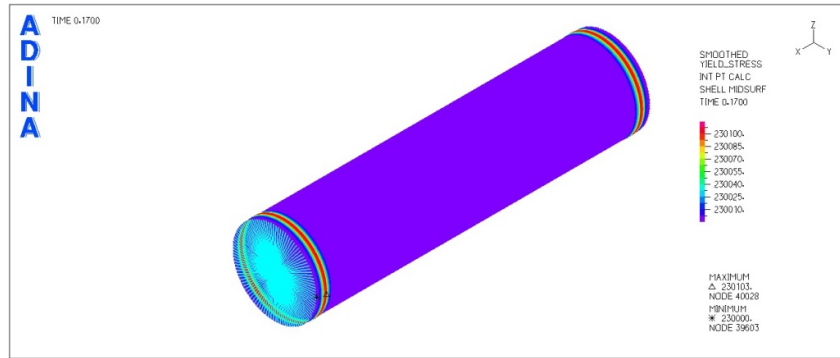


Εικόνα 3-34: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 3-35: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

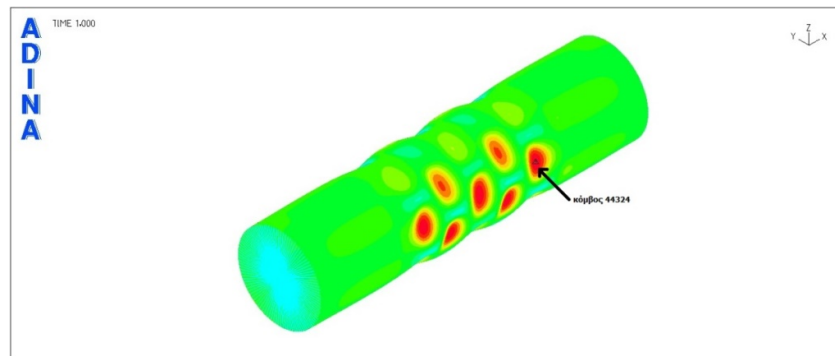
Όπως εξάγεται από την κατανομή των τάσεων, ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται ενώ το υλικό είναι ακόμα στην γραμμική περιοχή (Εικόνα 3-36). Συγκεκριμένα, ακόμα και το σημείο 4, που σηματοδοτεί το τέλος του δρόμου ισορροπίας και η τιμή του φορτίου έχει πλέον μειωθεί πάρα πολύ, ο χάλυβας παραμένει στη γραμμική περιοχή σε όλο το εύρος του κελύφους, με εξαίρεση τα άκρα, όπου κυριαρχεί ο τοπικός λυγισμός και εκεί η τιμή της τάσης κυμαίνεται κοντά στη τιμή της τάσης διαρροής χωρίς όμως να λαμβάνει την τιμή αυτή.



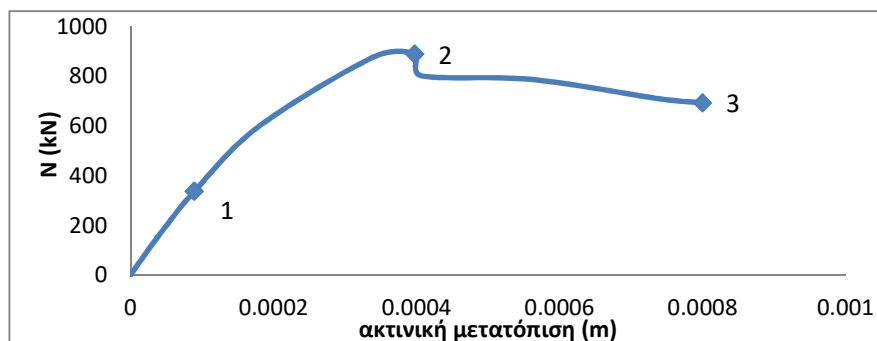
Εικόνα 3-36: : Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 2)

3.4.2.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες πραγματοποιείται και για την περίπτωση ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα, λαμβάνοντας μέγεθος ατέλειας με βάση τον Πίνακα 3-8 και σχήμα ατέλειας την 1^η ιδιομορφή, όπως αυτή προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε φαίνεται στο διάγραμμα 3-10, όπου και πάλι στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί το επιβαλλόμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 44324, ο οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και ο οποίος εικονίζεται στην Εικόνα 3-37.



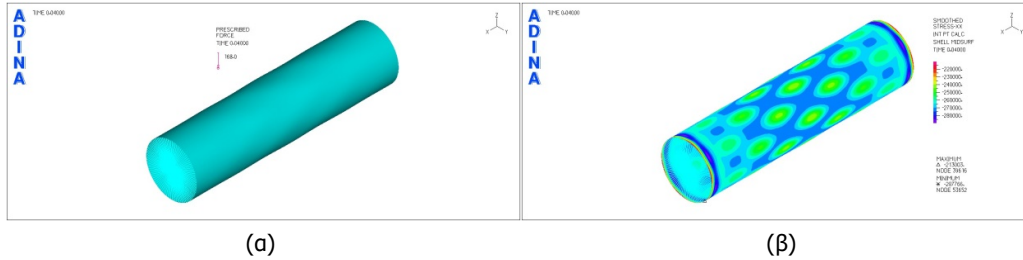
Εικόνα 3-37: Θέση του κόμβου 44324, ο οποίος αναπτύσσει τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση



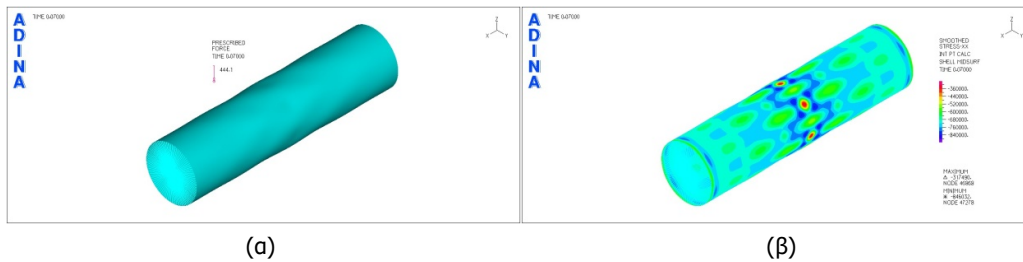
Διάγραμμα 3-10: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες

Όπως ήταν αναμενόμενο, ο δρόμος ισορροπίας είναι εξ αρχής έντονα μη γραμμικός, εξαιτίας της φύσης του φορέα, ο οποίος είναι ιδιαίτερα επιρρεπής σε φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Εμφανίζει επίσης καθοδικό κλάδο, ο μέσος ρυθμός όμως πτώσης του φορτίου δεν είναι έντονος, πιο συγκεκριμένα διατηρείται σχεδόν σταθερό μετά την απότομη πτώση του από το οριακό σημείο, όπου και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του $N_U = 444.127\text{kN}$. Εικόνες

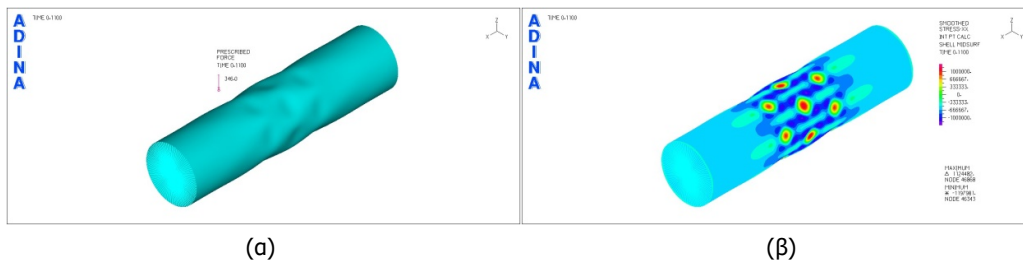
τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-38, Εικόνα 3-39 και Εικόνα 3-40).



Εικόνα 3-38: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1

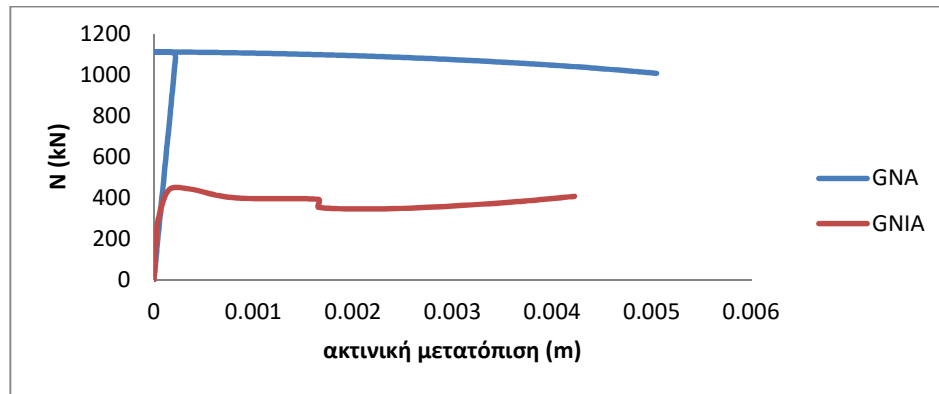


Εικόνα 3-39: α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



Εικόνα 3-40: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

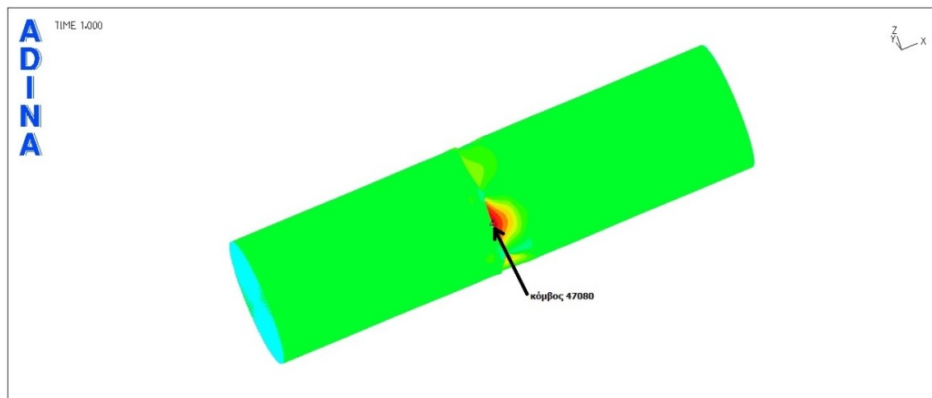
Και πάλι η επιρροή της ατέλειας φαίνεται να είναι καθοριστική τόσο στην απόκριση του φορέα, όσο και στη διαμόρφωση της τελικής του αντοχής. Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-11, η ατέλεια καθιστά τον νέο δρόμο ισορροπίας έντονα μη γραμμικό σε αντίθεση με τον αρχικό και μάλιστα μειώνει το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο κατά 60.12%. Παρατηρείται, επίσης η μείωση της ικανότητας ανάπτυξης παραμορφώσεων στη διατομή, μετά την εισαγωγή της ατέλειας, γεγονός που υπογραμμίζει την μείωση της πλαστιμότητας μετακινήσεων του στοιχείου κατά 16.32%. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται στην περίπτωση χάλυβα ψυχρής έλασης, όπου όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-5 η πλαστιμότητα του φορέα και με τις δυο αναλύσεις κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα.



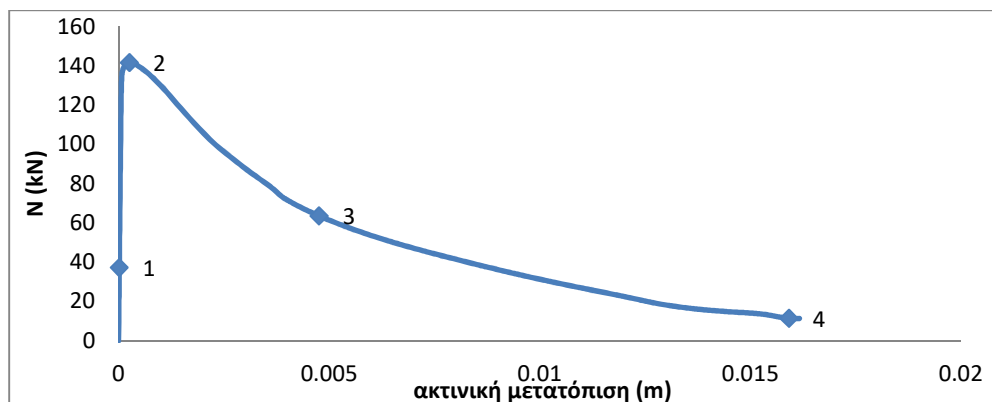
Διάγραμμα 3-11: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και χωρίς

3.4.2.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες πραγματοποιήθηκε, προκειμένου να εξαχθεί μια ακριβής εικόνα για την απόκριση του φορέα, η οποία να είναι όσο το δυνατόν πιο ταιριαστή με την πραγματική. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε φαίνεται στο διάγραμμα 3-12, όπου στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί το επιβαλλόμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 47080, ο οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά το πέρασ της ανάλυσης και ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 3-41.

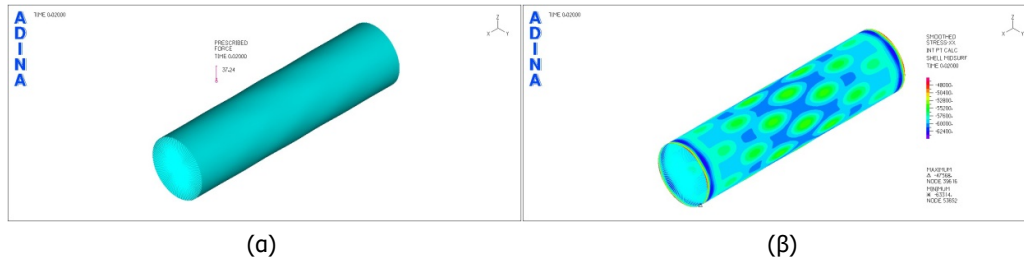


Εικόνα 3-41: Θέση του κόμβου 47080, ο οποίος αναπτύσσει τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση

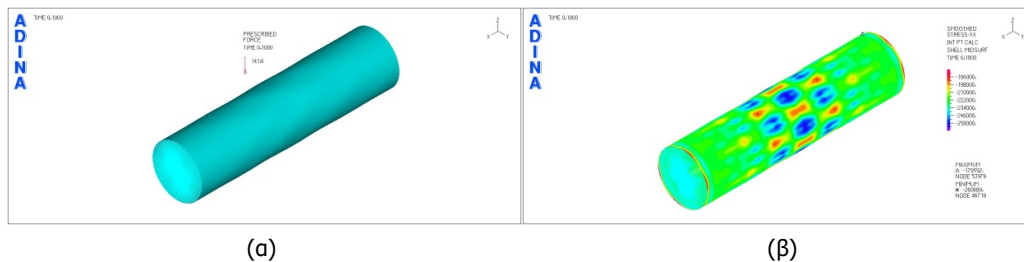


Διάγραμμα 3-12: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

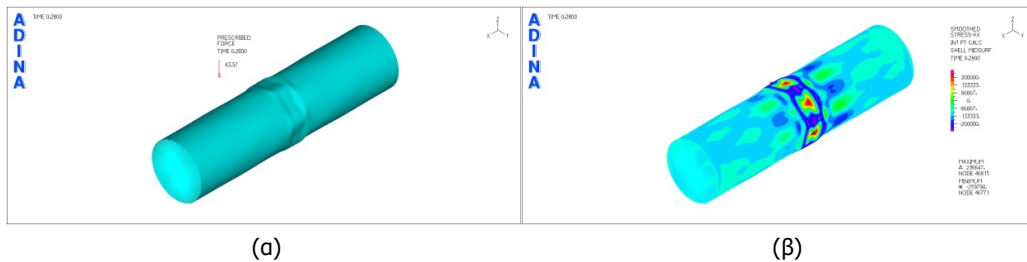
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3-12 ο δρόμος ισορροπίας για την μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής. Ο ρυθμός πτώσης του φορτίου είναι έντονος, με τη μέγιστη τιμή του φορτίου που είναι δυνατόν να φέρει ο φορέας να αντιστοιχεί σε $N_U = 141.6\text{kN}$. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-42, Εικόνα 3-43, Εικόνα 3-44 και Εικόνα 3-45).



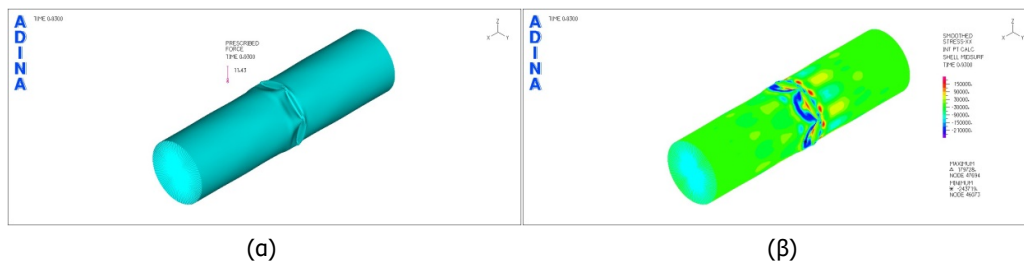
Εικόνα 3-42: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-43: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



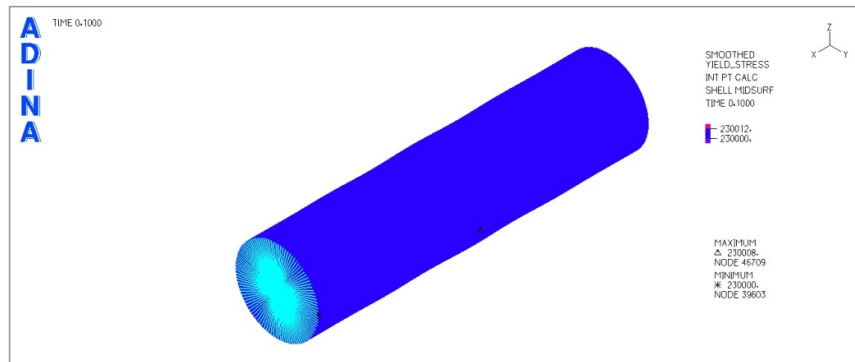
Εικόνα 3-44: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



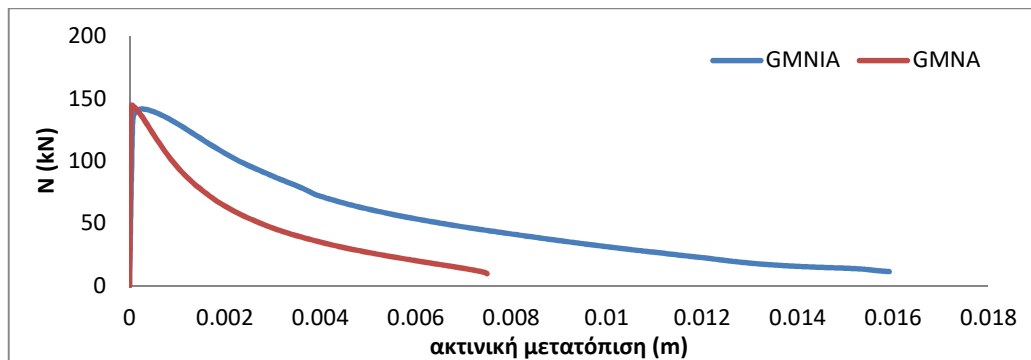
Εικόνα 3-45: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Παρατηρώντας την κατανομή των τάσεων στα διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας, παρατηρείται ότι, η ατέλεια μετατοπίζει τη θέση εμφάνισης του τοπικού λυγισμού στο μέσον του κελύφους. Το κέλυφος την στιγμή εμφάνισης του τοπικού λυγισμού εμφανίζει

τάσεις με τιμή πολύ κοντά στην τιμή της τάσης διαρροής (Εικόνα 3-46), γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στο ότι οι ανοξείδωτοι χάλυβες εμφανίζουν χαμηλότερο όριο διαρροής από τον χάλυβα που έχει υποστεί εν ψυχρώ έλαση. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-13, η εισαγωγή της ατέλει μειώνει το μέγιστο φορτίο σε ποσοστό 2.11%, ωστόσο ο ρυθμός μείωσης του φορτίου σε αυτή την περίπτωση δεν είναι τόσο έντονος, όσο στην περίπτωση που δεν υπάρχει ατέλεια. Ουσιαστικά, η ατέλεια καθιστά το φορέα ελάχιστα πιο πλάστιμο, καθώς η διατομή αναπτύσσει παραμορφώσεις μέχρι το φορτίο να μειωθεί σημαντικά, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει όταν απουσιάζει η ατέλεια, αφού η πτώση του φορτίου είναι απότομη μετά το οριακό σημείο.



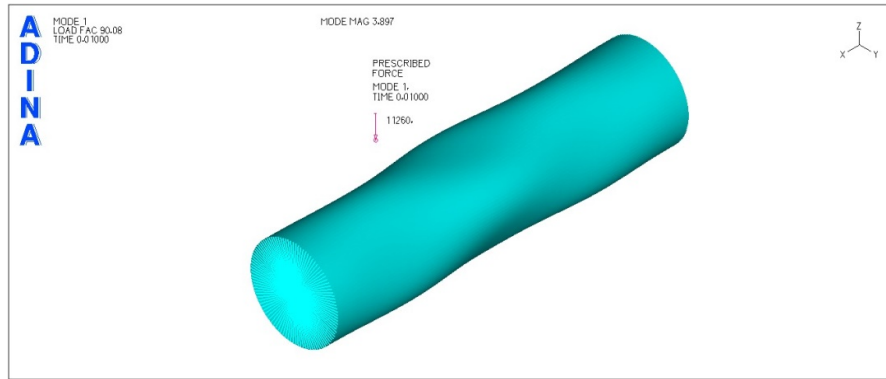
Εικόνα 3-46: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 2)



Διάγραμμα 3-13: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και χωρίς

3.4.3 Μη λεπτότοιχη διατομή από χάλυβα ψυχρής έλασης

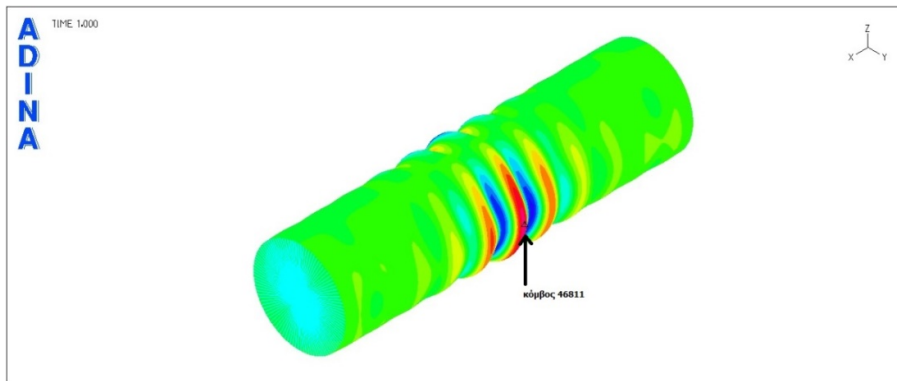
Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διατομή πάχους $t=4\text{mm}$, η οποία προσομοιώθηκε με 14418 στοιχεία. Η 1^η ιδιομορφή που προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού απεικονίζεται στην Εικόνα 3-47.



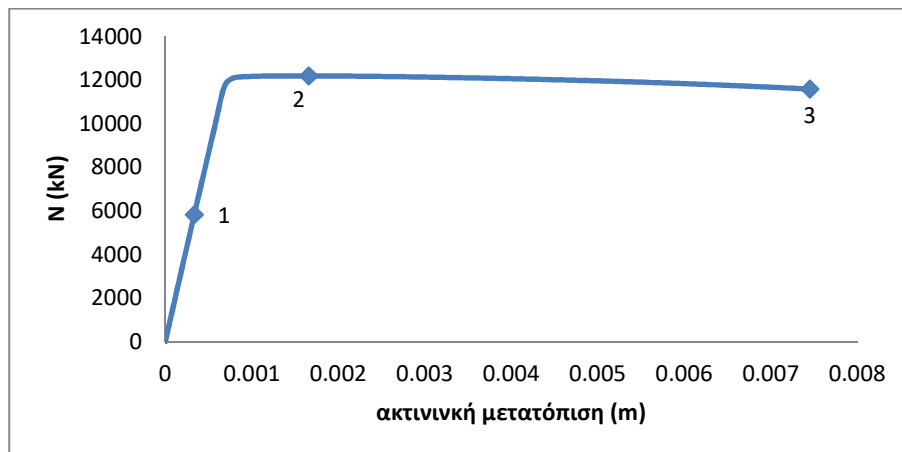
Εικόνα 3-47: 1^η ιδιομορφή λυγισμού μη λεπτότοιχης διατομής- $N_{cr}=11260\text{kN}$

3.4.3.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Ο δρόμος ισορροπίας από την γραμμική ανάλυση γεωμετρίας φαίνεται στο διάγραμμα 3-14, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετήθηκε το επιβαλλόμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 46811, οποίος κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης εμφάνισε την μεγαλύτερη ακτινική μετατόπιση και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-48.



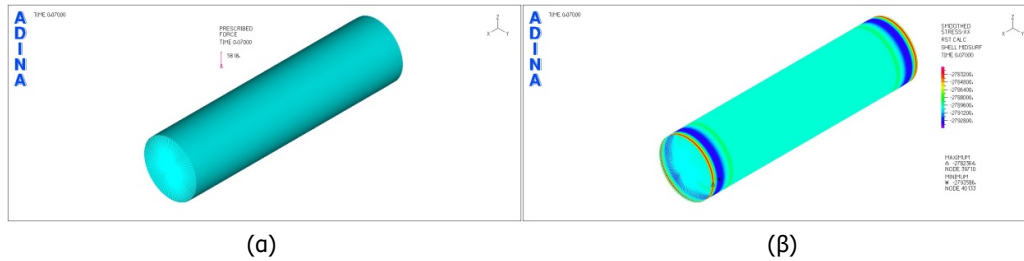
Εικόνα 3-48: Θέση κόμβου 46811, οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση



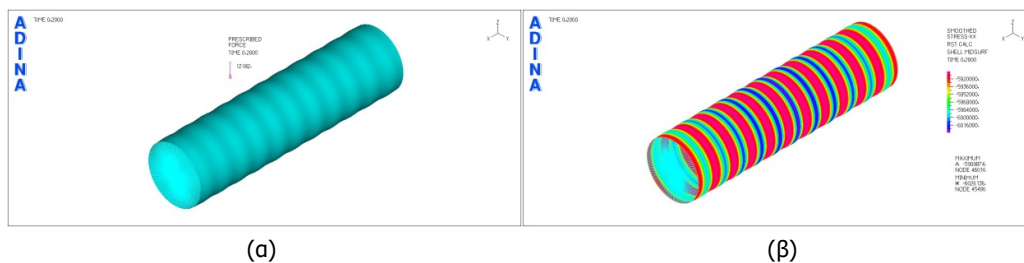
Διάγραμμα 3-14: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Ο δρόμος ισορροπίας, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, είναι μη γραμμικός και ασταθής, καθώς εμφανίζει καθοδικό κλάδο. Ωστόσο, ο ρυθμός πτώσης του φορτίου είναι πολύ μικρός, με αποτέλεσμα η διατομή να διατηρεί πρακτικά μεγάλο μέρος της αντοχής της,

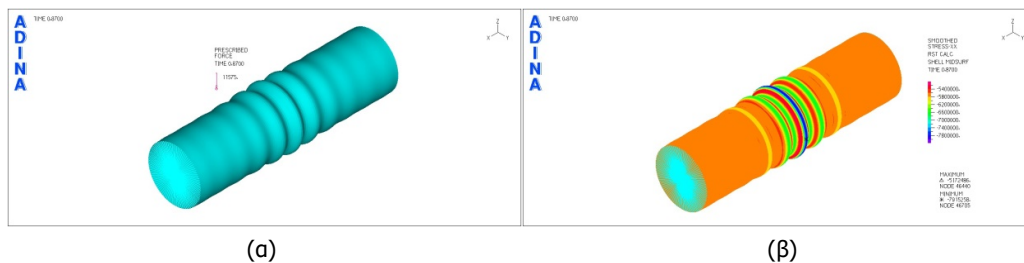
καθώς παραμορφώνεται. Η μέγιστη τιμή του φορτίου που αντέχει η διατομή είναι $N_u = 12182\text{kN}$. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-49, Εικόνα 3-50 και Εικόνα 3-51).



Εικόνα 3-49: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



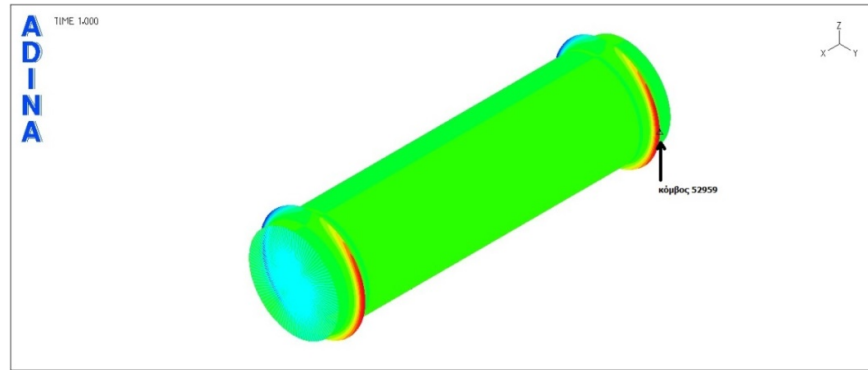
Εικόνα 3-50: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



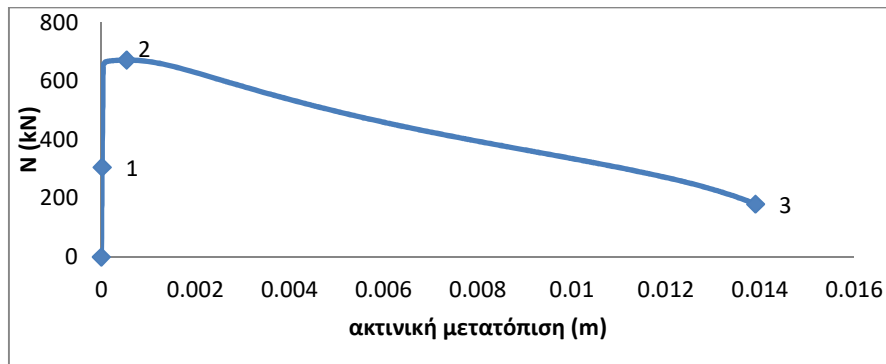
Εικόνα 3-51: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

3.4.3.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Για τη πραγματοποίηση μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού, λήφθηκε κράτυση για το χάλυβα ψυχρής έλασης, η οποία υπολογίστηκε με βάση την μέθοδο συνεχούς αντοχής από την εξίσωση (2-15). Ο δρόμος ισορροπίας για συνδυασμό μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού απεικονίζεται γραφικά στο διάγραμμα 3-15, όπου στον κατακόρυφα άξονα φαίνεται το ασκούμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 52959, οποίος κατά το πέρας της ανάλυσης εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και εικονίζεται στην Εικόνα 3-52.

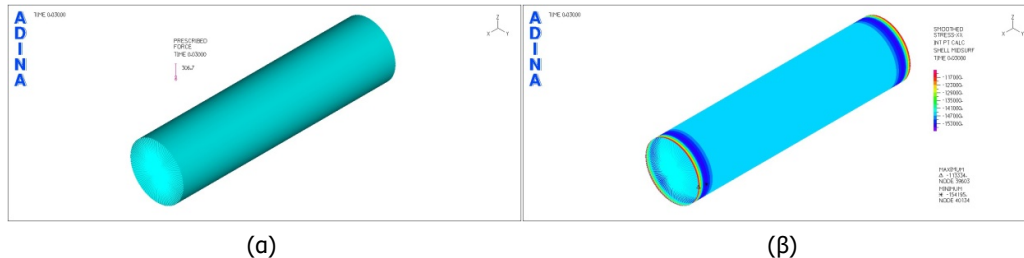


Εικόνα 3-52: Θέση κόμβου 52959, οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

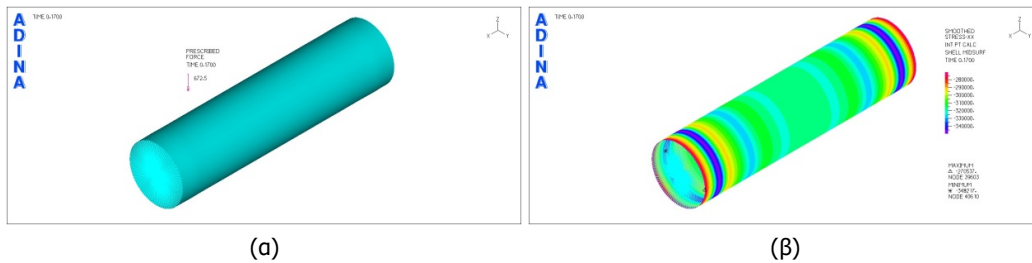


Διάγραμμα 3-15: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

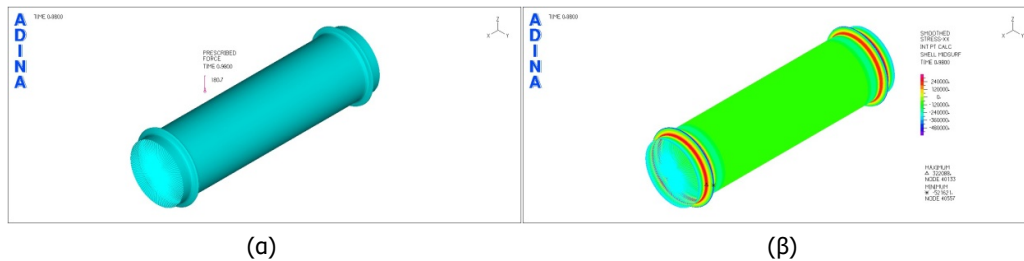
Ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός, καθώς η διατομή ως μη λεπτότοιχη εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε φαινόμενα μη γραμμικότητας υλικού και όχι τόσο σε φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας, όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης (διάγραμμα 3-14). Ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει επίσης αστάθεια μετά την μεγιστοποίηση του φορτίου, με ρυθμό πτώσης εντονότερο από την περίπτωση μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η εισαγωγή του υλικού στην μη γραμμική περιοχή έχει ως αποτέλεσμα η διατομή να μη διατηρεί την αντοχή της μέχρι την τελική αστοχία, αλλά να χάνει έως και το 73.14% του φορτίου αντοχής, το οποίο αντιστοιχεί σε $N_U = 672.5\text{kN}$. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-53, Εικόνα 3-54 και Εικόνα 3-55).



Εικόνα 3-53: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο1

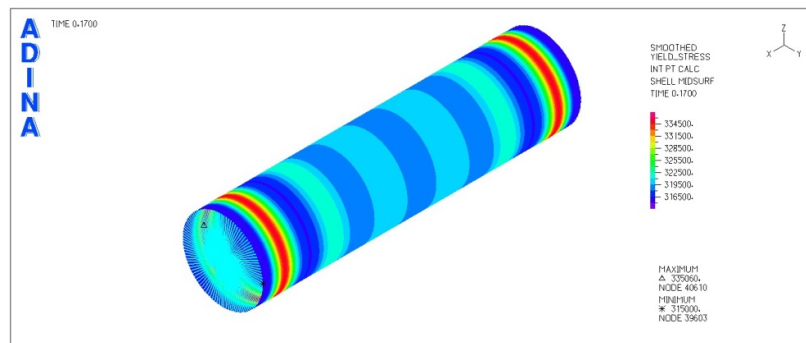


Εικόνα 3-54: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



Εικόνα 3-55: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

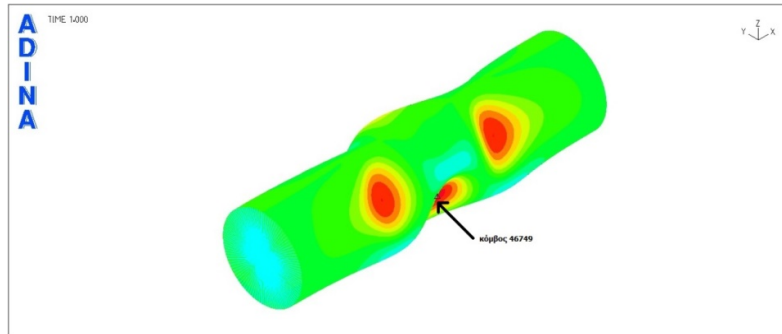
Κρίνοντας από την κατανομή των τάσεων στο οριακό σημείο του δρόμου ισορροπίας (σημείο 2), ο τοπικός λυγισμός έπεται της διαρροής του υλικού. Οι τάσεις σε όλο το εύρος του κελύφους εμφανίζουν τιμή που ξεπερνά αυτή της τάσης διαρροής με τη μεγαλύτερη τιμή να εμφανίζεται λίγο πριν το άκρο του κελύφους εκεί όπου πρόκειται να εμφανιστεί ο τοπικός λυγισμός. (Εικόνα 3-56). Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου της συνεχούς αντοχής, που υποδεικνύει ότι οι μη λεπτότοιχες διατομές εκμεταλλεύονται την κράτυνση του χάλυβα, αφού ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται όταν πλέον το υλικό έχει εισαχθεί στην κρατυνόμενη περιοχή.



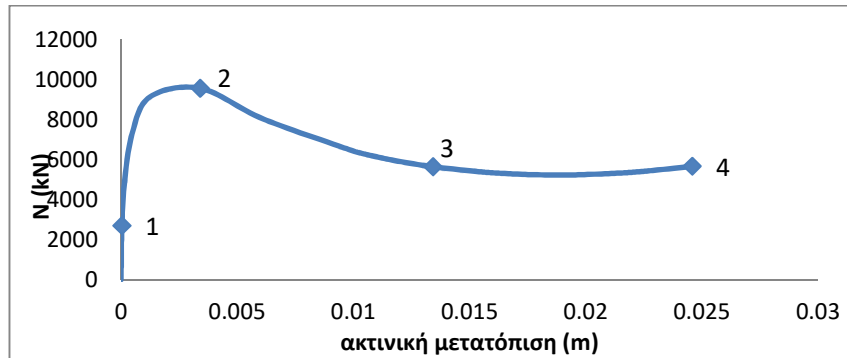
Εικόνα 3-56: Κατανομή των τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής στο σημείο 2

3.4.3.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες πραγματοποιείται για τη μη λεπτότοιχη διατομή από χάλυβα ψυχρής έλασης, λαμβάνοντας μέγεθος ατέλειας με βάση τον Πίνακα 3-7 και σχήμα ατέλειας την 1^η ιδιομορφή, όπως αυτή προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού. Ο δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες απεικονίζεται γραφικά στο διάγραμμα 3-16, όπου στο κατακόρυφο άξονα σημειώνεται το επιβαλλόμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 46749, ο οποίος μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης ανέπτυξε την μεγαλύτερη ακτινική μετατόπιση και φαίνεται στην Εικόνα 3-57.

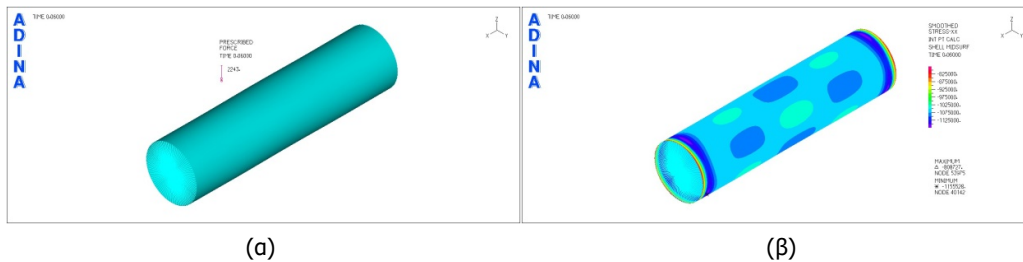


Εικόνα 3-57: Θέση του κόμβου 46749, ο οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

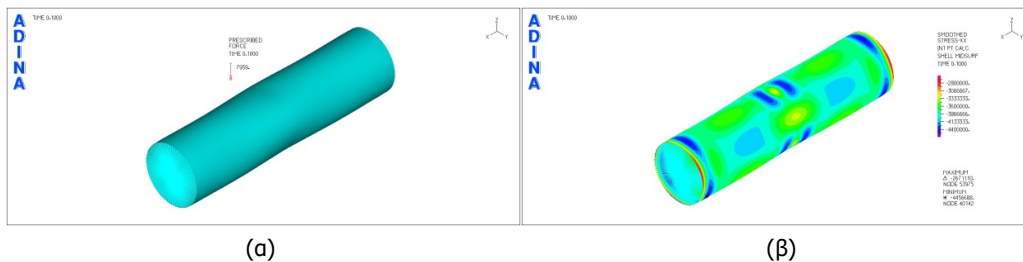


Διάγραμμα 3-16: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

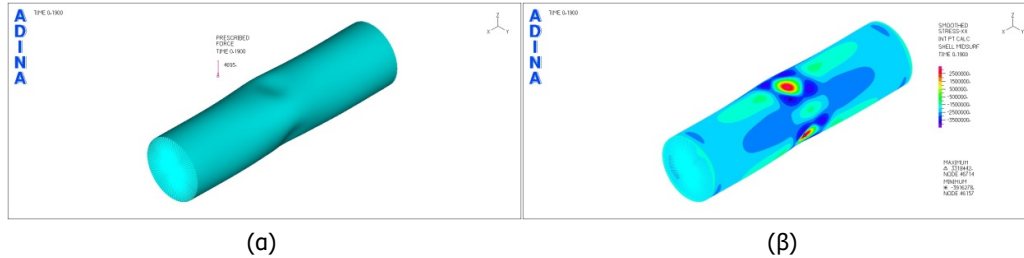
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3-16, η ατέλεια δημιουργεί ευαισθησία της μη λεπτότοιχης διατομής σε φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Αυτό εξάγεται από το γεγονός ότι ο δρόμος ισορροπίας γίνεται έντονα μη γραμμικός, με καθοδικό κλάδο, ο οποίος μάλιστα εμφανίζει και έντονο ρυθμό πτώσης του φορτίου. Το μέγιστο φορτίο αναπτύσσεται στο οριακό σημείο και αντιστοιχεί σε $N_u = 9550.5\text{kN}$. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. (Εικόνα 3-58, Εικόνα 3-59, Εικόνα 3-60 και Εικόνα 3-61).



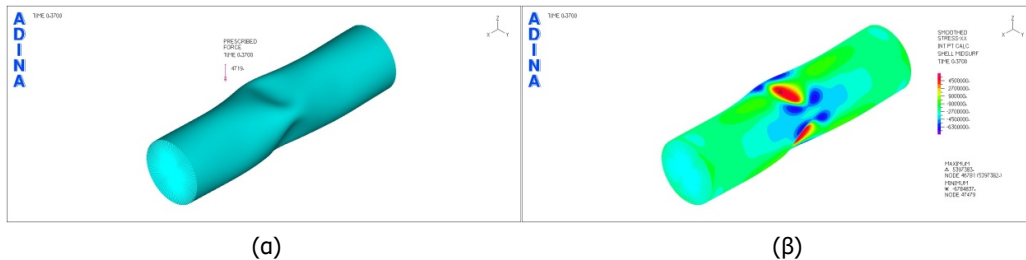
Εικόνα 3-58: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-59: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

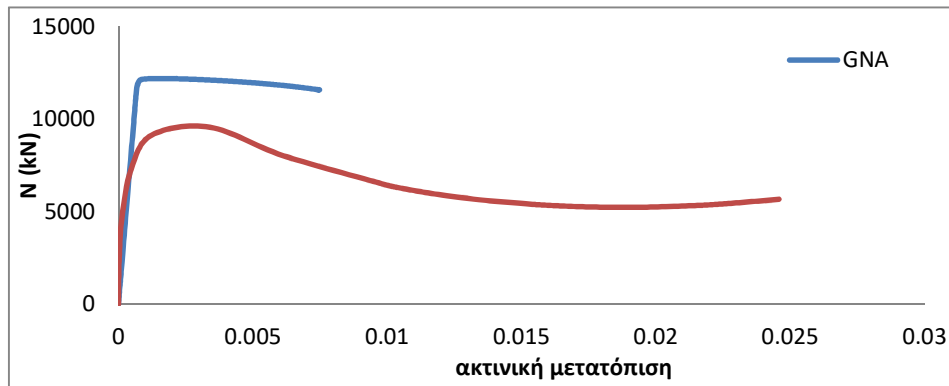


Εικόνα 3-60: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 3-61: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο

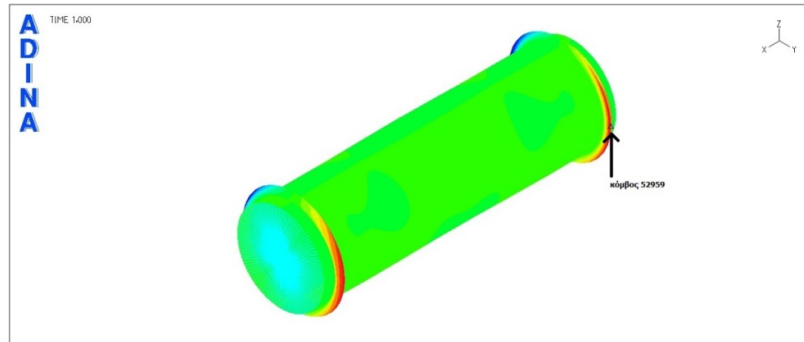
Η εισαγωγή ατέλειας ενισχύει τη γεωμετρική μη γραμμικότητα του φορέα και μεταβάλλει την απόκριση και την τιμή της τελικής του αντοχής. Χαρακτηριστικά, η αντοχή μειώνεται κατά 21.6%, ωστόσο η διατομή αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις μέχρι να μηδενιστεί πρακτικά το φορτίο. Αυτό δηλώνει ότι η ατέλεια καθιστά τον φορέα πιο πλάστιμο, με την αύξηση της πλαστιμότητας μετακινήσεων της διατομής να είναι της τάξης του 69.68%. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται και γραφικά στο διάγραμμα 3-17.



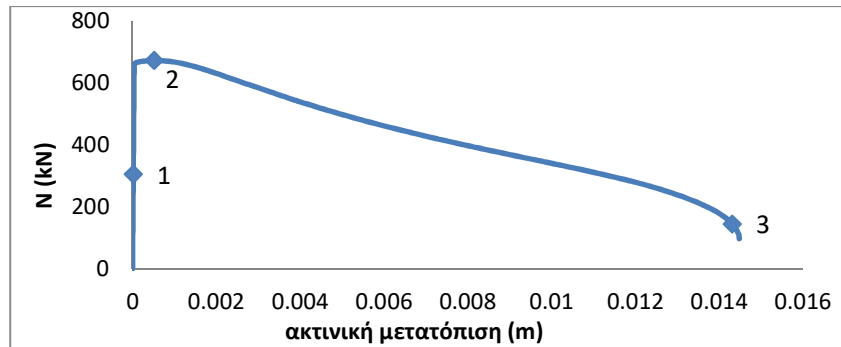
Διάγραμμα 3-17: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και χωρίς

3.4.3.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

Προκειμένου να εξαχθεί τόσο η ακριβής τιμή της αντοχής της διατομής, όσο και η απόκριση που να ομοιάζει όσο το δυνατόν με την πραγματική, διεξάχθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε φαίνεται στο διάγραμμα 3-18, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετήθηκε το επιβαλλόμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 52959, οποίος εμφανίζει κατά το πέρας της ανάλυσης τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-62.

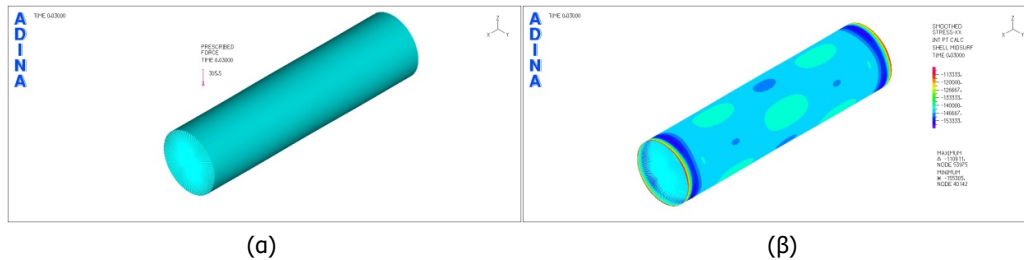


Εικόνα 3-62: Θέση του κόμβου 52959, ο οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

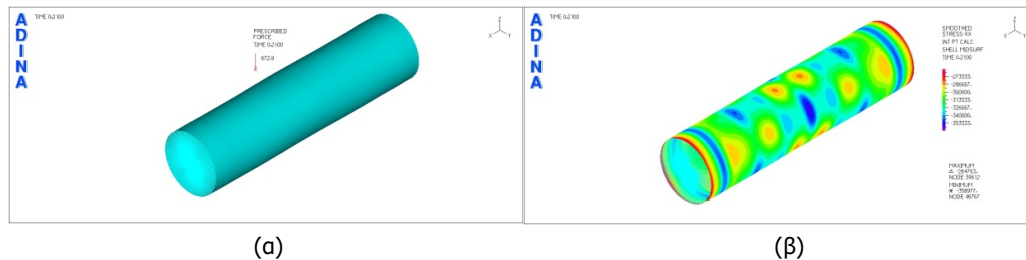


Διάγραμμα 3-18: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

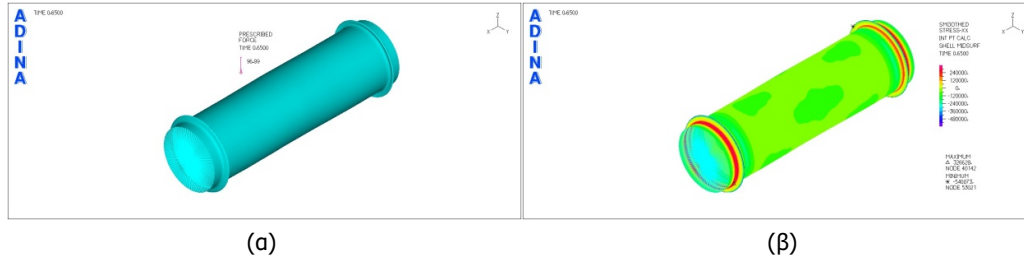
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-18, ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός και ασταθής. Η μέγιστη τιμή του φορτίου εμφανίζεται στο οριακό σημείο (σημείο 2) και αντιστοιχεί στην τιμή $N_U = 672.936\text{kN}$. Στη συνέχεια το φορτίο μειώνεται, με ήπιο ρυθμό μεταβολής, με αποτέλεσμα η διατομή να αναπτύσσει μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι πρακτικά το φορτίο να μηδενιστεί. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. (Εικόνα 3-63, Εικόνα 3-64, Εικόνα 3-65 και Εικόνα 3-66).



Εικόνα 3-63: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1

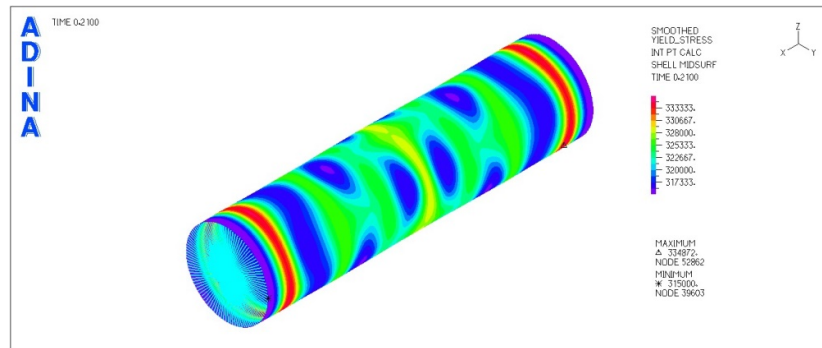


Εικόνα 3-64: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

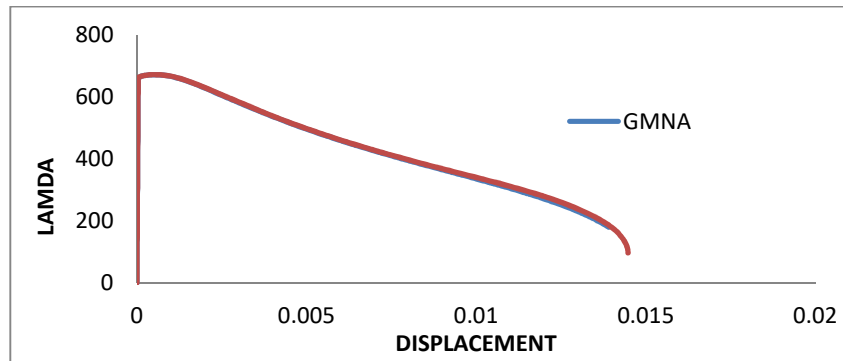


Εικόνα 3-65: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες παραμόρφωσης, η ατέλεια δεν μετατοπίζει τη θέση εμφάνισης του τοπικού λυγισμού, όπως συμβαίνει με τις λεπτότοιχες διατομές. Από την κατανομή των τάσεων προκύπτει ότι τη στιγμή μεγιστοποίησης του φορτίου (σημείο 2) οι τάσεις σε όλο το μήκος του κελύφους έχουν ξεπεράσει την τιμή της τάσης διαρροής και εμφανίζουν μέγιστη τιμή κοντά στα άκρα του, στις θέσεις δηλαδή που αναμένεται να εμφανιστεί στη συνέχεια ο τοπικός λυγισμός (Εικόνα 3-66). Επομένως, ο τοπικός λυγισμός έπεται της διαρροής του υλικού. Επίσης, συγκρίνοντας του δυο δρόμους ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και χωρίς παρατηρείται ότι σχεδόν ταυτίζονται (διάγραμμα 3-19). Αναλυτικότερα, η εισαγωγή της ατέλειας αυξάνει το μέγιστο φορτίο αντοχής κατά 0.07% και την ικανότητα της διατομής να παραμορφώνεται κατά 3.95%. Εξάγεται, επομένως, το συμπέρασμα ότι η εισαγωγή της ατέλειας σε μια μη λεπτότοιχη διατομή μεταβάλλει την τελική τιμή της αντοχής και την απόκριση της, όταν δεν υπεισέρχεται στο πρόβλημα η μη γραμμικότητα του υλικού. Αντιθέτως, όταν συνδυάζεται με τη γραμμικότητα υλικού μεταβάλλει ελάχιστα την τελική αντοχή και αυξάνει την πλαστικότητα μετακινήσεων της διατομής.



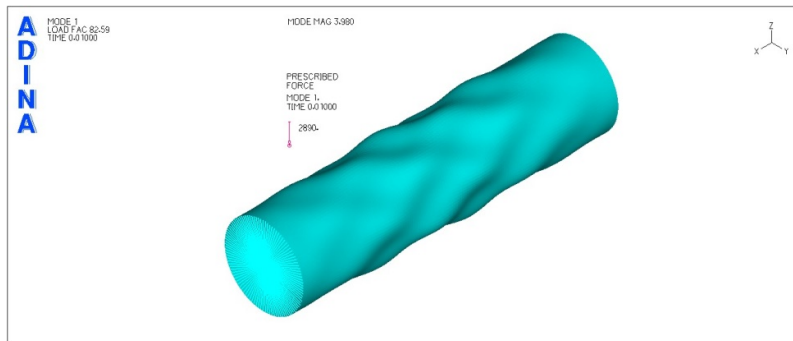
Εικόνα 3-66: Κατανομή των τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής στο σημείο 2



Διάγραμμα 3-19: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με στέλειες και χωρίς

3.4.4 Μη λεπτότοιχη διατομή από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα

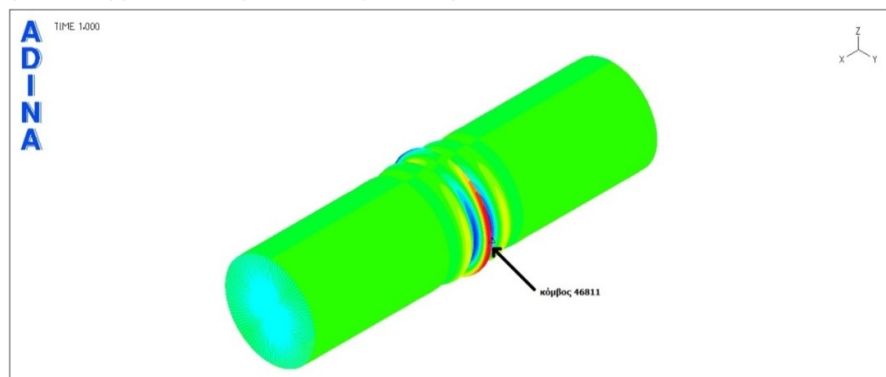
Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διατομή πάχους $t=2\text{mm}$, η οποία προσομοιώθηκε με 14418 στοιχεία. Η 1^η ιδιομορφή που προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού απεικονίζεται στην Εικόνα 3-67.



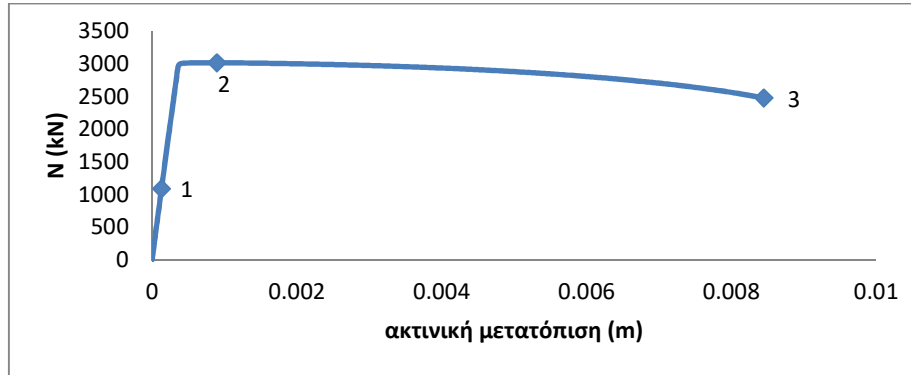
Εικόνα 3-67: 1^η ιδιομορφή λυγισμού μη λεπτότοιχης διατομής-Ncr=2890kN

3.4.4.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Ο δρόμος που αντιστοιχεί σε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3-20, όπου στον κατακόρυφα άξονα τοποθετείται το ασκούμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 46811, οποίος κατά το πέρας της ανάλυσης εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και εικονίζεται στην Εικόνα 3-66.

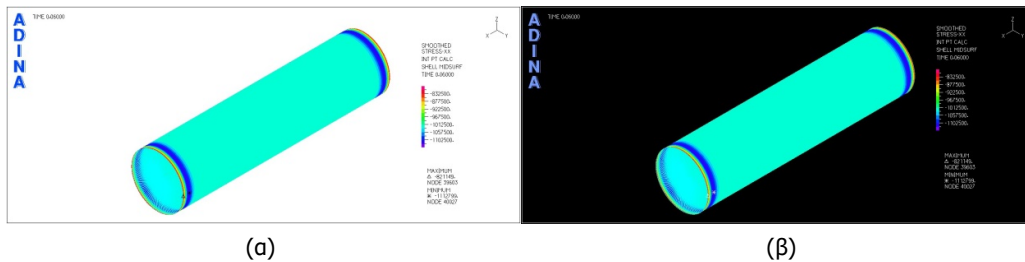


Εικόνα 3-68: Θέση του κόμβου 46811, ο οποίος εμφανίζει τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση

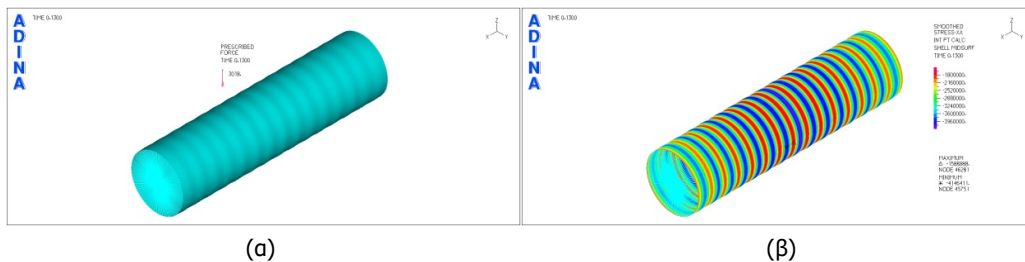


Διάγραμμα 3-20: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

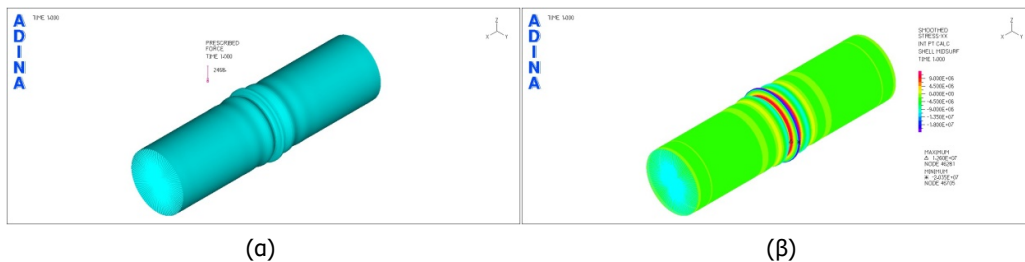
Όπως εξάγεται από το διάγραμμα 3-20, ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει ήπια μη γραμμικότητα, γεγονός που υπογραμμίζει την όχι και τόσο μεγάλη ευαισθησία των μη λεπτότοιχων διατομών σε γεωμετρική μη γραμμικότητα. Το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται ισούται με $N_u = 3017.8 \text{ kN}$ και στη συνέχεια το φορτίο μειώνεται με αργό σχετικά ρυθμό. Κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης, η οποία και σηματοδοτεί την αστοχία του φορέα, η διατομή έχει χάσει έως και 18.23% της αντοχής της. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 3-69, Εικόνα 3-70, Εικόνα 3-71).



Εικόνα 3-69: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



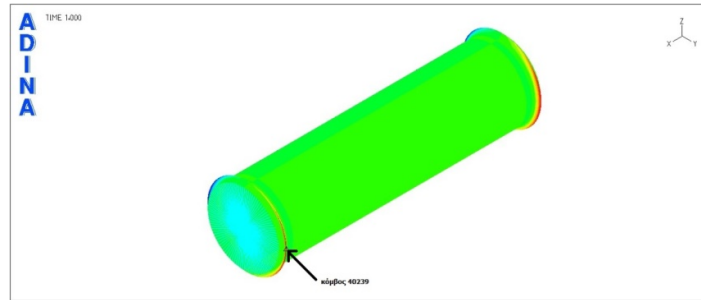
Εικόνα 3-70: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



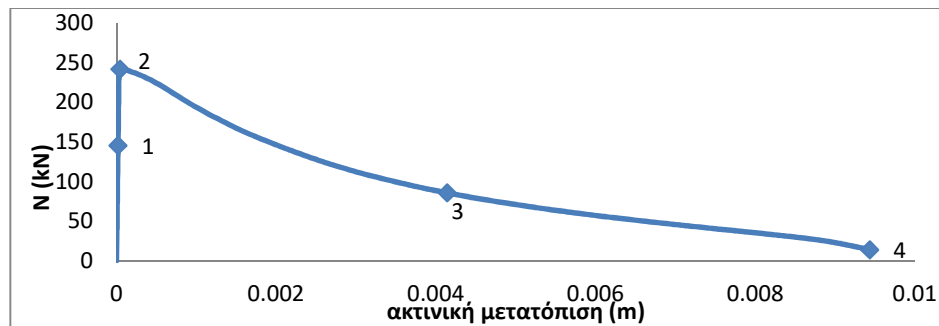
Εικόνα 3-71: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

3.4.4.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Για την μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού λήφθηκε κράτυνση για τον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, η οποία υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (2-17). Ο δρόμος ισορροπίας της ανάλυσης απεικονίζεται γραφικά στο διάγραμμα 3-21, όπου στον κατακόρυφα άξονα τοποθετείται επιβαλλόμενο φορτίο και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 40239, οποίος κατά το πέρασ της ανάλυσης εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και εικονίζεται στην Εικόνα 3-72.



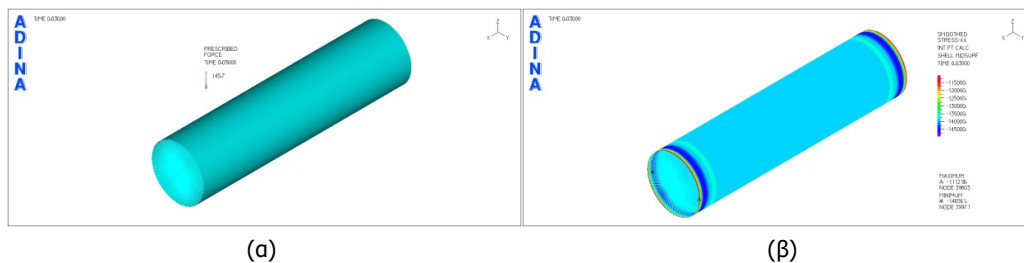
Εικόνα 3-72: Θέση του κόμβου 40239, ο οποίος εμφανίζει τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση



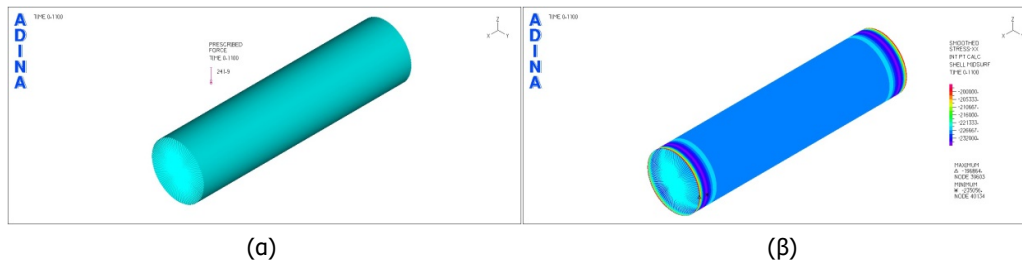
Διάγραμμα 3-21: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Ο δρόμος ισορροπίας σε αυτή την περίπτωση είναι έντονα μη γραμμικός, γεγονός που αποκαλύπτει την ευαισθησία της μη λεπτότοιχης διατομής στη μη γραμμικότητα του υλικού. Το φορτίο λαμβάνει την μέγιστη τιμή του, η οποία αντιστοιχεί σε $N_u = 241.942\text{kN}$ και στη συνέχεια μειώνεται με έντονο ρυθμό μέχρι να μηδενιστεί τελικά, όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση. Ουσιαστικά, μέχρι να αστοχήσει ο φορέας έχει χάσει το 94.34% της μέγιστης αντοχής του.

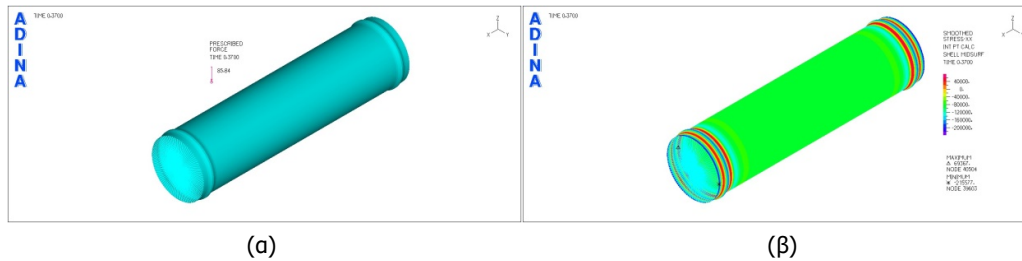
Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων στα διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-73, Εικόνα 3-74, Εικόνα 3-75 και Εικόνα 3-76).



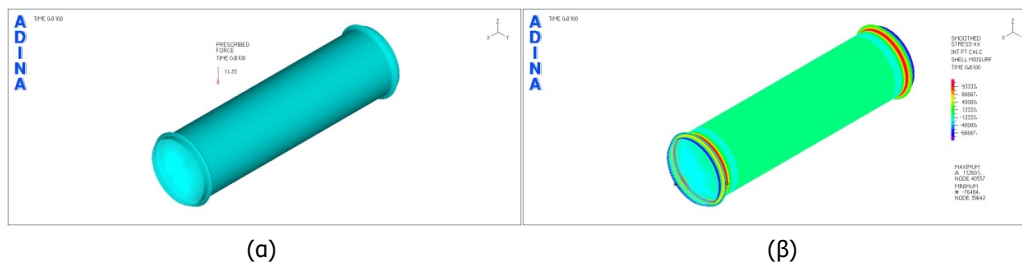
Εικόνα 3-73: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-74: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

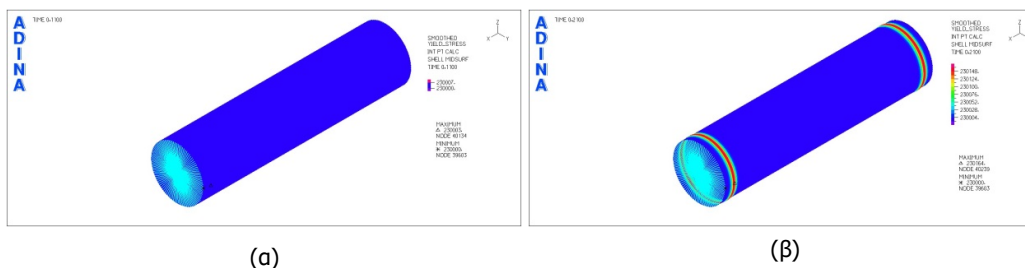


Εικόνα 3-75: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 3-76: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Από την κατανομή των τάσεων φαίνεται ότι τη στιγμή μεγιστοποίησης του φορτίου (σημείο 2) το υλικό έχει μόλις διαρρέυσει, ενώ δεν έχει εμφανιστεί πουθενά στο κέλυφος τοπικός λυγισμός (Εικόνα 3-77(α)). Κατά τον τοπικό λυγισμό οι τάσεις σε όλο το εύρος του κελύφους διατηρούν την τιμή της τάσης διαρροής, ενώ παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη τιμή στα άκρα όπου και συνέβη ο τοπικός λυγισμός (Εικόνα 3-78(β)). Όλα τα παραπάνω έρχονται να επιβεβαιώσουν την Μέθοδο της Συνεχούς Αντοχής για τις μη λεπτότοιχες διατομές.

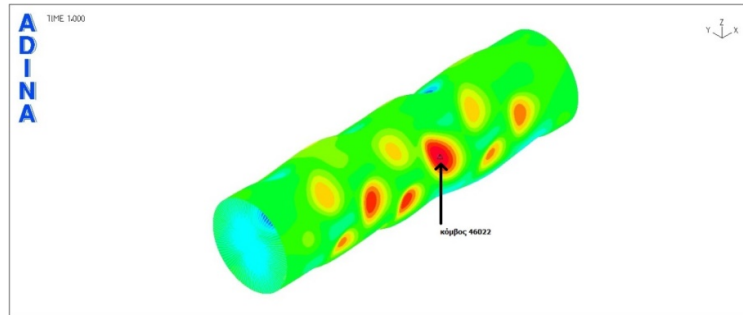


Εικόνα 3-77: (α) Κατανομή των τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής (α) στο σημείο 2 και (β) τη στιγμή εμφάνισης του τοπικού λυγισμού

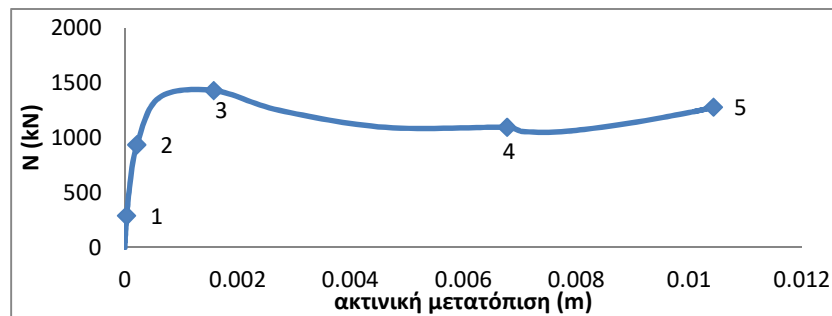
3.4.4.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ατέλεια για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, σύμφωνα με τον Πίνακα 3-8. Ο δρόμος ισορροπίας από αυτή

την ανάλυση φαίνεται στο διάγραμμα 3-22. Στο κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος παρουσιάζεται το επιβαλλόμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 46022, ο οποίος στο τέλος της ανάλυσης εμφάνισε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και απεικονίζεται στην Εικόνα 3-78.

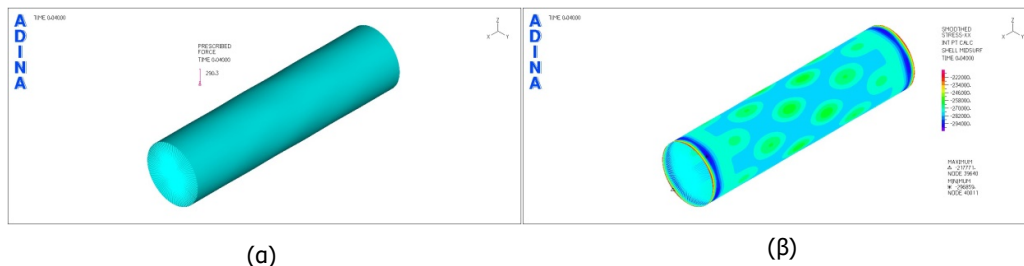


Εικόνα 3-78: Θέση κόμβου 46022, ο οποίος εμφάνισε τη μέγιστη ακτινική μετατόπιση

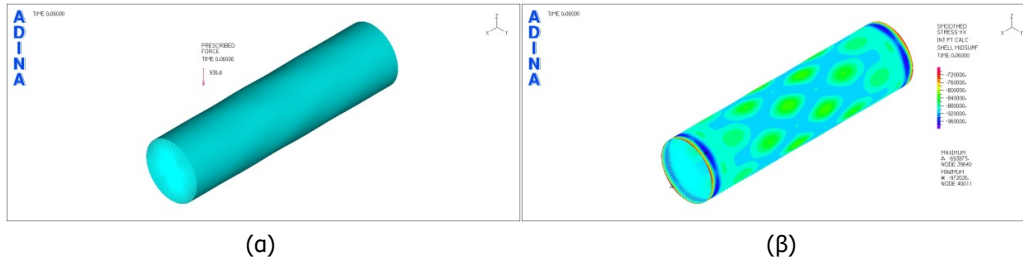


Διάγραμμα 3-22: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

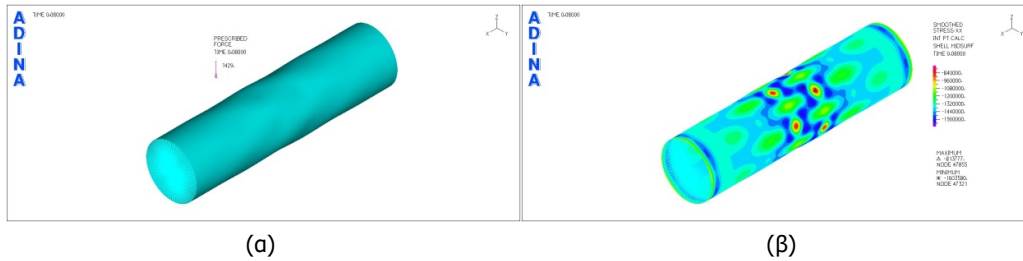
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 3-22, η εισαγωγή της ατέλειας μεταβάλλει την απόκριση του φορέα, το οποίο φαίνεται από την αλλαγή της μορφή του δρόμου ισορροπίας. Ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει μη γραμμικότητα εξ αρχής, ενώ παρουσιάζει και καθοδικό κλάδος μεταξύ των σημείων 3 και 4. Μετά το σημείο 4 παρατηρείται μια μικρή άνοδος του φορτίου κατά 16.15%, χωρίς όμως στο σημείο 5 η τιμή του φορτίου να ξεπερνά την μέγιστη τιμή, η οποία ισούται με $N_u = 1428.52\text{kN}$ και εμφανίζεται στο σημείο 3. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων στα διάφορα σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που απεικονίζονται στη συνέχεια (Εικόνα 3-79, 3-80, 3-81, 3-82, 3-83).



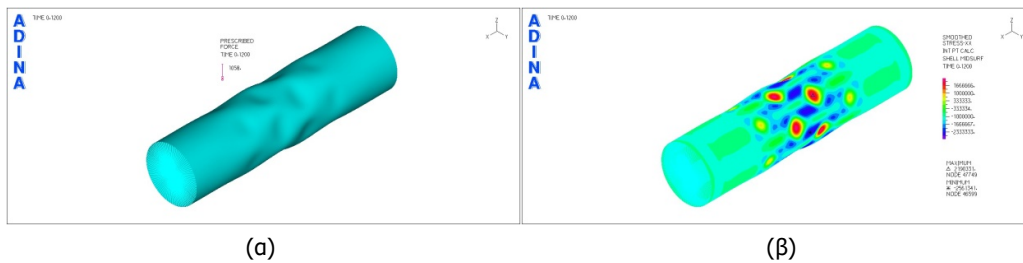
Εικόνα 3-79: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



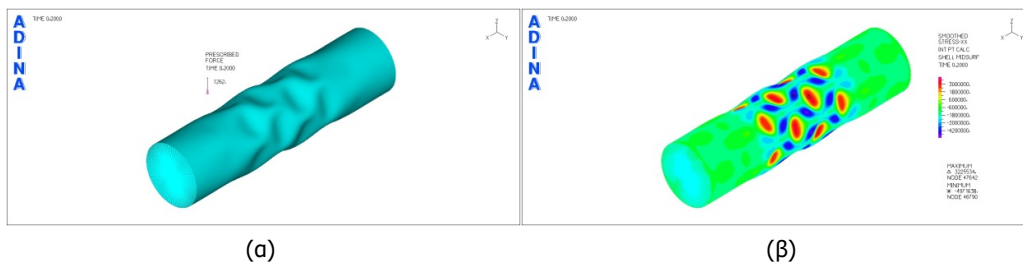
Εικόνα 3-80: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



Εικόνα 3-81: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

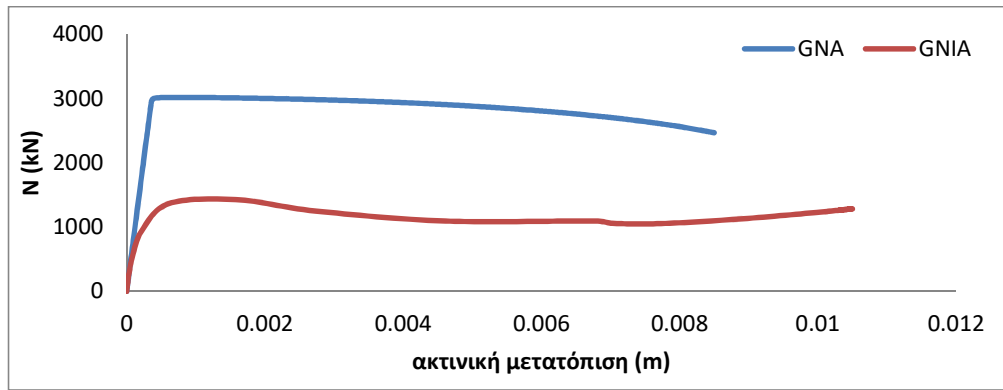


Εικόνα 3-82: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4



Εικόνα 3-83: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 5

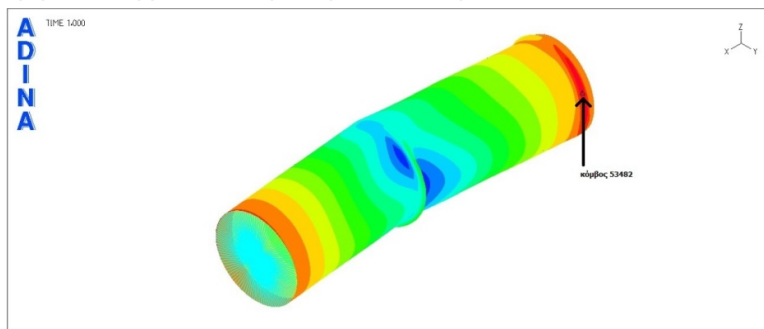
Η εισαγωγή της ατέλειας μεταβάλλει την τελική τιμή της αντοχής το φορέα, όπως αποτυπώνεται γραφικά στο διάγραμμα 3-23. Η αντοχή του φορέα μειώνεται κατά 52.65%, γεγονός που υπογραμμίζει την επιρροή της ατέλειας στην απόκριση του φορέα, ακόμα και για την περίπτωση της μη λεπτότοιχη διατομής.



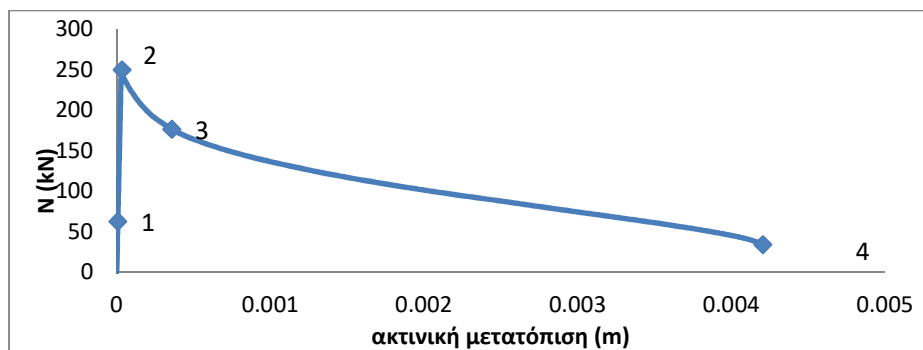
Διάγραμμα 3-23: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες και χωρίς

3.4.4.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες πραγματοποιήθηκε όπως και για προηγούμενες τρεις περιπτώσεις διατομών, προκειμένου να υπολογιστεί με ακρίβεια η τελική τιμή της αντοχής του φορέα και να εξαχθεί μια όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική εικόνα της απόκρισής του. Ο δρόμος ισορροπίας από την ανάλυση αυτή παρουσιάζεται γραφικά στο διάγραμμα 3-24. Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετήθηκε το ασκούμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 53482, οποίος στο τέλος της ανάλυσης εμφάνισε την μεγαλύτερη ακτινική μετατόπιση και φαίνεται στην Εικόνα 3-84.



Εικόνα 3-84: Θέση του κόμβου 53482, οποίος εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

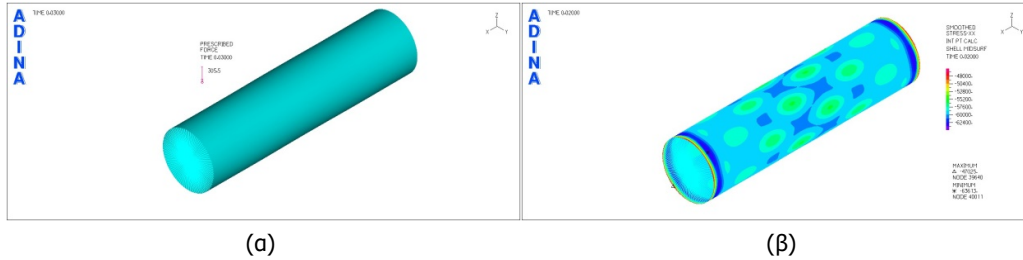


Διάγραμμα 3-24: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

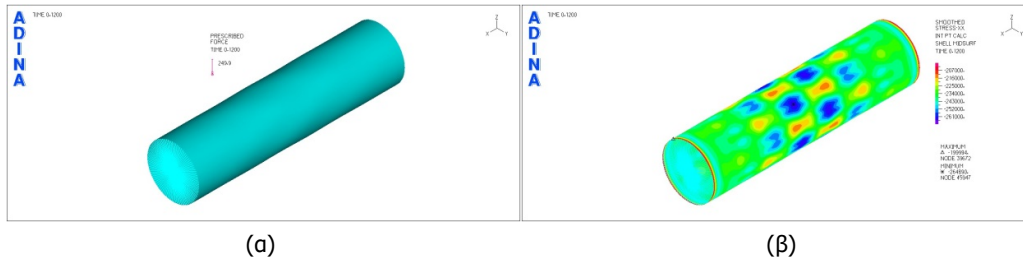
Ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός και ασταθής, όπως εξάγεται από το διάγραμμα 3-23. Η μέγιστη τιμή του φορτίου εμφανίζεται στο οριακό σημείο (σημείο 2) και αντιστοιχεί στην τιμή $N_u = 249.92 \text{ kN}$. Η ατέλεια αυξάνει τον ρυθμό πτώσης του φορτίου μετά το οριακό σημείο, με αποτέλεσμα το φορτίο να έχει μειωθεί κατά 86.58% έως την αστοχία του φορέα.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

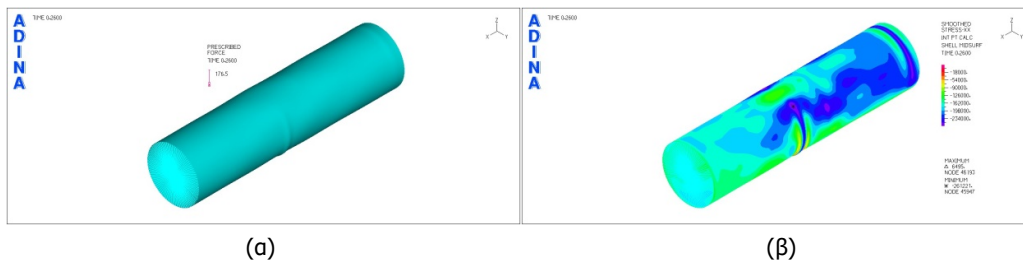
Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας απεικονίζονται παρακάτω. (Εικόνα 3-85, 3-86, 3-87, 3-88).



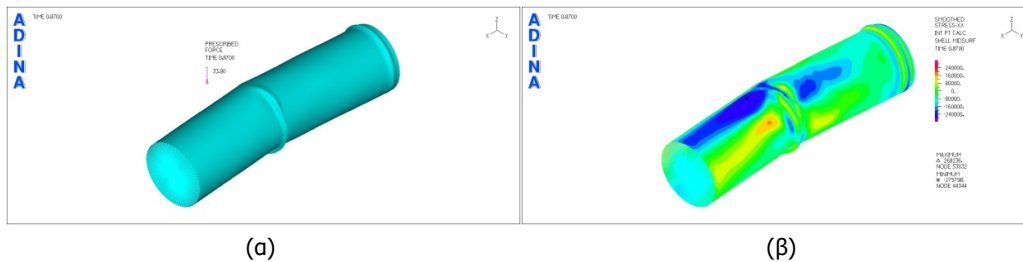
Εικόνα 3-85: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 3-86: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



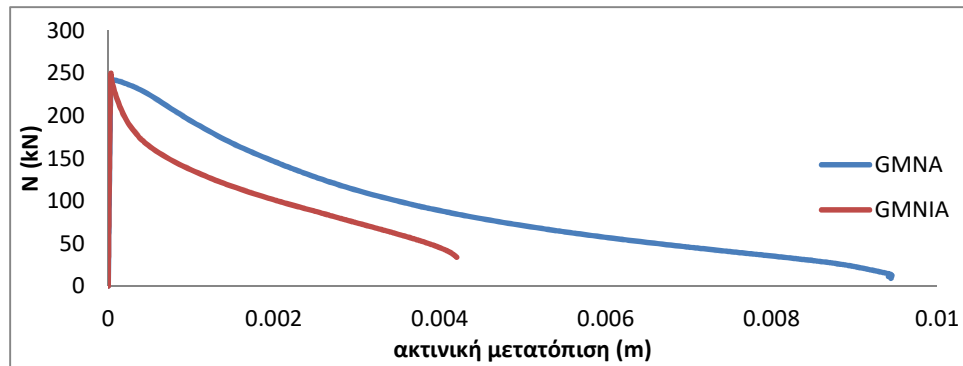
Εικόνα 3-87: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 3-88: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Κρίνοντας από την κατανομή των τάσεων στα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας, παρατηρείται ότι στο οριακό σημείο (σημείο 2) η τάση διαρροής έχει ξεπεραστεί σε όλα τα σημεία του φορέα, με την μέγιστη τιμή της τάσης να καταγράφεται στο μέσον περίπου του κελύφους, θέση στην οποία αναμένεται να εμφανιστεί στη συνέχεια ο τοπικός λυγισμός. Ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται, επομένως, μετά την διαρροή του υλικού και μαζί συμβάλλουν στην εντονότερη πτώση του φορτίου μετά το σημείο 3 και τελικά στον μηδενισμό του. Η ατέλεια επηρεάζει την απόκριση του φορέα, αφού η εισαγωγή της μειώνει την ικανότητα της

διατομής να παραμορφώνεται, καθώς το φορτίο μειώνεται, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3-25. Συγκεκριμένα, η διατομή χωρίς ατέλεια παραμορφώνεται κατά 55.24% περισσότερο μέχρι το φορτίο πρακτικά να μηδενιστεί.



Διάγραμμα 3-25: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες και χωρίς

3.5 Συμπεράσματα

3.5.1 Αξιοπιστία της μεθόδου συνεχούς αντοχής.

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση, προκειμένου να αποδειχθεί η αξιοπιστία και η εγκυρότητα της μεθόδου συνεχούς αντοχής. Διεξάχθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις και για τις 10 διατομές και ως αντοχή σε θλίψη λήφθηκε η τιμή του μέγιστου φορτίου που προέκυψε από τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες. Στον Πίνακα 3-9 και Πίνακα 3-10 φαίνονται οι τιμές της αντοχής σε θλίψη, όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο συνεχούς αντοχής και όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 2008 για χάλυβα ψυχρής έλασης και ωστενιτικό ανοξειδωτό χάλυβα αντίστοιχα. Επίσης στους ίδιους πίνακες φαίνεται και το σχετικό σφάλμα μεταξύ των δυο τιμών για κάθε διατομή.

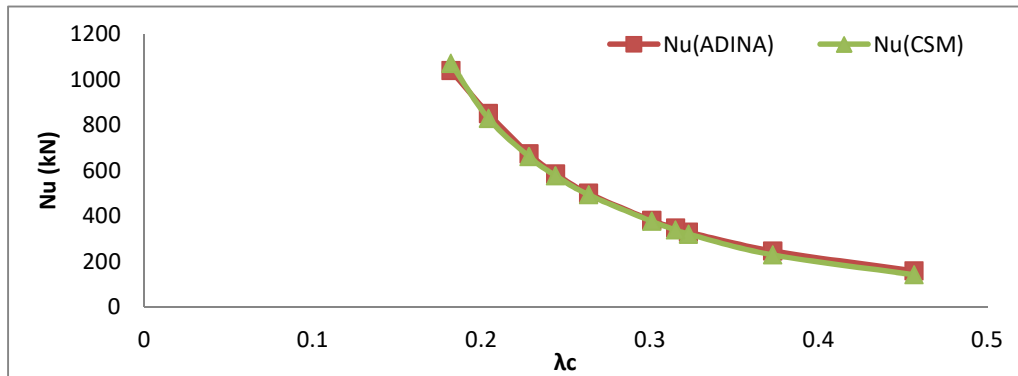
Πίνακας 3-8: Σύγκριση αποτελεσμάτων και μεθόδου συνεχούς αντοχής για χάλυβα ψυχρής έλασης

t	Nu(ADINA)	Nu(CSM)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
t=1mm	158.646	141.4397	10.85%
t=1.5mm	246.028	228.7535	7.02%
t=2mm	329.196	320.2289	2.72%
t=2.1mm	347.496	338.8818	2.48%
t=2.3mm	381.009	376.4755	1.19%
t=3mm	499.64	493.2363	1.28%
t=3.5mm	584.48	576.6991	1.33%
t=4mm	672.936	661.1689	1.75%
t=5mm	850.656	829.6875	2.46%
t=6.3mm	1040.05	1072.013	-3.07%

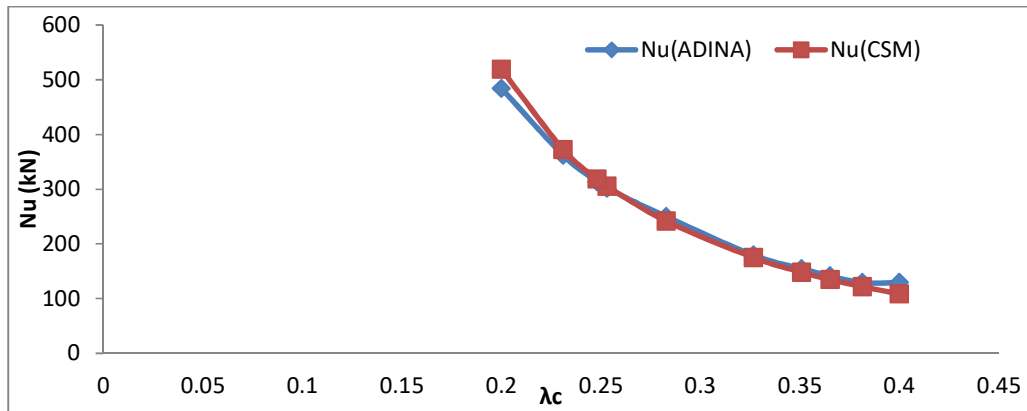
Πίνακας 3-9: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και μεθόδου συνεχούς αντοχής για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

t	Nu(ADINA)	Nu(CSM)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
t=1mm	129.389	108.785	15.92%
t=1.1mm	129.389	121.7666	5.89%
t=1.2mm	141.599	134.9179	4.72%
t=1.3mm	154.936	148.2203	4.33%
t=1.5mm	179.554	175.2184	2.41%
t=2mm	249.916	241.5307	3.36%
t=2.5mm	301.773	305.6038	-1.27%
t=2.6mm	313.851	318.7533	-1.56%
t=3mm	362.202	372.6868	-2.89%
t=4mm	484.374	519.2511	-7.20%

Τα αποτελέσματα των Πινάκων 3-9 και 3-10 απεικονίζονται γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν (διάγραμμα 3-26 και 2-27), όπου στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί το μέγιστο φορτίο όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με την μέθοδο συνεχούς αντοχής και όπως προέκυψε από την αριθμητική επίλυση με το ADINA 2008, ενώ στον οριζόντιο η τιμή της ανηγμένης λυγηρότητας.

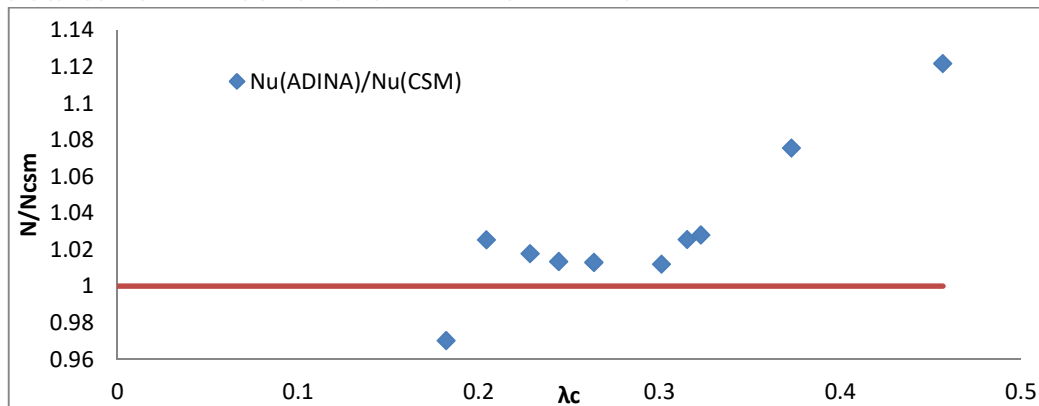


Διάγραμμα 3-26: Γραφική αναπαράσταση σύγκρισης αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών λύσεων για χάλυβα ψυχρής έλασης

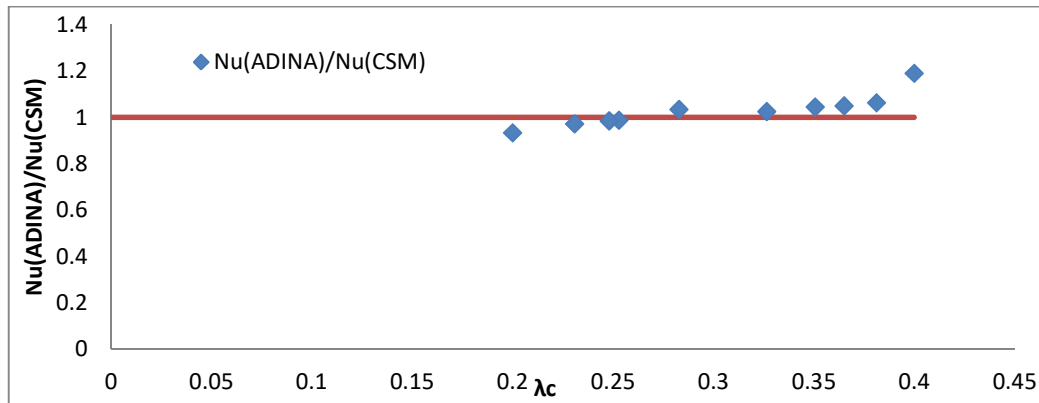


Διάγραμμα 3-27: Γραφική αναπαράσταση σύγκρισης αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών λύσεων για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

Όπως εξάγεται και από τα διαγράμματα η μέθοδος συνεχούς αντοχής υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την αντοχή σε θλίψη της διατομής και για τις δύο περιπτώσεις χάλυβα. Αυτό, πιθανώς, οφείλεται στο γεγονός ότι και τα δύο είδη χάλυβα εμφανίζουν σημαντική τιμή του μέτρου κράτυνσης και επομένως η υιοθέτηση του γραμμικού-γραμμικά κρατυνόμενου μοντέλου υλικού για την περιγραφή της συμπεριφοράς τους ταιριάζει ιδανικά. Παράλληλα, φαίνεται ότι μικρότερο σφάλμα εμφανίζεται για τιμές ανηγμένης λυγηρότητας μεταξύ 0.35 έως 0.20 και για τις δύο περιπτώσεις χάλυβα. Αντίθετα, μεγαλύτερη απόκλιση φαίνεται να υπάρχει στις λεπτότοιχες διατομές με τιμές λυγηρότητας μεγαλύτερες του 0.35 και στις μη λεπτότοιχες διατομές με λυγηρότητα μικρότερη από 0.19. Αναλυτικότερα, για τις πρώτες η αντοχή σε θλίψη προκύπτει πολύ μεγαλύτερη από την υπολογισμένη, ενώ για τις δεύτερες λίγο μικρότερη από την υπολογισμένη (διάγραμμα 3-28 και 3-29). Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι στις λεπτότοιχες διατομές εισάγεται κράτυνση προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες.



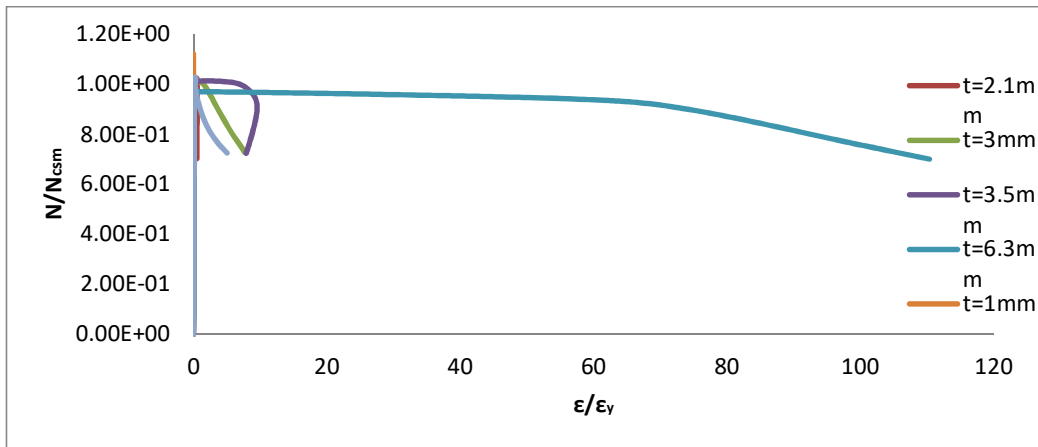
Διάγραμμα 3-28: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και αριθμητικών δεδομένων στον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη για χάλυβα ψυχρής έλασης



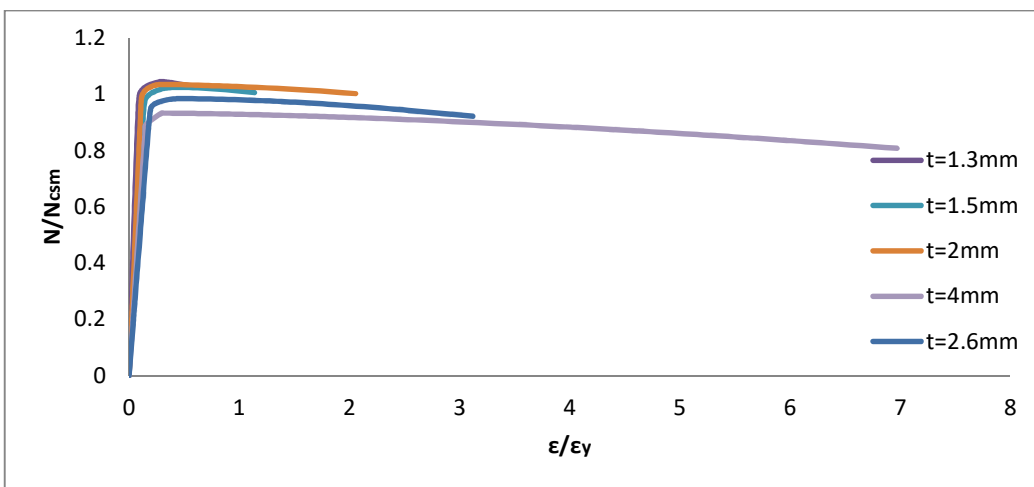
Διάγραμμα 3-29: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και αριθμητικών δεδομένων στον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

3.5.2 Ικανότητα παραμόρφωσης τη διατομής

Η ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής σχετίζεται άμεσα με την ανηγμένη λυγηρότητά της. Η κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες περιγράφει τον βαθμό κατά τον οποίο η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από τον τοπικό λυγισμό. Σύμφωνα λοιπόν με την κατάταξη των διατομών: διατομές κατηγορίας 1 εμφανίζουν απεριόριστη δυνατότητα στροφής μετά την ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής ροπής τους, οι διατομές κατηγορίας 2 εμφανίζουν περιορισμένη πλαστική στροφή, διότι αστοχούν λόγω τοπικού λυγισμού μόλις αναπτύξουν την πλήρη πλαστική ροπή, ενώ τέλος διατομές κατηγορίας 3 και 4 δεν έχουν δυνατότητα πλαστικής στροφής διότι ο τοπικός λυγισμός προηγείται της εκδήλωσης της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης. Η διακριτή όμως κατηγοριοποίηση των διατομών που εφαρμόζει ως τώρα ο Ευρωκώδικας 3 υπονοεί πως όλες οι διατομές που ανήκουν σε μια κατηγορία έχουν ακριβώς την ίδια ικανότητα πλαστικής στροφής. Τούτο έρχεται να ανατρέψει η μέθοδος συνεχούς αντοχής, η οποία αφού υιοθετεί μια συνεχή σχέση μεταξύ της ανηγμένης λυγηρότητας της διατομής και της ικανότητας της να παραμορφώνεται, αποδεικνύει ότι διατομές που με βάση των Ευρωκώδικα ανήκουν στην ίδια κατηγορία έχουν τελείως διαφορετική ικανότητα παραμόρφωσης. Στα διαγράμματα που ακολουθούν έχουν απεικονιστεί δρόμοι ισορροπίας διατομών και από τις τέσσερις κατηγορίες του Ευρωκώδικα και για τα δύο είδη χάλυβα. Στον κατακόρυφο άξονα κάθε διαγράμματος φαίνεται το φορτίο αντοχής, όπως αυτό προέκυψε από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με το ADINA 2008, διαιρεμένο με το φορτίο αντοχής που προέκυψε σύμφωνα με τη μέθοδο συνεχούς αντοχής, ενώ στον οριζόντιο φαίνεται η παραμόρφωση της διατομής ανηγμένη ως προς την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα.



Διάγραμμα 3-30: Συνολικοί (αδιάστατοι) δρόμοι ισορροπίας για διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης

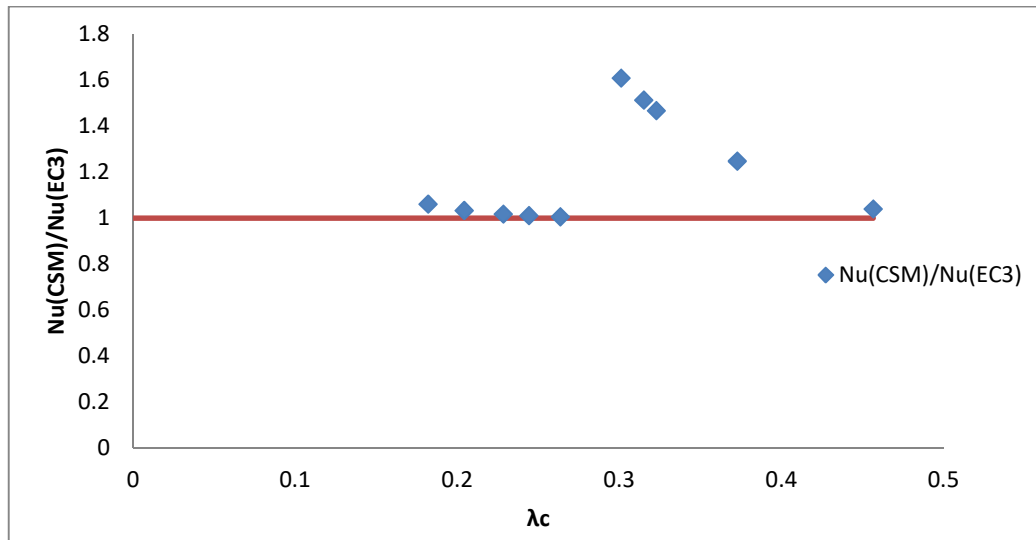


Διάγραμμα 3-31: Συνολικοί (αδιάστατοι) δρόμοι ισορροπίας για διατομές από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

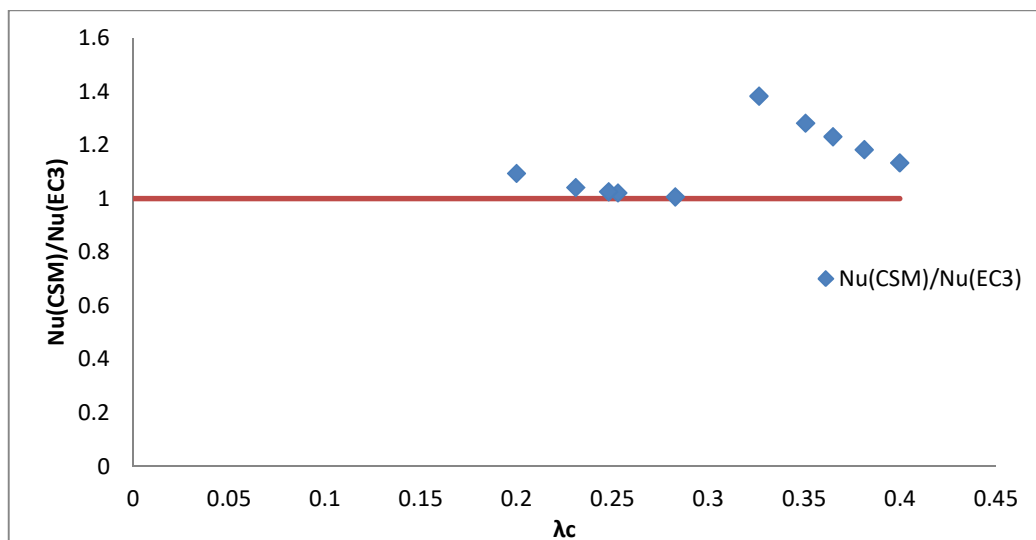
Σύμφωνα με τις απεικονίσεις των διαγραμμάτων η ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το πάχος, γεγονός που συνεπάγεται την μείωση την ανηγμένης λυγηρότητά της.

3.5.3 Σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 3

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται εποπτικά η σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 3 και για τα δύο είδη χάλυβα. Στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί το φορτίο αντοχής σε θλίψη όπως υπολογίστηκε με την μέθοδο συνεχούς αντοχής αδιαστατοποιημένο με το φορτίο αντοχής σε θλίψη, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετήθηκε η ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής.



Διάγραμμα 3-32: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη για χάλυβα ψυχρής έλασης



Διάγραμμα 3-33: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη για ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, η μέθοδος υπολογίζει μεγαλύτερες αντοχές σε θλίψη για όλες τις διατομές. Το ποσοστό αύξησης μάλιστα μπορεί να φτάσει μέχρι και 37.85% για διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης και 27.63% για διατομές από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα. Μια άλλη πολύ ενδιαφέρουσα διαπίστωση είναι ότι η μεγάλη αύξηση της αντοχής παρατηρείται για τιμές λυγηρότητας μεταξύ 0.3 και 0.36 και για τα δύο είδη χάλυβα. Οι διατομές που εμφανίζουν λυγηρότητες εντός αυτού του διαστήματος ανήκουν σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα στην κατηγορία 4, ωστόσο με βάση την μέθοδο συνεχούς αντοχής εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή αντοχής. Αυτό πιθανότητα οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή της λυγηρότητας του είναι πολύ κοντά την οριακή τιμή της λυγηρότητας, με αποτέλεσμα, ο τοπικός λυγισμό να μην εμφανίζεται πολύ πριν τη διαρροή τους, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη παραμορφώσεων. Ταυτόχρονα, η αύξηση της αντοχής σε θλίψη για της μη

λεπτότοιχες διατομές (διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3 με βάση τον EC3) είναι πιο έντονη για την περίπτωση ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα, διότι η αύξηση οφείλεται στο γεγονός ότι λήφθηκε υπόψη η κράτυνση, και οι ανοξειδωτο χάλυβες εμφανίζουν κατά κύριο λόγο μεγαλύτερο μέτρο κράτυνσης. Συγκεντρωτικά στοιχεία για όλες τις διατομές και για τα 2 είδη χάλυβα παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 11 και 12).

Πίνακας 3-10: Συγκεντρωτικά στοιχεία σύγκρισης μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 για διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης

t	Nu(EC3)	Nu(CSM)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ
t=1mm	136.158	141.43968	3.73%
t=1.5mm	183.3365	228.75354	19.85%
t=2mm	218.2964	320.22885	31.83%
t=2.1mm	223.9416	338.88184	33.92%
t=2.3mm	233.9754	376.47546	37.85%
t=3mm	490.4947	493.23629	0.56%
t=3.5mm	570.5129	576.69912	1.07%
t=4mm	650.0365	661.16886	1.68%
t=5mm	803.25	829.68754	3.19%
t=6.3mm	1011.15	1072.0129	5.68%

Πίνακας 3-11: Συγκεντρωτικά στοιχεία σύγκρισης μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 για διατομές από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα

t	Nu(EC3)	Nu(CSM)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ
t=1mm	96.03381	108.785	11.72%
t=1.1mm	103.0326	121.7666	15.39%
t=1.2mm	109.599	134.9179	18.77%
t=1.3mm	115.7439	148.2203	21.91%
t=1.5mm	126.812	175.2184	27.63%
t=2mm	240.2037	241.5307	0.55%
t=2.5mm	299.3519	305.6038	2.05%
t=2.6mm	311.1382	318.7533	2.39%
t=3mm	358.139	372.6868	3.90%
t=4mm	474.6298	519.2511	8.59%

4 ΚΟΙΛΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ

4.1 Γενικά

Η κάμψη ως εντατική κατάσταση επιφέρει την ανάπτυξη εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων καθ' ύψους της διατομής. Συνεπώς, μια λεπτότοιχη διατομή που υποβάλλεται σε κάμψη θα εμφανίσει τοπικό λυγισμό στις ίνες που θλίβονται, ως κυρίαρχη μορφή αστοχίας. Οι Κανονισμοί Σχεδιασμού λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού λόγω κάμψης, κατατάσσοντας τις διατομές σε τέσσερις διακριτές κατηγορίες, εντελώς αντίστοιχα με την περίπτωση της θλίψης. Η διαφορά έγκειται κυρίως στα όρια μετάβασης στην επόμενη κατηγορία, τα οποία στην περίπτωση της κάμψης είναι υψηλότερα, καθώς θεωρείται ότι η ύπαρξη εφελκυστικών τάσεων δρα ευμενώς στο φαινόμενο. Αντίθετα, η Μέθοδος της Συνεχούς Αντοχής καταργεί την έννοια της κατηγοριοποίησης των διατομών και εισάγει μια συνεχή σχέση μεταξύ της ανηγμένη λυγηρότητας και της ικανότητας παραμόρφωσης της διατομής. Ταυτόχρονα, υιοθετώντας και ένα πιο ακριβές μοντέλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς του χάλυβα, καταλήγει να υπολογίζει την αντοχή της διατομής σε μονοαξονική κάμψη μέσω αναλυτικών εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη υπολογιστικά τον τοπικό λυγισμό. Σε αυτό το κεφάλαιο επομένως, διερευνάται η συμπεριφορά λεπτότοιχων και μη κοίλων κυκλικών διατομών υποβαλλόμενων σε μονοαξονική κάμψη και γίνεται σύγκριση των αναλυτικών λύσεων της Μεθόδου της Συνεχούς Αντοχής με τα αριθμητικά αποτελέσματα του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA (2008) και με τον Ευρωκώδικα 3. Η σύγκριση αφορά κυρίως την αντοχή σε μονοαξονική κάμψη της κοίλης κυκλικής διατομής, όπως αυτή υπολογίζεται με βάση την μέθοδο.

4.2 Αναλυτική Προσέγγιση

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η Μέθοδος της Συνεχούς Αντοχής (Continuous Strength Method) συσχετίζει μέσω μια συνεχούς σχέσης την ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής ($\bar{\lambda}_c$) με την ικανότητα παραμόρφωσης της ($\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y}$). Ανάλογα με

την τιμή της ανηγμένης, λυγηρότητας υπολογίζεται από την αντίστοιχη εξίσωση η ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_{CSM} (βλ. εξ. (2-9) και (2-10)) και στη συνέχεια ανάλογα με το είδος του χάλυβα και την τιμή του λόγου $\frac{\epsilon_{CSM}}{\epsilon_y}$ (μικρότερος ή μεγαλύτερος της μονάδας) υπολογίζεται μέσω των εξισώσεων (2-11) ή (2-12) η τάση f_{CSM} . Τελικά η αντοχή της διατομής σε κεντρική θλίψη, λαμβάνοντας υπόψη και τον τοπικό λυγισμό, υπολογίζεται από τις σχέσεις (2-36) ή (2-37), ανάλογα εάν η διατομή είναι λεπτότοιχη ή μη.

4.3 Αριθμητική Προσέγγιση

4.3.1 Χαρακτηριστικά των διατομών και των υλικών

Προκειμένου να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της Μεθόδου Συνεχούς Αντοχής σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής της διατομής σε μονοαξονική κάμψη, κρίθηκε σκόπιμο να προσομοιωθεί πλήθος διατομών με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των αναλύσεων να συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν μέσω των αναλυτικών λύσεων. Επιλέχθηκε να προσομοιωθούν 10 διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης, οποίες έχουν σταθερή διάμετρο και μεταβλητό πάχος. Στους πίνακες 4-1 και 4-2 που εικονίζονται παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά των διατομών που επιλέχθηκαν, καθώς και τα χαρακτηριστικά του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για χάλυβα ψυχρής έλασης

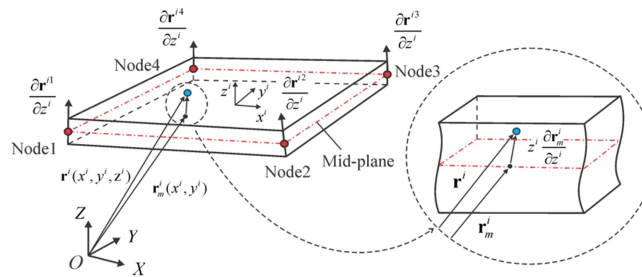
D (mm)	t(mm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	Wel (cm ³)	Wpl (cm ³)
168.3	1	5.25322	183.798939	22.23503865	28.32489
	1.5	7.85628	273.2462304	33.35255798	42.487335
	2	10.44364	361.0848061	44.4700773	56.64978
	2.1	10.959228	378.4611851	46.69358117	59.482269
	2.3	11.98852	413.0238455	51.1405889	65.147247
	3	15.57126	532.0133137	66.70511595	84.97467
	3.5	18.11152	615.1417028	77.82263528	99.137115
	4	20.63608	696.7382906	88.9401546	113.29956
	5	25.5	855.4116813	111.1751933	141.62445
	6.3	32.1	1052.88651	140.0807435	178.446807

Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά χάλυβα ψυχρής έλασης

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (MPa)	210000
ΛΟΓΟΣ POISSON	0.3
ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ F_y (MPa)	315
ΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ F_u (MPa)	390
ε_y	0.0015
ε_u	0.193
E_{sh} (MPa)	1487.41

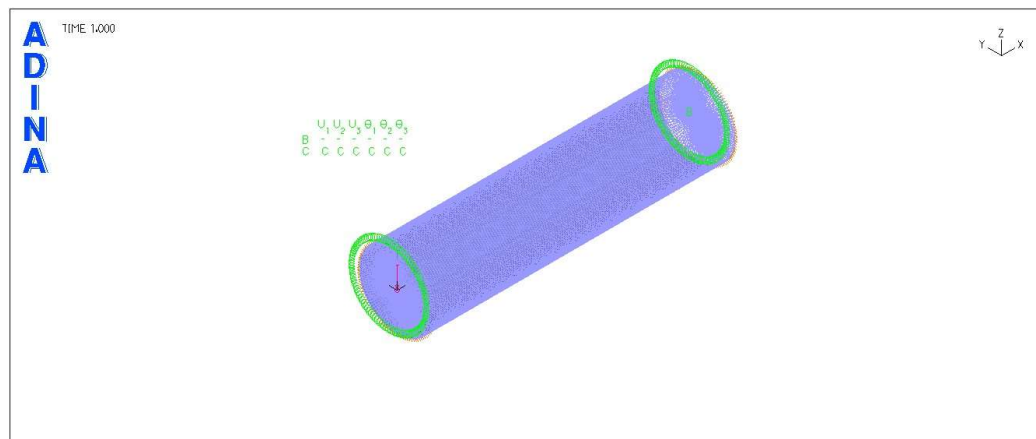
4.3.2 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία

Για τις προσομοιώσεις για την περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης αναλύθηκε το κυλινδρικό κέλυφος, που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3 για την περίπτωση της κεντρικής θλίψης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι ακτίνα $D=168.3\text{mm}$ και μήκος $L= 0.6732\text{m}$. Το μήκος του φορέα επιλέχθηκε να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με την διάμετρο του (βραχύς κύλινδρος), ώστε ο τοπικός λυγισμός να αποτελεί την κρίσιμη μορφή αστοχίας του. Εξαιτίας της φύσης του φαινομένου του τοπικού λυγισμού, επιλέχθηκε η προσομοίωση του με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά ισοπαραμετρικά στοιχεία κελύφους. Τα στοιχεία αυτά έχουν 2 κόμβους σε κάθε πλευρά τους, επομένως οι συναρτήσεις σχήματος τους είναι γραμμικές. Στην εικόνα 4-1 φαίνεται ένα τέτοιο στοιχείο.



Εικόνα 4-1: Τετρακομβικό ισοπαραμετρικό στοιχείο κελύφους

Οι δυο ακραίες διατομές του κελύφους δεσμεύτηκαν με άκαμπτο κόμβο (rigid link) και στον ένα εκ των δυο επιβλήθηκε η συνοριακή συνθήκη της πλήρους πάκτωσης, ενώ ο άλλος προσομοιώθηκε ως ελεύθερο άκρο. Τέλος, κάμψη πραγματοποιήθηκε φορτίζοντας το ελεύθερο άκρο με εγκάρσιο φορτίο. Σχηματικά όλα τα παραπάνω φαίνονται στο στιγμιότυπο του ADINA (2008) (Εικόνα 4-2).



Εικόνα 4-2: Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση

4.3.3 Πυκνότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Η πυκνότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων είναι όμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση της κεντρικής θλίψης. Συνεπώς, ο φορέας προσομοιώθηκε με 14418 στοιχεία.

4.3.4 Υπολογισμός αρχικών ατελειών

Οι αρχικές ατέλειες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις για την περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης υπολογίστηκαν

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

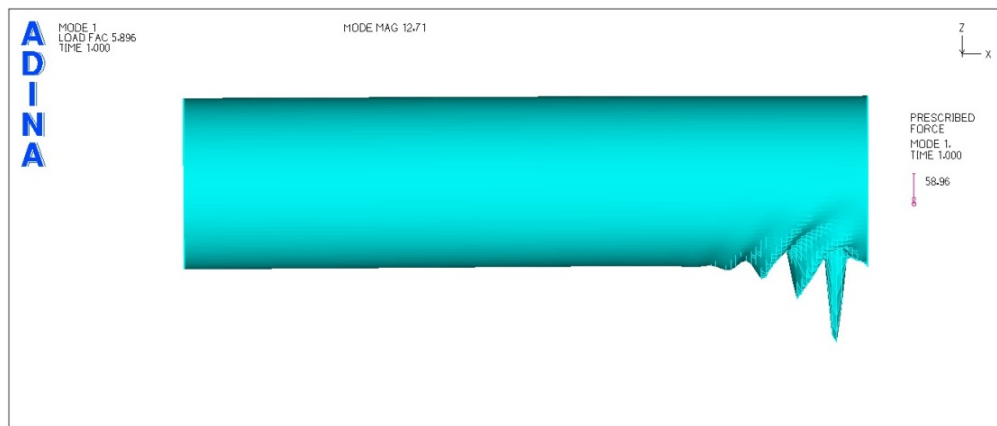
σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 σχετικά με τις ατέλειες (§3.3.4)

4.4 Αριθμητικές Αναλύσεις

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν διεξοδικά τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για δυο διατομές (λεπτότοιχη και μη) από χάλυβα ψυχρής έλασης. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις δέκα διατομές, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για στατιστικούς σκοπούς και λόγους σύγκρισης.

4.4.1 Λεπτότοιχη διατομή

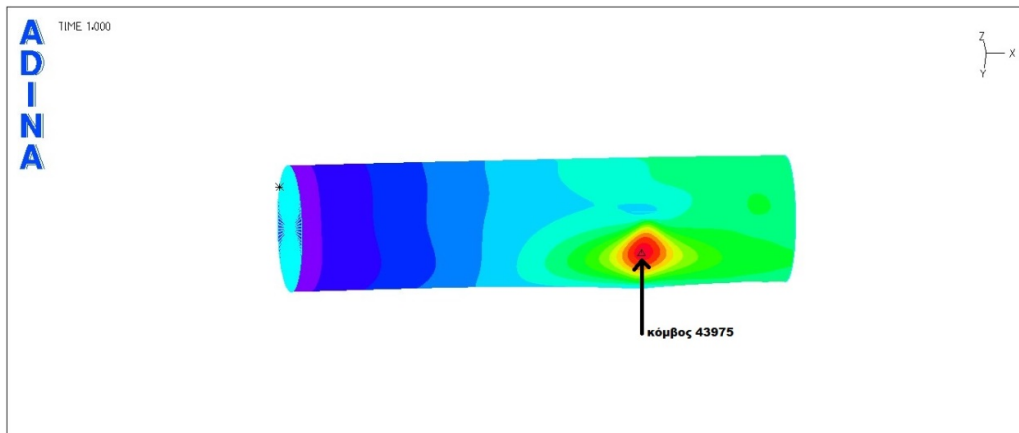
Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η διατομή πάχους $t=1\text{mm}$, η οποία προσομοιώθηκε με 14418 στοιχεία. Η 1^η ιδιομορφή που προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού απεικονίζεται στην Εικόνα 4-3.



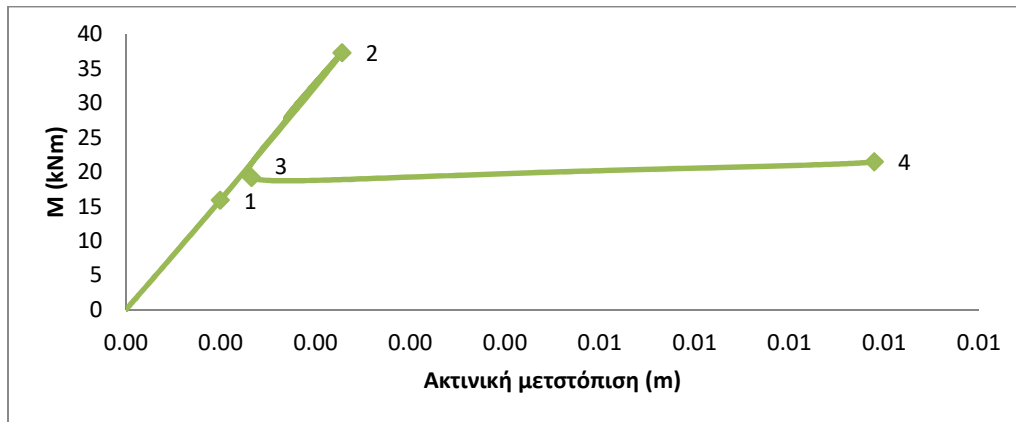
Εικόνα 4-3: 1η ιδιομορφή λεπτότοιχης διατομής- $M_{cr} = 39.692\text{kNm}$

4.4.1.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από την ανάλυση φαίνεται στο Διάγραμμα 4-1, όπου κάθε σημείο του δρόμου ισορροπίας αντιστοιχεί και σε μια θέση ισορροπίας του συστήματος. Στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται η ροπή αντοχής, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 43975, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης και φαίνεται στην Εικόνα 4-4.

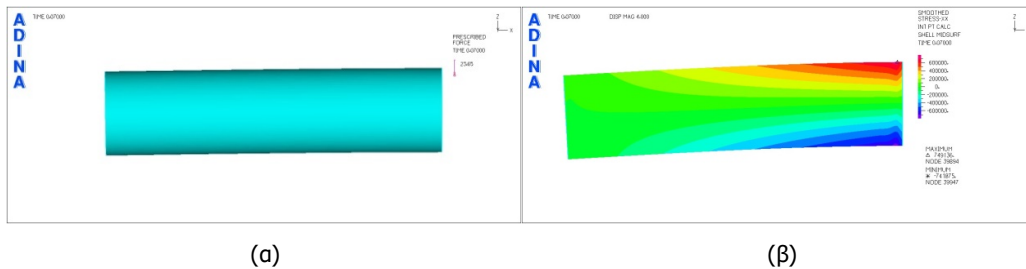


Εικόνα 4-4: Θέση του κόμβου 43975, οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

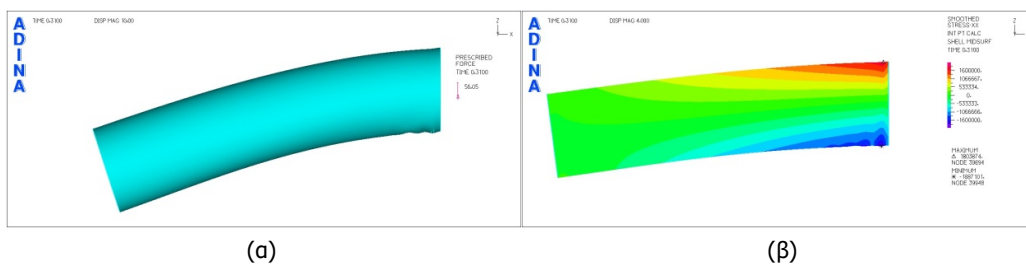


Διάγραμμα 4-1: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

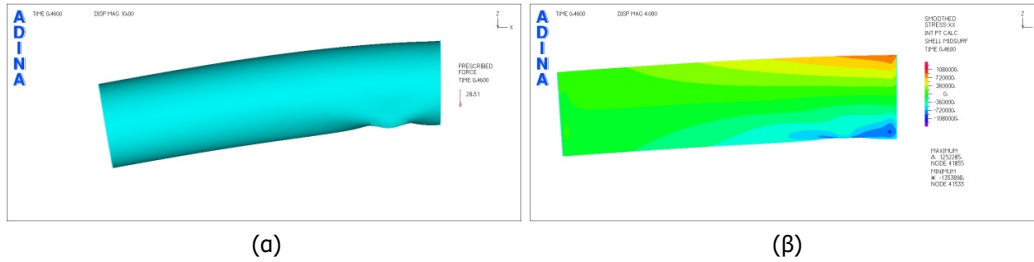
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4-1, ο δρόμος ισορροπίας είναι γραμμικός έως το σημείο 2, το οποίο αντιστοιχεί σε σημείο διακλάδωσης και στο οποίο λαμβάνει χώρα ακαριαίος τοπικός λυγισμός. Μετά το σημείο 2 ακολουθεί ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας και η ροπή αντοχής της διατομής μειώνεται απότομα, λαμβάνοντας την ελάχιστη τιμή της στο σημείο 3. Τέλος, στο διάστημα μεταξύ των σημείων 3 και 4 διατηρείται σχεδόν σταθερή. Η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει η διατομή ισούται με $M_U = 37.73 \text{ kNm}$ και αναπτύσσεται στο σημείο 2. Η απότομη πτώση της ροπής αντοχής είναι της τάξης του 49%, ενώ η μικρή άνοδος που παρατηρείται μεταξύ των σημείων 3 και 4 αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 12%. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων τόσο στο σημείο διακλάδωσης όσο και σε άλλα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 4-5, 4-6, 4-7 και 4-8).



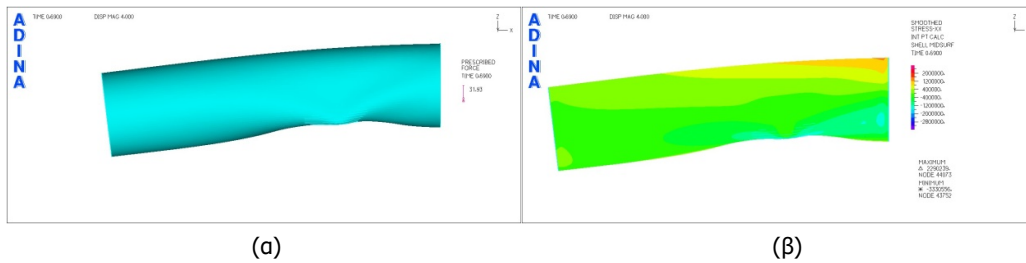
Εικόνα 4-5: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 4-6: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



Εικόνα 4-7: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

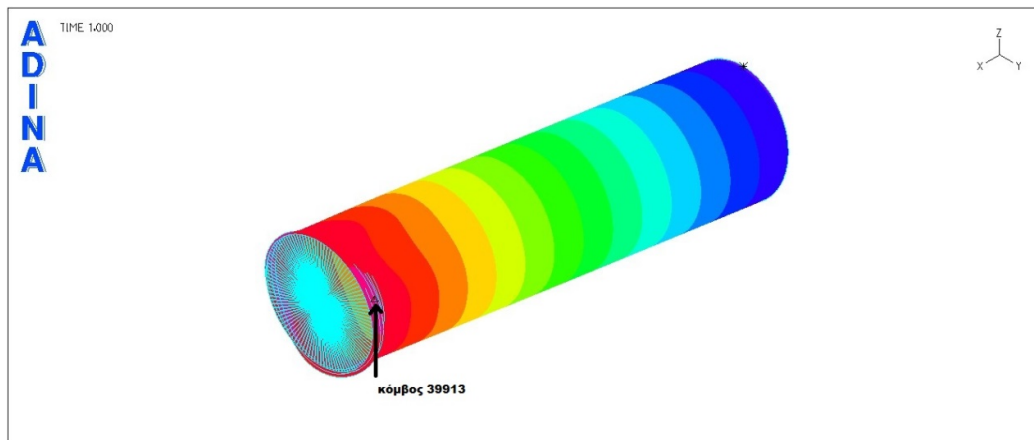


Εικόνα 4-8: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

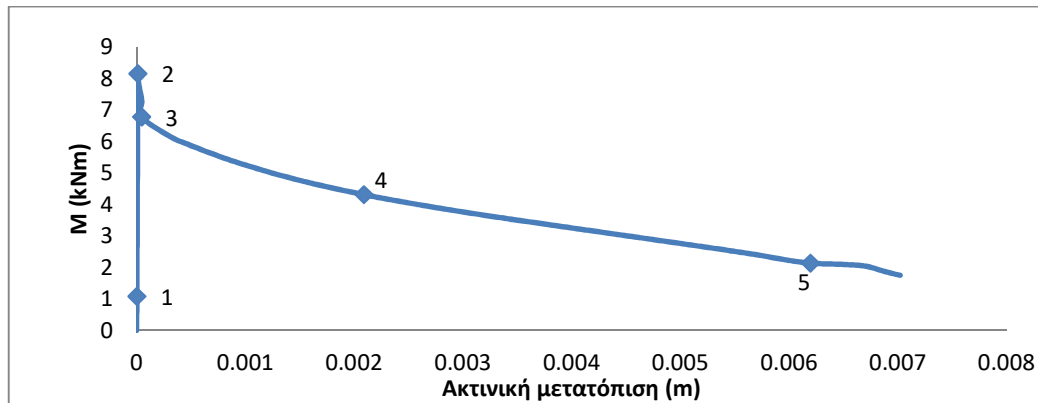
Από τις εικόνες παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μορφή του τοπικού λυγισμού είναι ουσιαστικά οβαλοποίηση της ακραίας διατομής.

4.4.1.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης αυτής ήταν απαραίτητο να ληφθεί κράτυνη για το χάλυβα, η οποία υπολογίστηκε για χάλυβα ψυχρής έλασης, σύμφωνα με την εξίσωση (2-5) του κεφαλαίου 2. Ο δρόμος ισορροπίας για την παρούσα ανάλυση εικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 4-2), όπου στον κατακόρυφο άξονα σημειώνεται η ροπή αντοχής της διατομής και στον οριζόντιο την ακτινική μετατόπιση του κόμβου 39915, οποίος μετά το πέρας της ανάλυσης εμφανίζει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και φαίνεται στην Εικόνα 4-9.

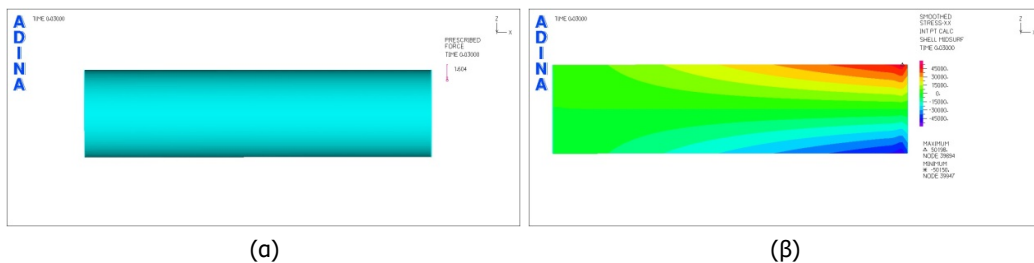


Εικόνα 4-9: Θέση του κόμβου 39915, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

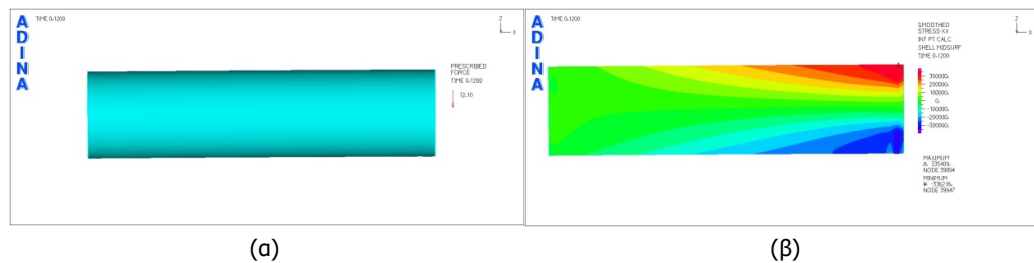


Διάγραμμα 4-2: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

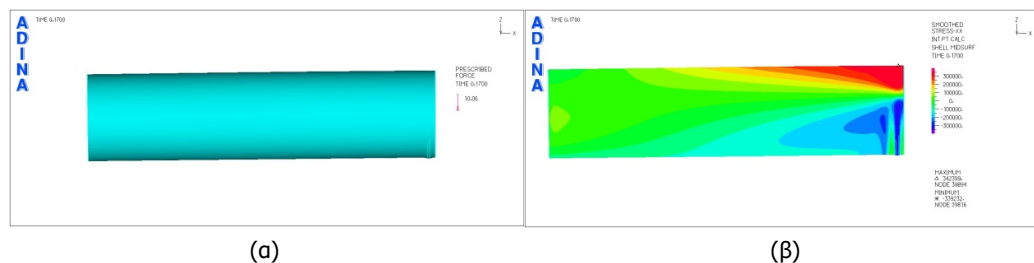
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 4-2, ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής, καθώς εμφανίζει καθοδικό κλάδο, όπου αύξηση των παραμορφώσεων συνεπάγεται μείωση της ροπής αντοχής της διατομής. Η μέγιστη τιμή της ροπής αντοχής εμφανίζεται στο σημείο 2 και αντιστοιχεί σε τιμή $M_u = 8.14 \text{ kNm}$. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνες 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14).



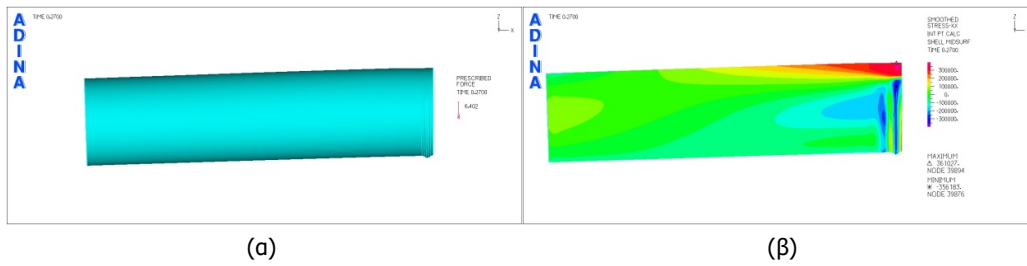
Εικόνα 4-10: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



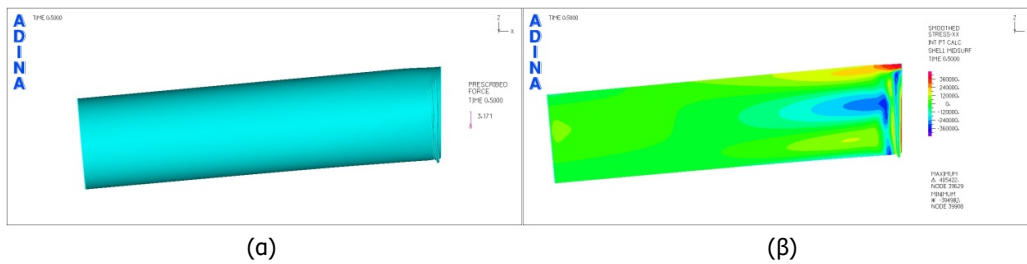
Εικόνα 4-11: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



Εικόνα 4-12: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



Εικόνα 4-13: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4



Εικόνα 4-14: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 5

Όπως φαίνεται στις εικόνες που προηγήθηκαν η εμφάνιση του τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του κελύφους προηγείται της διαρροής του υλικού του. Αναλυτικότερα, το υλικό σε όλο το εύρος του κελύφους εμφανίζει τάσεις ίσες με την τάση διαρροής, με εξαίρεση την κάτω δεξιά γωνία, όπου και πραγματοποιείται ο τοπικός λυγισμός και εκεί οι τάσεις εμφανίζουν τιμές μεγαλύτερες της τάσης διαρροής (Εικόνα 4-15).

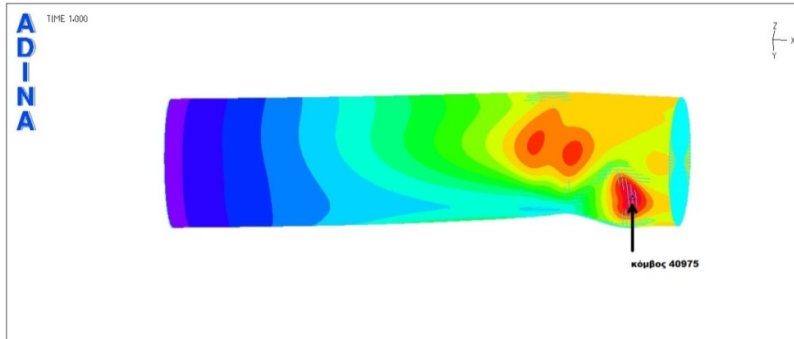


Εικόνα 4-15: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 2)

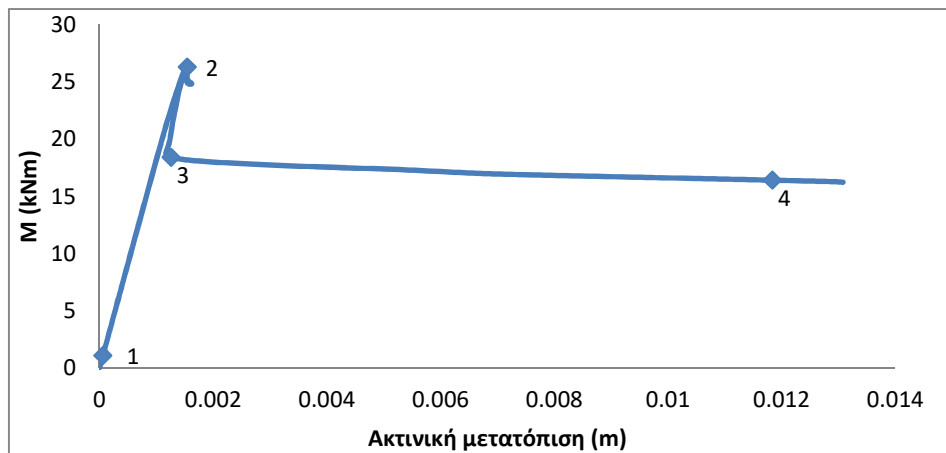
4.4.1.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια

Για την πραγματοποίηση της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλειες το μέγεθος της ατέλειας λήφθηκε από τον Πίνα 3-7 του κεφαλαίου 3, ενώ για το σχήμα της ατέλειας χρησιμοποιήθηκε η 1^η ιδιομορφή, όπως αυτή προέκυψε από την γραμμική ανάλυση λυγισμού. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε, απεικονίζεται στο διάγραμμα 4-3, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται η ροπή αντοχής της διατομής και στον οριζόντιο η ακτινική

μετατόπιση του κόμβου 40975, ο οποίος μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης εμφάνισε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και φαίνεται στην Εικόνα 4-16.

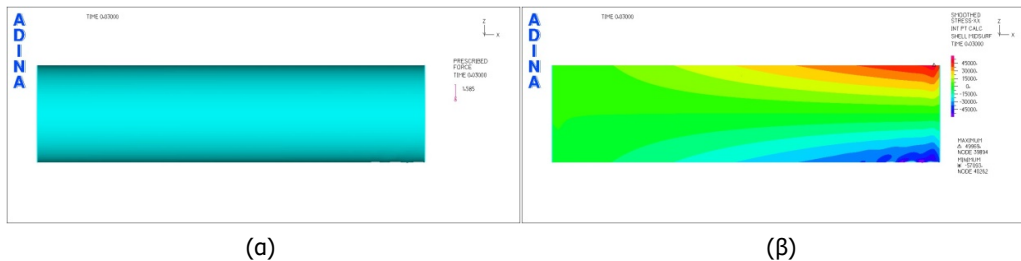


Εικόνα 4-16: Θέση κόμβου 40975, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

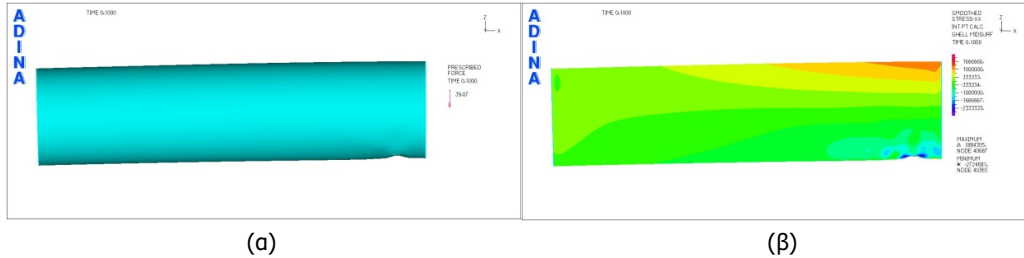


Διάγραμμα 4-3: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια

Όπως εξάγεται από το διάγραμμα 4-3, ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει ομοιότητες με τον αντίστοιχο του από την μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή της ροπής ισούται με $M_u = 26.3\text{kN}$, δηλαδή η εισαγωγή της ατέλειας μειώνει το μέγιστο φορτίο κατά 30.3%. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής τάσεων σε τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας (Εικόνες 4-17, 4-18, 4-19, 4-20).



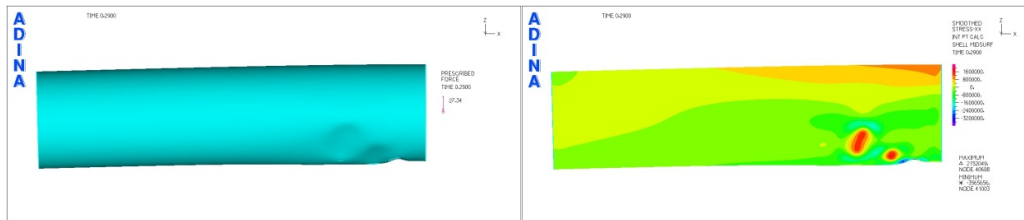
Εικόνα 4-17: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



(α)

(β)

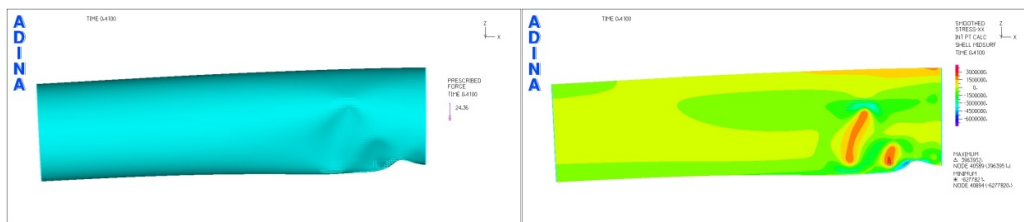
Εικόνα 4-18: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



(α)

(β)

Εικόνα 4-19: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



(α)

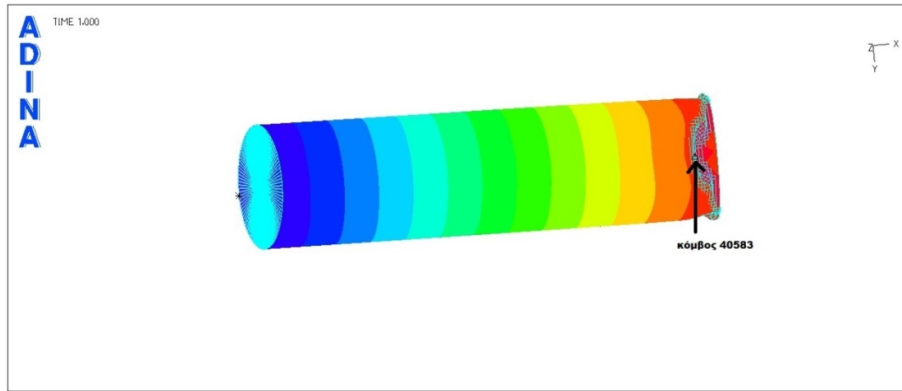
(β)

Εικόνα 4-20: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

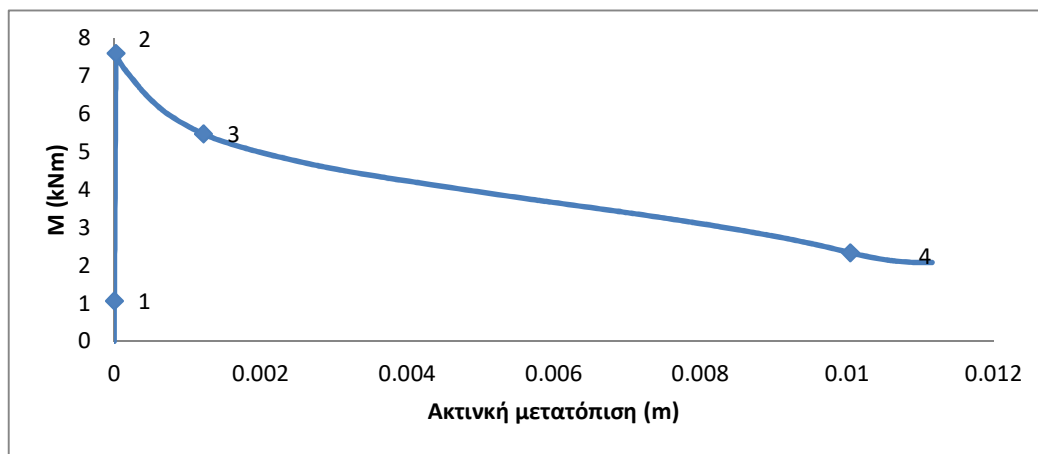
Όπως εξάγεται από τις παραπάνω εικόνες, η εισαγωγή της ατέλειας επιταχύνει την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, απόρροια του οποίου είναι η μείωση της φέρουσας ικανότητας του κελύφους κατά 30.3%.

4.4.1.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια

Η πραγματική απόκριση του λεπτότοιχου κελύφους σε κάμψη θα εξαχθεί πραγματοποιώντας μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια. Συνεπώς, από την ανάλυση αυτή θα υπολογιστεί η πραγματική ροπή αντοχής της διατομής, η οποία θα συγκριθεί με αυτή που υπολογίστηκε σύμφωνα με τις αναλυτικές σχέσεις τις μεθόδου συνεχούς αντοχής. Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από την ανάλυση αυτή απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4-4. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος έχει τοποθετηθεί η ροπή αντοχής της διατομής, ενώ στον οριζόντιο την ακτινική μετατόπιση του κόμβου 40583, οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση κατά την ολοκλήρωση της ανάλυσης (Εικόνα 4-21).

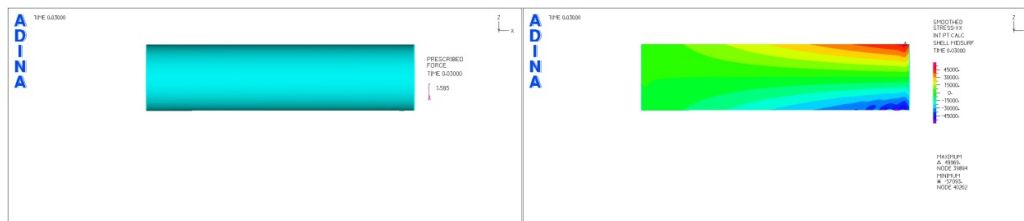


Εικόνα 4-21: Θέση του κόμβου 40583, οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση



Διάγραμμα 4-4: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια

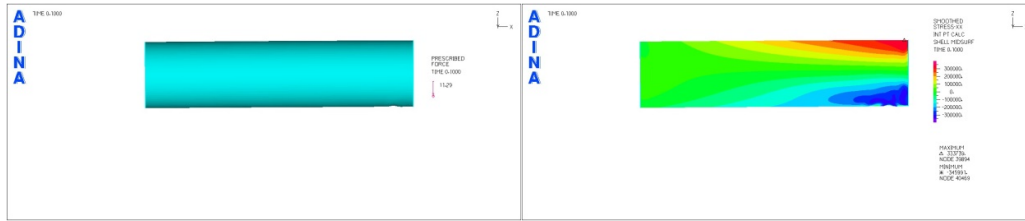
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει έντονη μη γραμμικότητα και αστάθεια, δηλαδή καθώς αυξάνονται οι παραμορφώσεις μειώνεται η ροπή αντοχής. Αναλυτικότερα, η μέγιστη τιμή της ροπής ισούται με $M_u = 7.6 \text{ kNm}$ και εντοπίζεται στο σημείο 2. Στη συνέχεια η διατομή χάνει έως και 69.25% της αντοχής της, συνεπώς δεν εμφανίζει μεταλυγισμική αντοχή. Στιγμιότυπα τάσεων και παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. (Εικόνα 4-22, 4-23, 4-24, 4-25, 4-26).



(α)

(β)

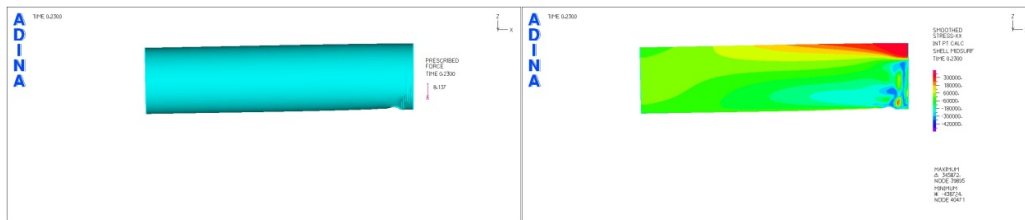
Εικόνα 4-22: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



(α)

(β)

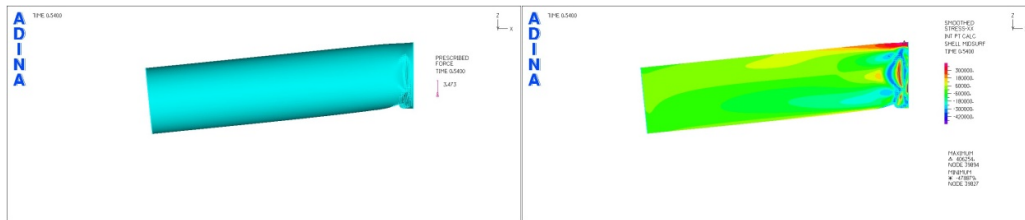
Εικόνα 4-23: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



(α)

(β)

Εικόνα 4-24: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

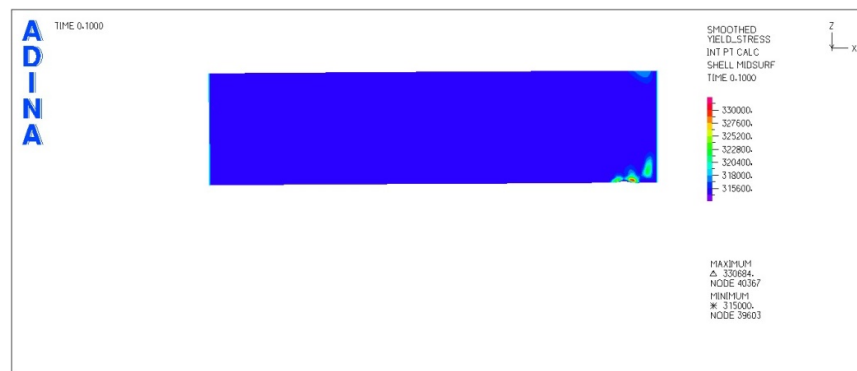


(α)

(β)

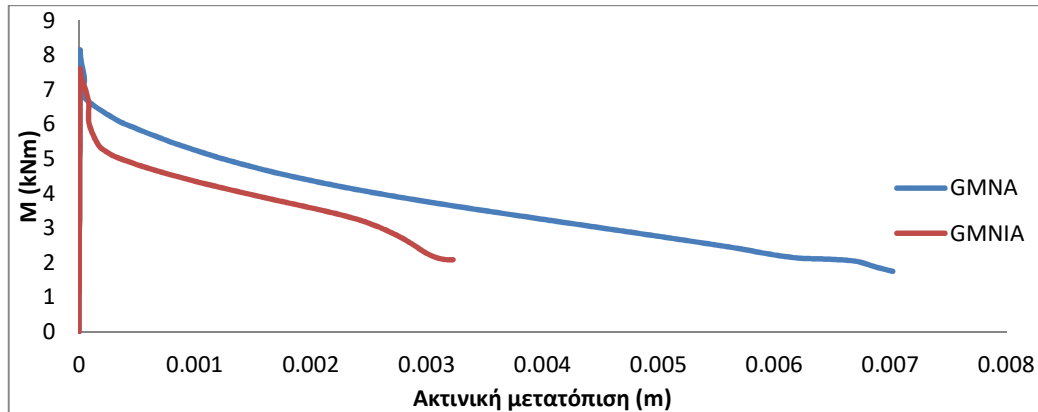
Εικόνα 4-25: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 5

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες, η εισαγωγή της ατέλειας επιταχύνει την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού και το καθιστά την οβαλοποίηση της διατομής εντονότερη. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η εμφάνιση του τοπικού λυγισμού γίνεται όταν ακόμα το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή του, δηλαδή οι τάσεις σε όλο το εύρος του κελύφους έχουν τιμή μικρότερη από την τάση διαρροής (Εικόνα 4-26).



Εικόνα 4-26: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 2)

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με και χωρίς ατέλειες.

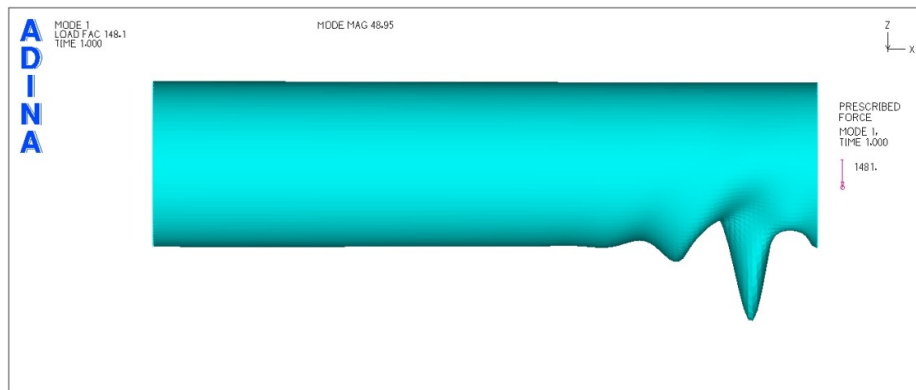


Διάγραμμα 4-5: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με και χωρίς ατέλεια

Όπως, προκύπτει από το προηγούμενο διάγραμμα, η ύπαρξη της ατέλειας μειώνει την φέρουσα ικανότητα του κελύφους κατά 6.68% και αυξάνει το ρυθμό πτώσης του φορτίου.

4.4.2 Μη λεπτότοιχη διατομή

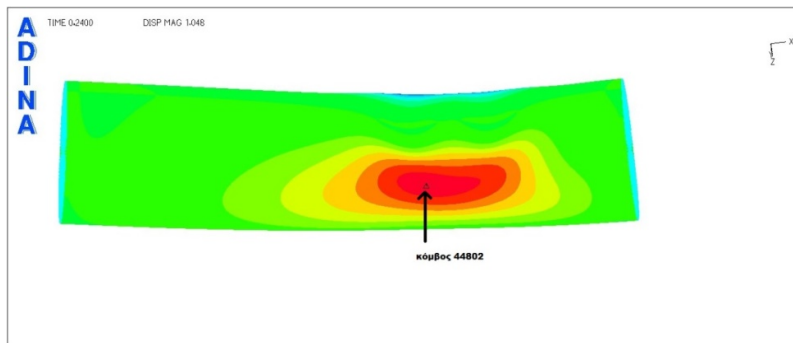
Ως λεπτότοιχη διατομή επιλέγεται να παρουσιαστεί η διατομή πάχους $t=5\text{mm}$, της οποίας η 1^η ιδιομορφή φαίνεται στην εικόνα 4-28 που ακολουθεί.



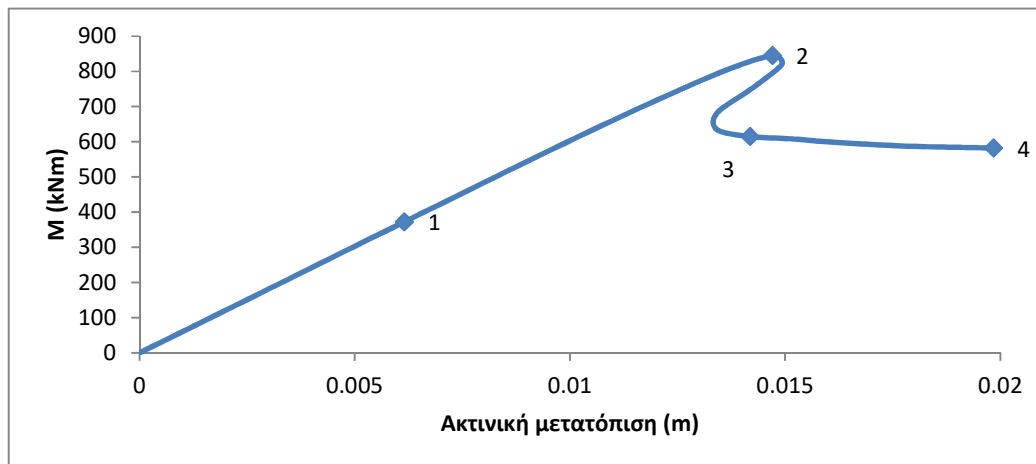
Εικόνα 4-27: 1η ιδιομορφή μη λεπτότοιχης διατομής- $M_{cr}=997\text{kNm}$

4.4.2.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Ο δρόμος ισορροπίας που προκύπτει από την παρούσα ανάλυση φαίνεται στο διάγραμμα 4-8 που ακολουθεί, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετήθηκε η ροπή αντοχής της διατομής, ενώ στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 44802, οποίος μετά το τέλος της ανάλυσης εμφάνισε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και παρουσιάζεται στην εικόνα 4-29.

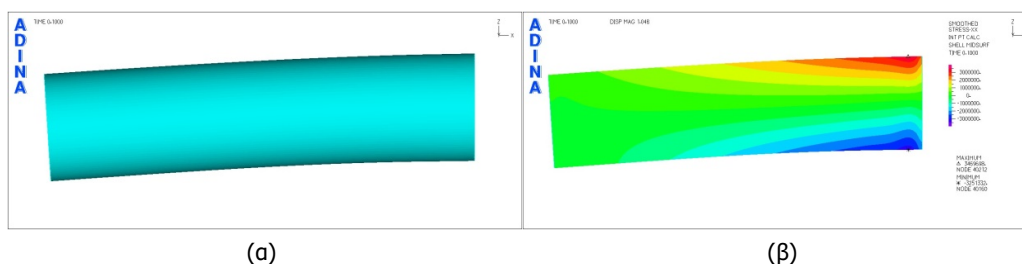


Εικόνα 4-28: Θέση του κόμβου 43127, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

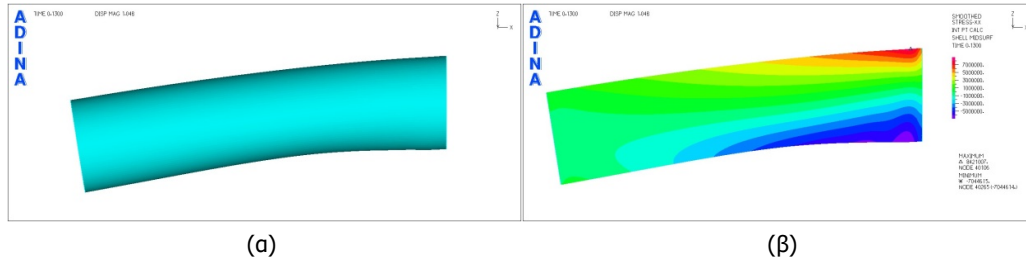


Διάγραμμα 4-6: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

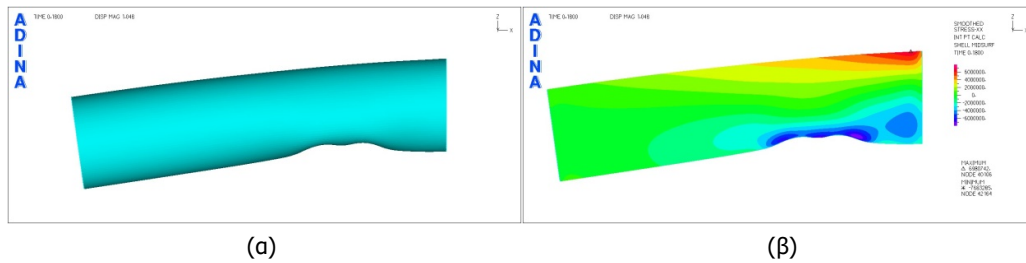
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4-6, ο δρόμος ισορροπίας είναι γραμμικός μέχρι το σημείο 2, όπου η ροπή μεγιστοποιείται, ενώ στη συνέχεια γίνεται μη γραμμικός και ασταθής, αφού για μικρή αύξηση των παραμορφώσεων, η ροπή μειώνεται απότομα. Η μέγιστη τιμή της ροπής που αντέχει η διατομή αντιστοιχεί στην τιμή $M_u = 844.74\text{KNm}$, ενώ η πτώση της ροπής είναι της του 30.11%. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων στα διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στα στιγμιότυπα που ακολουθούν (Εικόνα 4-30, 4-31, 4-32, 4-33).



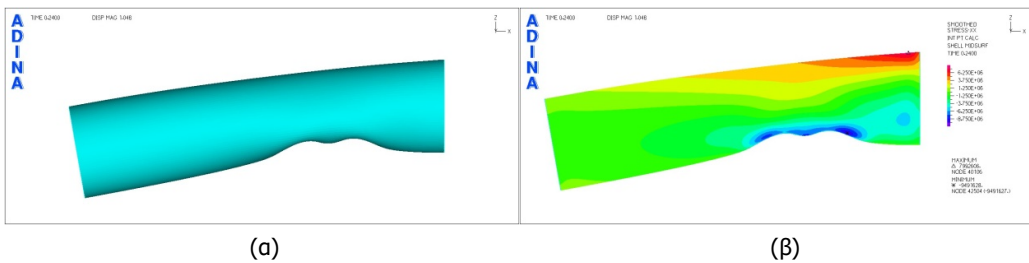
Εικόνα 4-29: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 4-30: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



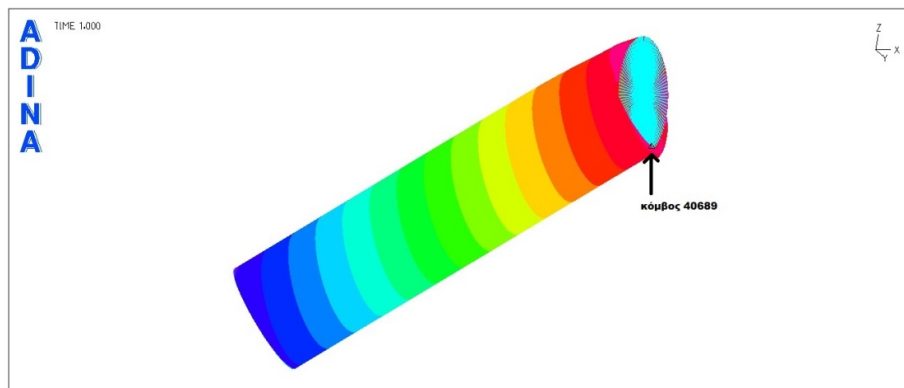
Εικόνα 4-31: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



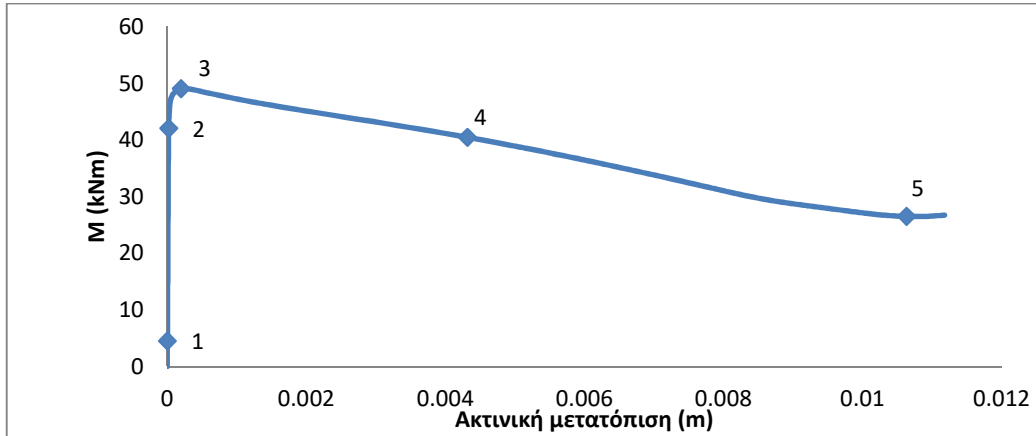
Εικόνα 4-32: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

4.4.2.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

Ο δρόμος ισορροπίας για την συγκεκριμένη ανάλυση παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 4-7), όπου στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται η τιμή της ροπής αντοχής και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 40689, ο οποίος στο τέλος της ανάλυσης είχε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση και η θέση του φαίνεται στην Εικόνα 4-34.

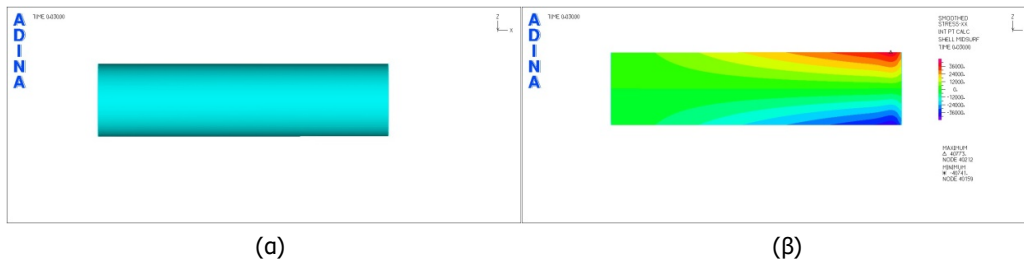


Εικόνα 4-33: Θέση του κόμβου 40689, οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

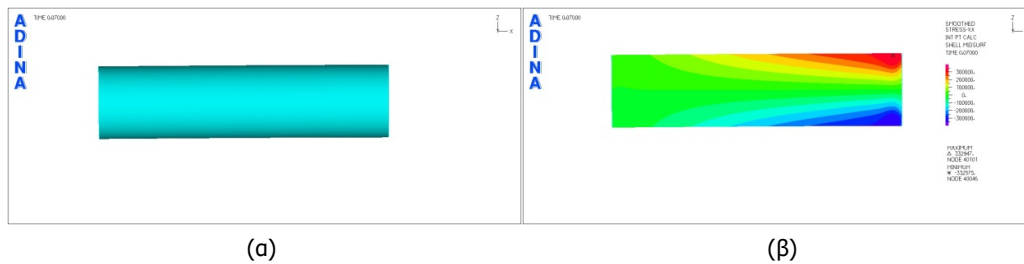


Διάγραμμα 4-7: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

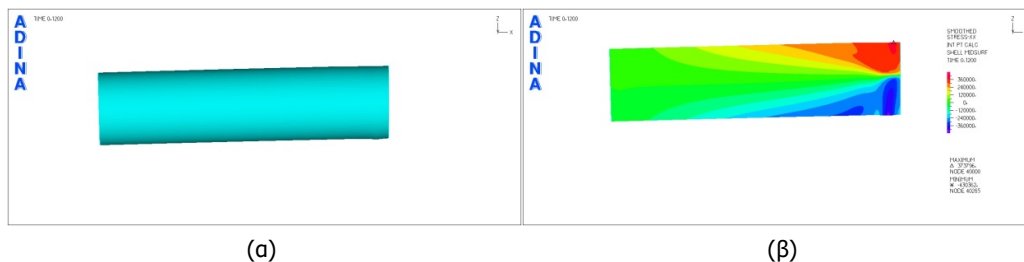
Ο δρόμος ισορροπίας, όπως εξάγεται από το διάγραμμα 4-17, είναι έντονα μη γραμμικός, ενώ παράλληλα εμφανίζει και καθοδικό κλάδο. Η μέγιστη τιμή της ροπής ισούται με $M_U = 49.050 \text{ kNm}$. Η πτώση της ροπής αντιστοιχεί σε ποσοστό 85.06%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η μη γραμμικότητα του υλικού επηρεάζει σημαντικά την ροπή αντοχής της μη λεπτότοιχης διατομής. Εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4-35, 4-36, 4-37, 4-38 και 4-39).



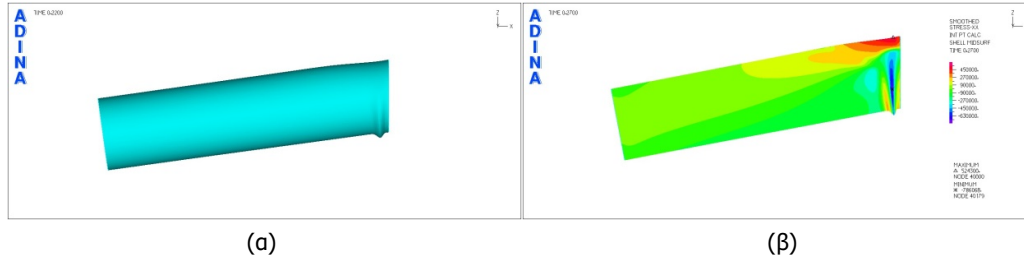
Εικόνα 4-34: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



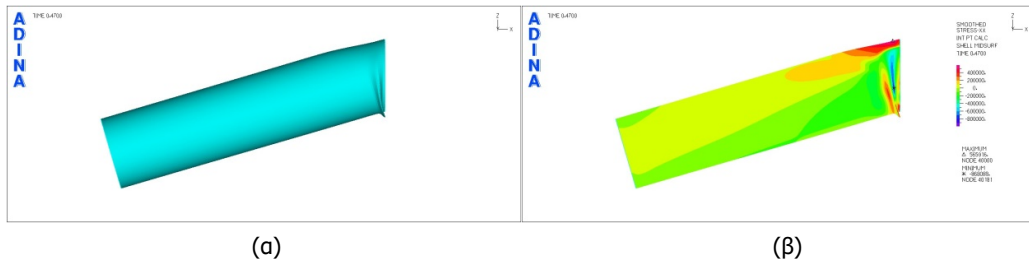
Εικόνα 4-35: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2



Εικόνα 4-36: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

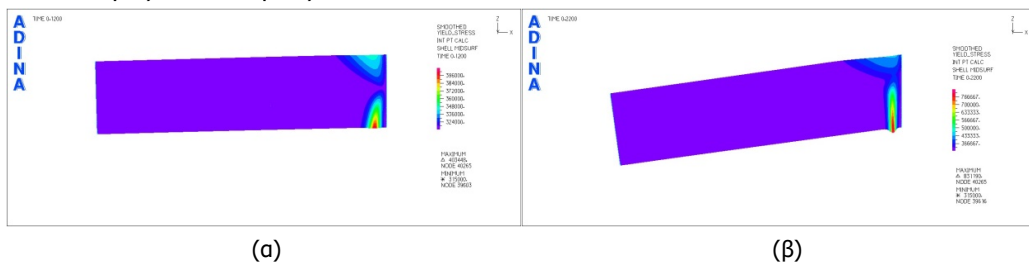


Εικόνα 4-37: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4



Εικόνα 4-38: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 5

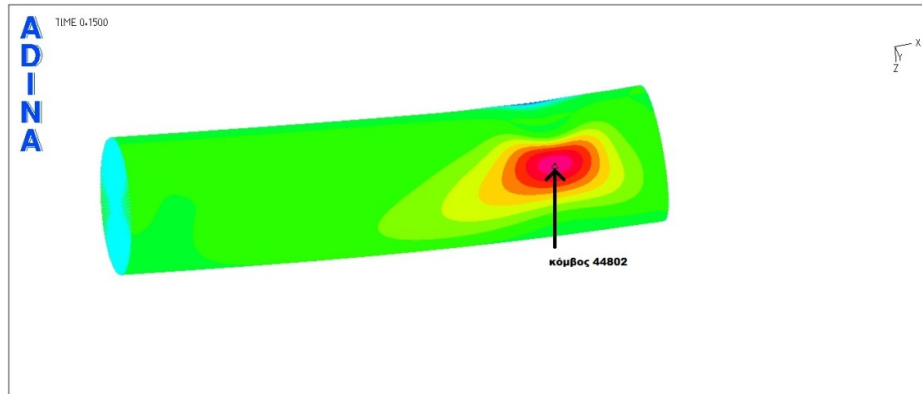
Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, στο σημείο 3, όπου και μεγιστοποιείται η τιμή της ροής, δεν έχει εμφανιστεί ακόμα ο τοπικό λυγισμός. Η τιμή της τάσης κυμαίνεται μεταξύ της τάσης διαρροής για την θλιβόμενη ίνα και τιμών λίγο μικρότερες από αυτή (Εικόνα 4-40). Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι ο τοπικό λυγισμός εμφανίζεται μετά την διαρροή του υλικού του κελύφους. Πράγματι, στο σημείο 3 βλέπουμε ότι έχει ήδη εκδηλωθεί ο τοπικός λυγισμός και όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-41, η τιμή της τάσης έχει ξεπεράσει την τάση διαρροής σε όλο το εύρος του κελύφους.



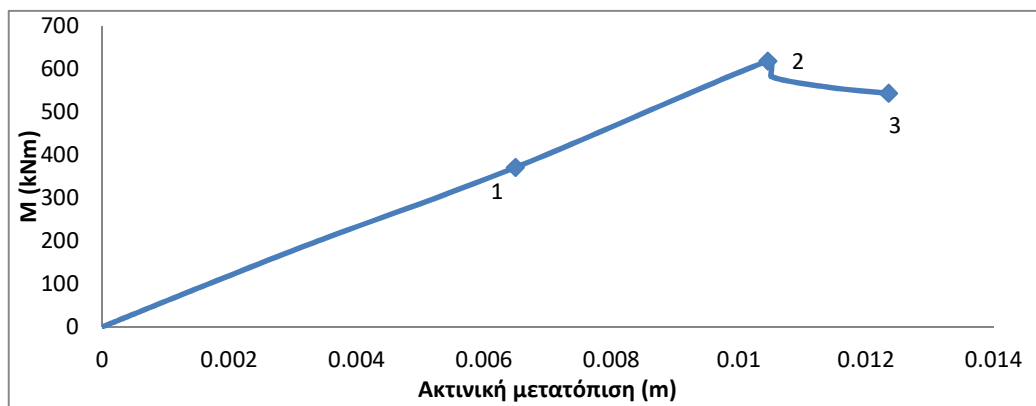
Εικόνα 4-39: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής (α) στο σημείο 2 και (β) κατά τον τοπικό λυγισμό (σημείο 3)

4.4.2.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια

Στο διάγραμμα 4-8 απεικονίζεται ο δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος έχει και πάλι τοποθετηθεί η ροπή αντοχής της διατομής, ενώ στον οριζόντιο άξονα η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 44802, ο οποίος μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης εμφάνισε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση (Εικόνα 4-41).

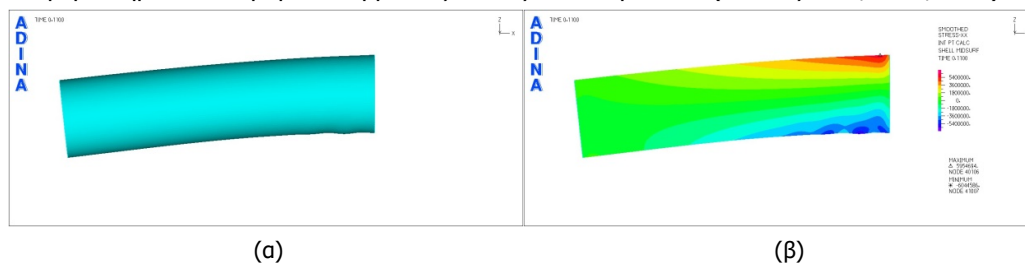


Εικόνα 4-40: Θέση του κόμβου 44802, οποίος εμφάνισε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση



Διάγραμμα 4-8: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια

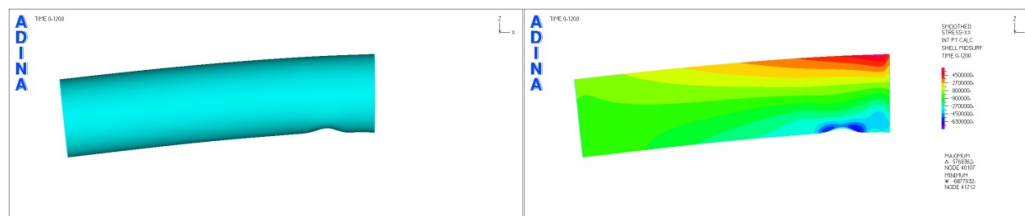
Ο δρόμος ισορροπίας και σε αυτή την περίπτωση εμφανίζει γραμμικό κλάδο μέχρι το σημείο μεγιστοποίησης της ροπής. Στη συνέχεια όμως το φορτίο μειώνεται απότομα γεγονός που σηματοδοτεί την αστοχία της διατομής από φαινόμενα γεωμετρικής μη γραμμικότητας. Η μέγιστη τιμή της ροπής που αντέχει η διατομή ισούται με $M_u = 618.43 \text{ kNm}$, ενώ η πτώση της ροπής αντιστοιχεί σε ποσοστό 12.12%. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων διάφορα σημεία του δρόμου ισορροπίας εικονίζονται παρακάτω (Εικόνες 4-42, 4-43, 4-44).



(α)

(β)

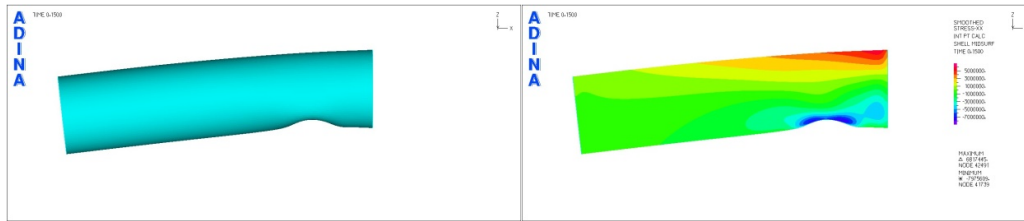
Εικόνα 4-41: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



(α)

(β)

Εικόνα 4-42: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

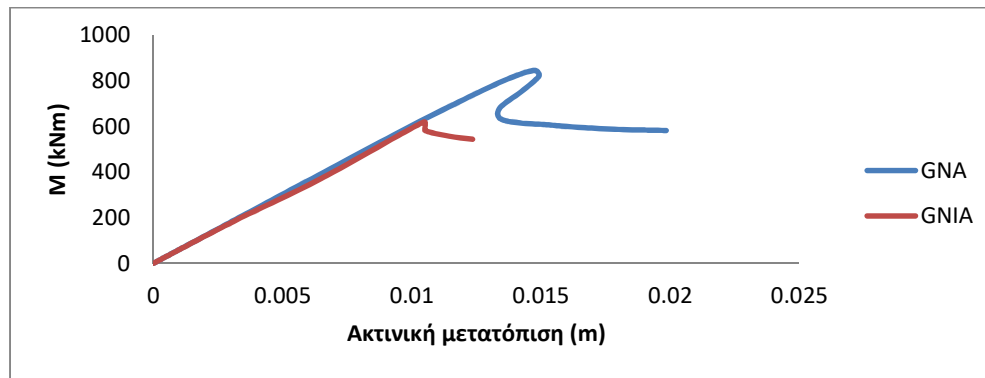


(α)

(β)

Εικόνα 4-43: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3

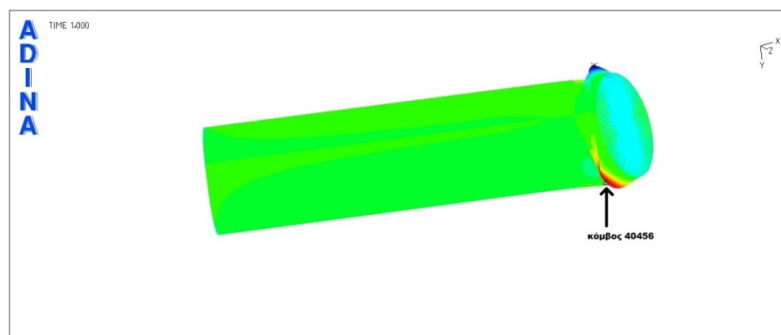
Η ύπαρξη της ατέλει επιταχύνει την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού και ταυτόχρονα μειώνει την αντοχή της διατομής κατά 26.78%, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4-9.



Διάγραμμα 4-9: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με και χωρίς ατέλεια

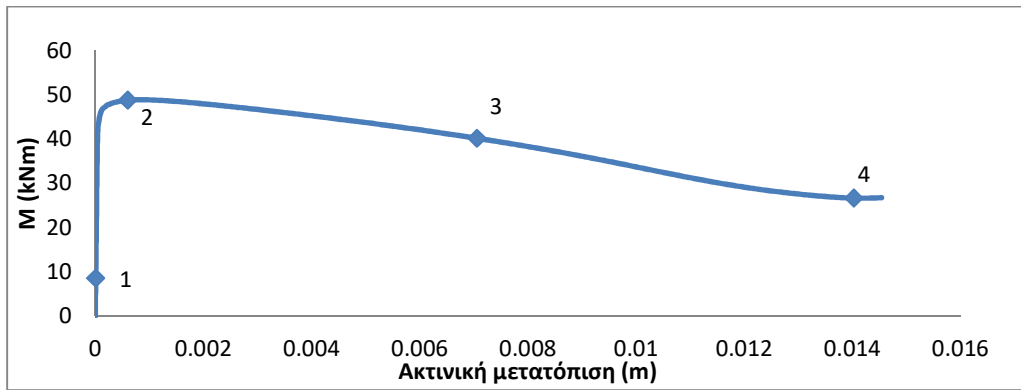
4.4.2.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια

Η πραγματική απόκριση του μη λεπτότοιχου κελύφους θα προκύψει μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια. Ο δρόμος ισορροπίας, λοιπόν, που κατασκευάστηκε από την παρούσα ανάλυση φαίνεται στο διάγραμμα 4-9, όπου στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται η ροπή αντοχής της διατομής και στον οριζόντιο η ακτινική μετατόπιση του κόμβου 40456, οποίος στο τέλος της ανάλυσης εμφάνισε την μέγιστη ακτινική μετατόπιση (Εικόνα 4-45).



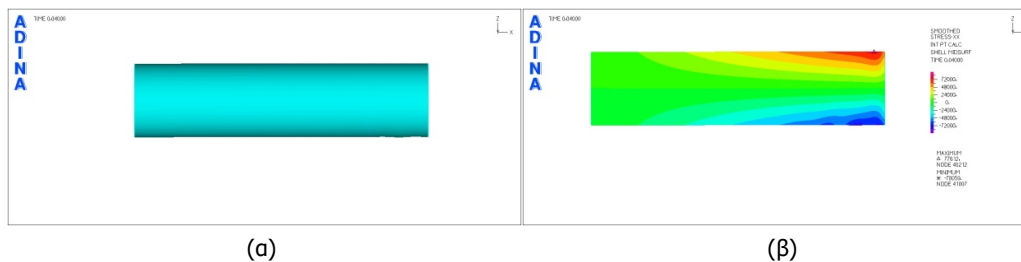
Εικόνα 4-44: Θέση κόμβου 40456, ο οποίος αναπτύσσει την μέγιστη ακτινική μετατόπιση

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

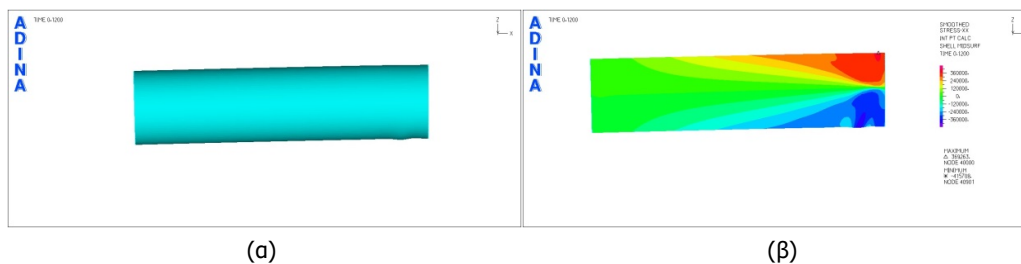


Διάγραμμα 4-10: Δρόμος ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια

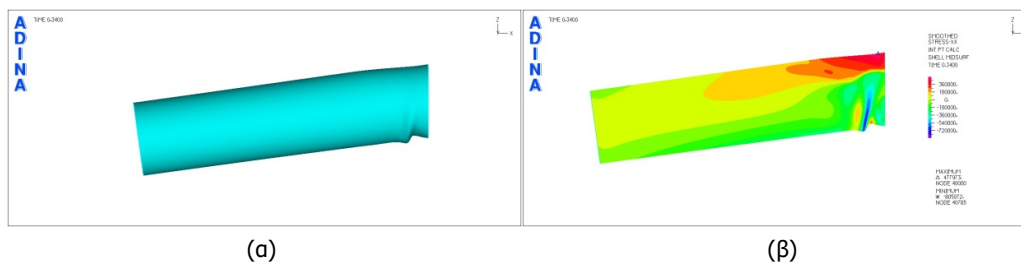
Ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζει μη γραμμικότητα μετά το σημείο μεγιστοποίησης της τιμής της ροπής. Η μέγιστη τιμή της ροπής που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό είναι: $M_u = 48.91 \text{ kNm}$, ενώ η πτώση της ροπής μετά το οριακό σημείο έως την αστοχία ανέρχεται σε ποσοστό 45.45%. Εικόνες παραμόρφωσης και κατανομής των τάσεων φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 4-46, 4-47, 4-48 και 4-49).



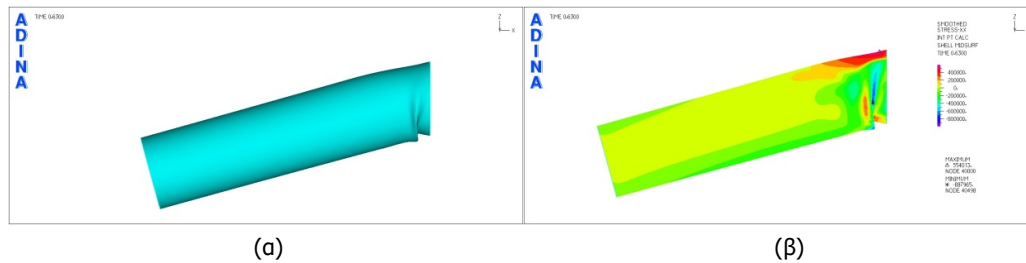
Εικόνα 4-45: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 1



Εικόνα 4-46: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 2

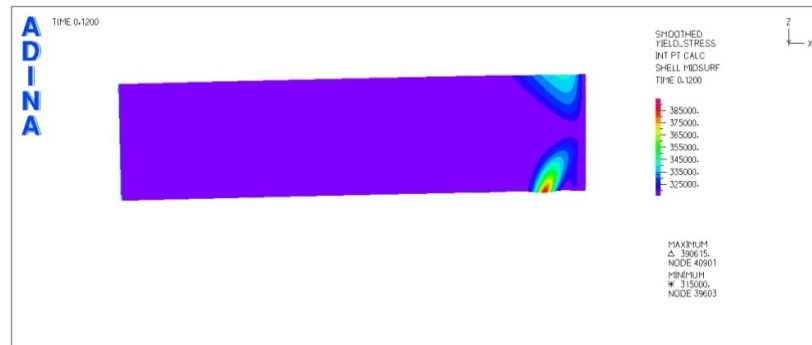


Εικόνα 4-47: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 3



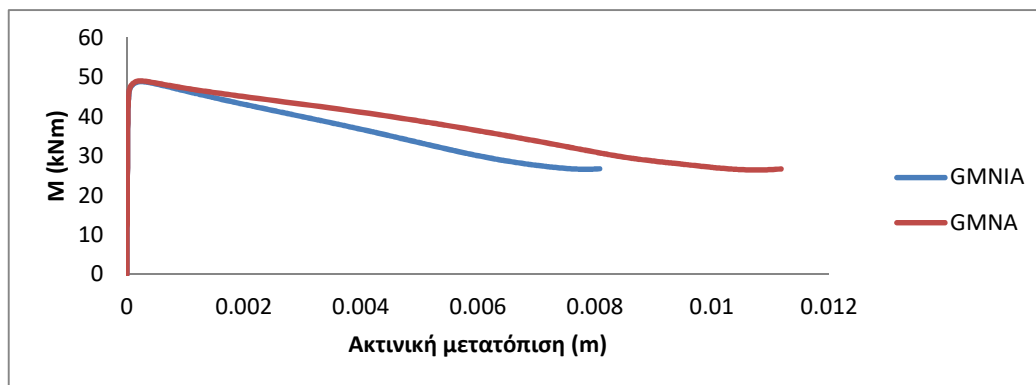
Εικόνα 4-48: (α) Παραμορφωσιακή εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και (β) κατανομή τάσεων στο σημείο 4

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, στο σημείο 2 έχει πραγματοποιηθεί ήδη διαρροή του υλικού όταν ο τοπικός λυγισμός κάνει την εμφάνισή του, γεγονός που συνάδει με τον χαρακτηρισμό της διατομής ως μη λεπτότοιχη. Αναλυτικότερα, επειδή η διαρροή προηγείται του τοπικού λυγισμού, το υλικό εισάγεται στην κρατυνόμενη περιοχή, συνεπώς η διατομή είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την κράτυνση του υλικού και τελικά να αναπτύξει ροπή μεγαλύτερη από την ροπή πλήρους πλαστικοποίησης. Στη εικόνα 4-50 που ακολουθούν φαίνεται πιο αναλυτικά η κατανομή των τάσεων στο σημείο 2, όπου οι τάσεις έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την τάση διαρροής.



Εικόνα 4-49: Κατανομή τάσεων με κανονικοποίηση ως προς την τάση διαρροής στο σημείο 2

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η σύγκριση των δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια και χωρίς (Διάγραμμα 4-11).



Διάγραμμα 4-11: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με και χωρίς ατέλεια

Η ύπαρξη της ατέλειας επιταχύνει το ρυθμός πτώσης του φορτίου, αλλά δεν μεταβάλλει σχεδόν καθόλου την μέγιστη τιμή του, όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΟΙΛΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

4.5 Συμπεράσματα

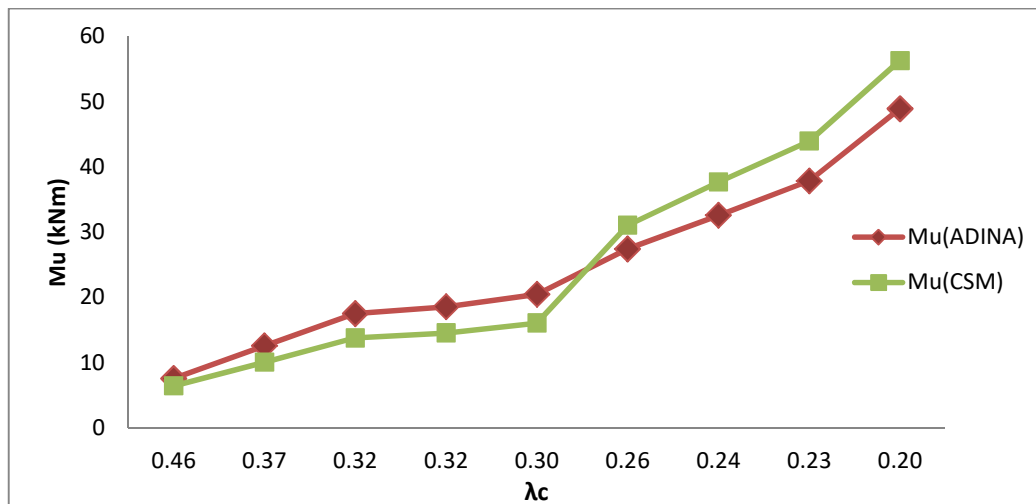
4.5.1 Αξιοπιστία της μεθόδου συνεχούς αντοχής

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση, προκειμένου να αποδειχθεί η αξιοπιστία και η εγκυρότητα της μεθόδου συνεχούς αντοχής. Διεξάχθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις και για τις 10 διατομές και ως αντοχή σε μονοαξονική κάμψη λήφθηκε η τιμή της μέγιστης ροπής που προέκυψε από τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια. Στον Πίνακα 4-3 φαίνονται οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική κάμψη, όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο συνεχούς αντοχής και όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 2008 για χάλυβα ψυχρής έλασης. Επίσης στον ίδιο πίνακα φαίνεται και το σχετικό σφάλμα μεταξύ των δυο τιμών για κάθε διατομή.

Πίνακας 4-3: Σύγκριση αποτελεσμάτων για χάλυβα ψυχρής έλασης

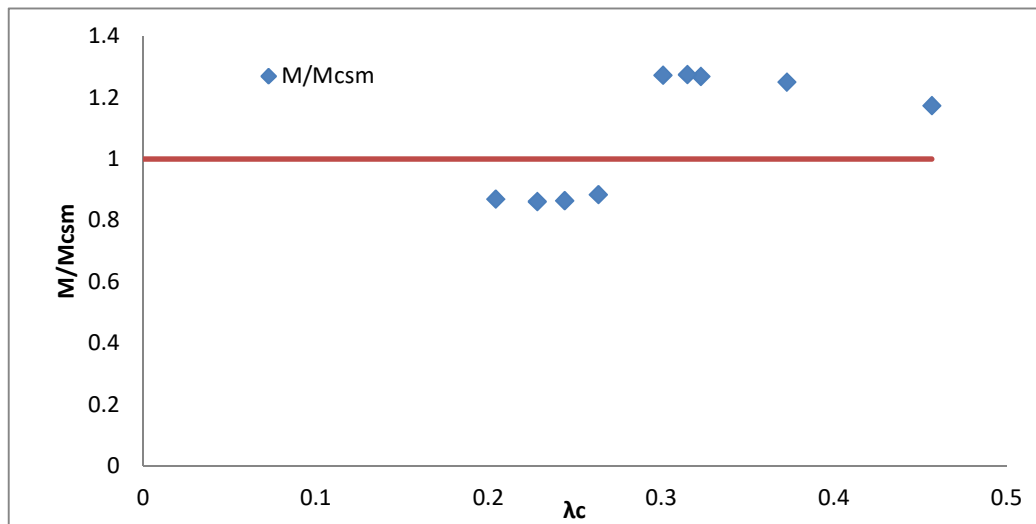
t	M(ADINA)	Mu(CSM)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
1mm	7.60197636	6.475391	14.82%
1.5mm	12.62842416	10.1009	20.01%
2mm	17.53681278	13.82062	21.19%
2.1mm	18.57621348	14.57292	21.55%
2.3mm	20.47813812	16.08446	21.46%
3mm	27.446364	31.05965	-13.16%
3.5mm	32.58638064	37.69484	-15.68%
4mm	37.84918896	43.96763	-16.17%
5mm	48.91080744	56.28818	-15.08%

Τα αποτελέσματα του Πινάκων 4-2 απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 4-12), όπου στον κατακόρυφο άξονα έχει τοποθετηθεί η μέγιστη ροπή, όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με την μέθοδο συνεχούς αντοχής και όπως προέκυψε από την αριθμητική επίλυση με το ADINA 2008, ενώ στον οριζόντιο η τιμή της ανηγμένης λυγηρότητας.



Διάγραμμα 4-12: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε μονοαξονική κάμψη για χάλυβα ψυχρής έλασης

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, η μέθοδος της συνεχούς αντοχής εμφανίζει μικρότερο σφάλμα για τιμές λυγηρότητας μεγαλύτερες από 0.3, δηλαδή για τις λεπτότοιχες διατομές. Χαρακτηριστικά, παρατηρείται ένα άλμα στο διάγραμμα λίγο μετά την τιμή 0.3, διότι πλέον οι διατομές που εξετάζονται είναι μη λεπτότοιχες. Η αριθμητική προσομοίωση των μη λεπτότοιχων διατομών δίνει τιμές αντοχής σε κάμψη ελάχιστα μικρότερες από αυτές που υπολογίζονται με την μέθοδο συνεχούς αντοχής. Παράλληλα, από το διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 4-13) φαίνεται η διασπορά των αποτελεσμάτων, γεγονός που συστήνει την περαιτέρω έρευνα, ιδιαίτερα για τις μη λεπτότοιχες διατομές.

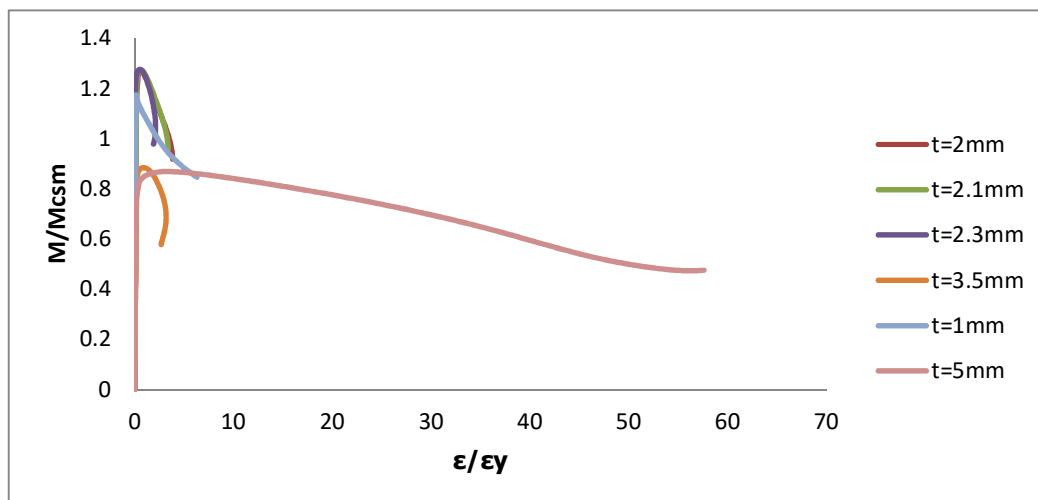


Διάγραμμα 4-13 Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και αριθμητικών αποτελεσμάτων στον υπολογισμό της αντοχής σε μονοαξονική κάμψη για χάλυβα ψυχρής έλασης

4.5.2 Ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής

Η ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής σχετίζεται άμεσα με την ανηγμένη λυγηρότητά της. Η κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες περιγράφει τον βαθμό κατά τον οποίο η ικανότητα

στροφής των διατομών περιορίζεται από τον τοπικό λυγισμό. Σύμφωνα λοιπόν με την κατάταξη των διατομών: διατομές κατηγορίας 1 εμφανίζουν απεριόριστη δυνατότητα στροφής μετά την ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής ροπής τους, οι διατομές κατηγορίας 2 εμφανίζουν περιορισμένη πλαστική στροφή, διότι αστοχούν λόγω τοπικού λυγισμού μόλις αναπτύξουν την πλήρη πλαστική ροπή, ενώ τέλος διατομές κατηγορίας 3 και 4 δεν έχουν δυνατότητα πλαστικής στροφής διότι ο τοπικός λυγισμός προηγείται της εκδήλωσης της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης. Η διακριτή όμως κατηγοριοποίηση των διατομών που εφαρμόζει ως τώρα ο Ευρωκώδικας 3 υπονοεί πως όλες οι διατομές που ανήκουν σε μια κατηγορία έχουν ακριβώς την ίδια ικανότητα πλαστικής στροφής. Τούτο έρχεται να ανατρέψει η μέθοδος συνεχούς αντοχής, η οποία αφού υιοθετεί μια συνεχή σχέση μεταξύ της ανηγμένης λυγηρότητας της διατομής και της ικανότητας της να παραμορφώνεται, αποδεικνύει ότι διατομές που με βάση των Ευρωκώδικα ανήκουν στην ίδια κατηγορία έχουν τελείως διαφορετική ικανότητα παραμόρφωσης. Στο διαγράμματα 4-14 που ακολουθεί έχουν απεικονιστεί δρόμοι ισορροπίας διατομών και από τις τέσσερις κατηγορίες του Ευρωκώδικα και για τα δύο είδη χάλυβα. Στον κατακόρυφο άξονα κάθε διαγράμματος φαίνεται η ροπή αντοχής, όπως αυτό προέκυψε από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με το ADINA 2008, διαιρεμένη με τη ροπή αντοχής που προέκυψε σύμφωνα με τη μέθοδο συνεχούς αντοχής, ενώ στον οριζόντιο φαίνεται η παραμόρφωση της διατομής ανηγμένη ως προς την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα.



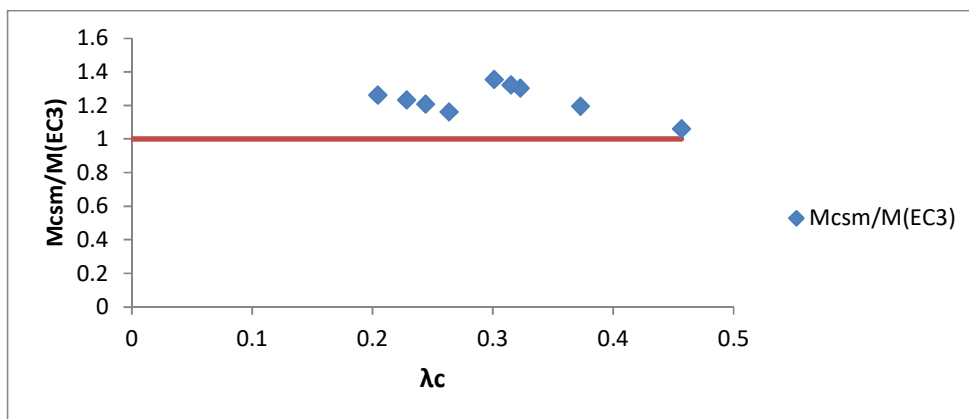
Διάγραμμα 4-14: Συνολικοί (αδιάστατοι) δρόμοι ισορροπίας για διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης
Συνολικοί (αδιάστατοι) δρόμοι ισορροπίας για διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης

Όπως φαίνεται από το προηγούμενο διάγραμμα η ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος της.

4.5.3 Σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 3

Στην παρούσα ενότητα συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου συνεχούς αντοχής με τον Ευρωκώδικα 3, προκειμένου να αποδειχθεί η ανωτερότητα της μεθόδου, έναντι της ισχύουσας λογικής σχεδιασμού.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται εποπτικά η σύγκριση, όπου στον κατακόρυφο άξονα τοποθετήθηκε η ροπή αντοχής, όπως προέκυψε με την μέθοδο της συνεχούς αντοχής αδιαστατοποιημένη ως προς την ροπή αντοχής με βάση τον Ευρωκώδικα 3, ενώ στον οριζόντιο άξονα η ανηγμένη λυγηρότητα της διατομής.



Διάγραμμα 4-15: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε μονοαξονική κάμψη για χάλυβα ψυχρής έλασης

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, η μέθοδος υπολογίζει αντοχές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του Ευρωκώδικα 3. Η μέγιστη μάλιστα διαφοροποίηση φαίνεται να υφίσταται για τις διατομές με λυγηρότητα μεταξύ των τιμών 0.25 και 0.35. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές λυγηρότητας η μέθοδος δεν διαφοροποιείται ιδιαίτερα από τον Ευρωκώδικα 3. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται αναλυτικά το ποσοστό αύξησης της ροπής αντοχής για κάθε διατομή.

Πίνακας 4-4: Συγκεντρωτικά στοιχεία σύγκρισης

t	Mu(ΕC3)	Mu(CSM)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ
1	610.3301	647.5391	5.75%
1.5	845.5012	1010.09	16.29%
2	1060.612	1382.062	23.26%
2.1	1102.739	1457.292	24.33%
2.3	1187.008	1608.446	26.20%
3	2676.702	3105.965	13.82%
3.5	3122.819	3769.484	17.16%
4	3568.936	4396.763	18.83%
5	4461.17	5628.818	20.74%

Πράγματι, για μεσαίες και μικρές τιμές λυγηρότητας το ποσοστό αύξησης φτάνει έως και το 26%. Για τις μεσαίες λυγηρότητας διατομές ($0.35 < \lambda_c < 0.3$), οι οποίες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 είναι κατηγορίας 4, η μέθοδος συνεχούς αντοχής υπολογίζει μεγαλύτερη τιμή ροπής αντοχής, διότι δεν απομειώνει την διατομή αλλά υπολογίζει την αντοχή της σύμφωνα με την ικανότητα παραμόρφωσή της, που όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4-14, δεν είναι όμοια ακόμα και διατομές που ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Αντίθετα, για τιμές λυγηρότητας μεγαλύτερες από 0.22, οι διατομές θα ανήκουν στις κατηγορίες 1 ή 2 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, οπότε η αύξηση της αντοχής τους οφείλεται στην εισαγωγή της κράτυνσης στον καταστατικό νόμο του χάλυβα.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η συγκριτική αξιολόγηση της μεθόδου συνεχούς αντοχής και της κατάταξης σε κατηγορίες κοίλων κυκλικών διατομών για το σχεδιασμό τους έναντι τοπικού λυγισμού. Ο τοπικός λυγισμός αποτελεί σημαντική μορφή αστοχίας ιδιαίτερα των λεπτότοιχων διατομών και επηρεάζει καθοριστικά την φέρουσα ικανότητά τους. Προκειμένου, λοιπόν, να ελεγχθεί η προτεινόμενη αυτή μέθοδος αντιμετώπισης του τοπικού λυγισμού στα πλαίσια του σχεδιασμού, δημιουργήθηκε ένα κυλινδρικό κέλυφος σταθερής διαμέτρου D και μεταβλητού πάχους t , οποίο προσομοιώθηκε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας, υλικού και συνδυασμός των δύο, τόσο με όσο και χωρίς ατέλειες, προκειμένου να συγκριθούν τα αριθμητικά αποτελέσματα με τις αναλυτικές λύσεις τις μεθόδου αλλά και με τον Ευρωκώδικα 3. Μελετήθηκαν δυο εντατικές καταστάσεις: κεντρική θλίψη και μονοαξονική κάμψη.

5.1.1 Κεντρική θλίψη

Τα αριθμητικά αποτελέσματα για την περίπτωση της κεντρικής θλίψης εμφανίζουν μικρή απόκλιση από τις αναλυτικές λύσεις, με τη μέγιστη απόκλιση να είναι της τάξης του 10% (χάλυβα ψυχρής έλασης) και 16% (ανοξειδωτος χάλυβα) και να εμφανίζεται για μεγάλες τιμές λυγηρότητας (Πίνακας 5-1 και 5-2).

Πίνακας 5-1: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών λύσεων για χάλυβα ψυχρής έλασης (κεντρική θλίψη)

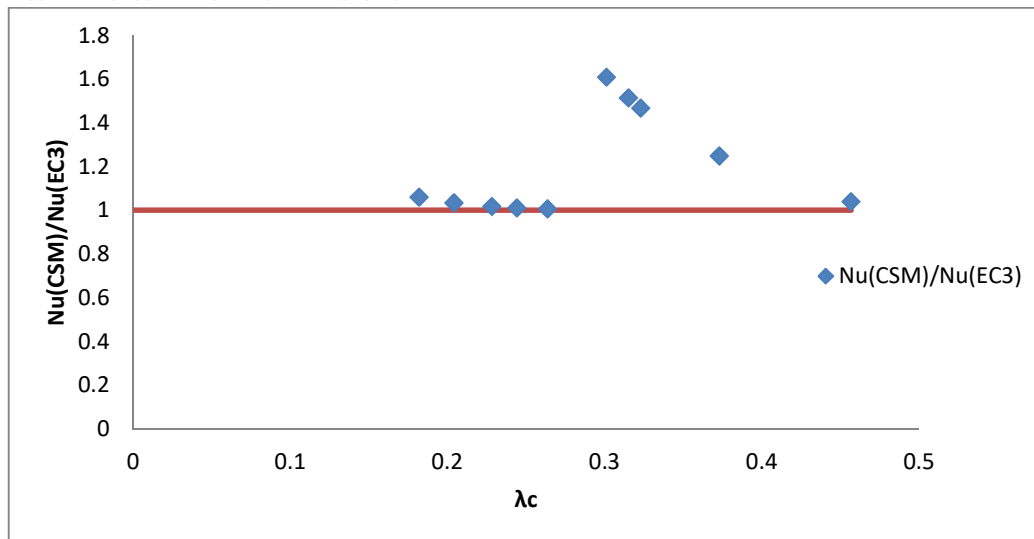
t	Nu(ADINA)	Nu(CSM)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
t=1mm	158.646	141.4397	10.85%
t=1.5mm	246.028	228.7535	7.02%
t=2mm	329.196	320.2289	2.72%
t=2.1mm	347.496	338.8818	2.48%
t=2.3mm	381.009	376.4755	1.19%
t=3mm	499.64	493.2363	1.28%
t=3.5mm	584.48	576.6991	1.33%
t=4mm	672.936	661.1689	1.75%
t=5mm	850.656	829.6875	2.46%
t=6.3mm	1040.05	1072.013	-3.07%

Πίνακας 5-2: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών λύσεων για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα (κεντρική θλίψη)

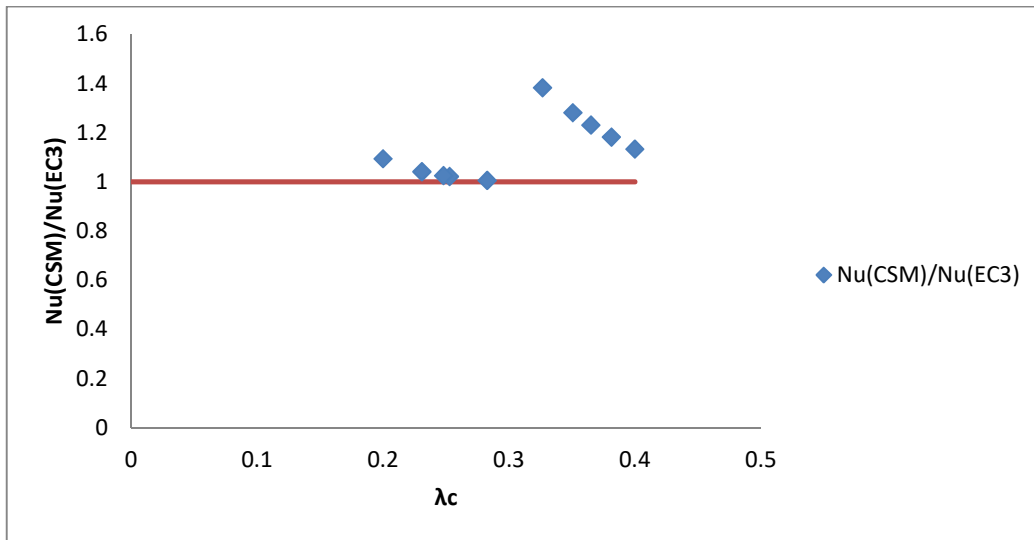
t	Nu(ADINA)	Nu(CSM)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
t=1mm	129.389	108.785	15.92%
t=1.1mm	129.389	121.7666	5.89%
t=1.2mm	141.599	134.9179	4.72%
t=1.3mm	154.936	148.2203	4.33%
t=1.5mm	179.554	175.2184	2.41%
t=2mm	249.916	241.5307	3.36%
t=2.5mm	301.773	305.6038	-1.27%
t=2.6mm	313.851	318.7533	-1.56%
t=3mm	362.202	372.6868	-2.89%
t=4mm	484.374	519.2511	-7.20%

Συνεπώς, η μέθοδος είναι αξιόπιστη για τον υπολογισμό της αντοχής σε κεντρική θλίψη λαμβάνοντας υπόψη τον τοπικό λυγισμό, ακόμα και αν για πολύ μικρές τιμές λυγηρότητας τα αριθμητικά αποτελέσματα δίνουν αντοχές μικρότερες από τις υπολογισμένες με μέγιστη απόκλιση περίπου 3% για χάλυβα ψυχρής έλασης και 7% για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα.

Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αναλυτικών λύσεων και με την μεθοδολογία αντιμετώπισης του τοπικού λυγισμού του Ευρωκώδικα 3. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν (Διάγραμμα 5-1 και 5-2), η μέθοδος της συνεχούς αντοχής υπολογίζει αντοχές μεγαλύτερες από αυτές του Ευρωκώδικα 3. Συνεπώς, γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της διατομής και άρα εξοικονόμηση υλικού.



Διάγραμμα 5-1: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη για χάλυβα ψυχρής έλασης



Διάγραμμα 5-2: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη για ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

Αξίζει να σημειωθεί ότι, μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για τις λεπτότοιχες διατομές, όπου η μέθοδος συνεχούς αντοχής υπολογίζει αντοχές έως και 1,4 φορές μεγαλύτερες από τον Ευρωκώδικα 3.

5.1.2 Μονοαξονική κάμψη

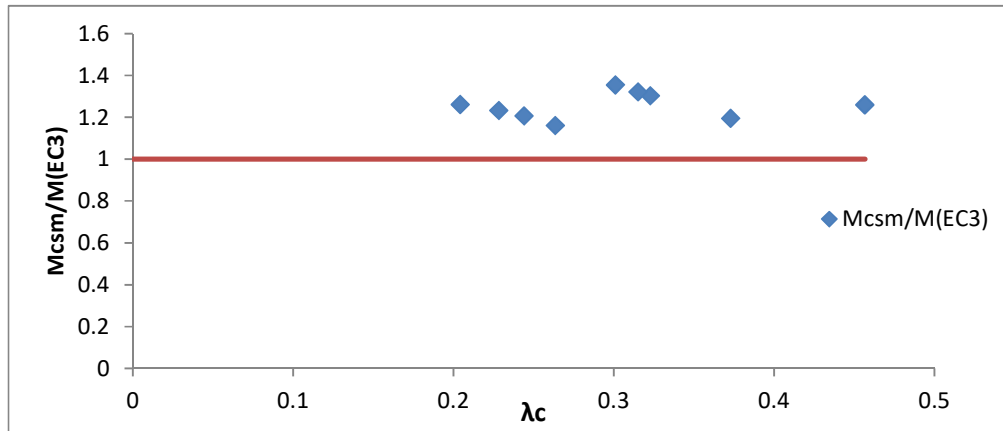
Η απόκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τις αναλυτικές λύσεις για την περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης φαίνεται να είναι μεγαλύτερη (Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-3: Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων και αναλυτικών λύσεων για χάλυβα ψυχρής έλασης (μονοαξονική κάμψη)

t	M(ΑΔΙΝΑ)	Mu(CSM)	ΑΠΟΚΛΙΣΗ
1mm	7.60197636	6.475391	14.82%
1.5mm	12.62842416	10.1009	20.01%
2mm	17.53681278	13.82062	21.19%
2.1mm	18.57621348	14.57292	21.55%
2.3mm	20.47813812	16.08446	21.46%
3mm	27.446364	31.05965	-13.16%
3.5mm	32.58638064	37.69484	-15.68%
4mm	37.84918896	43.96763	-16.17%
5mm	48.91080744	56.28818	-15.08%

Αναλυτικότερα, για τις λεπτότοιχες διατομές οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν αντοχές πολύ μεγαλύτερες από τις υπολογισμένες, ενώ για τις μη λεπτότοιχες αυτό συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Ωστόσο, η μέθοδος μπορεί και πάλι να θεωρηθεί αξιόπιστη για της ροπής αντοχής της διατομής, καθώς η μέγιστη απόκλιση για τις λεπτότοιχες διατομές που καταγράφεται είναι της τάξης του 16%.

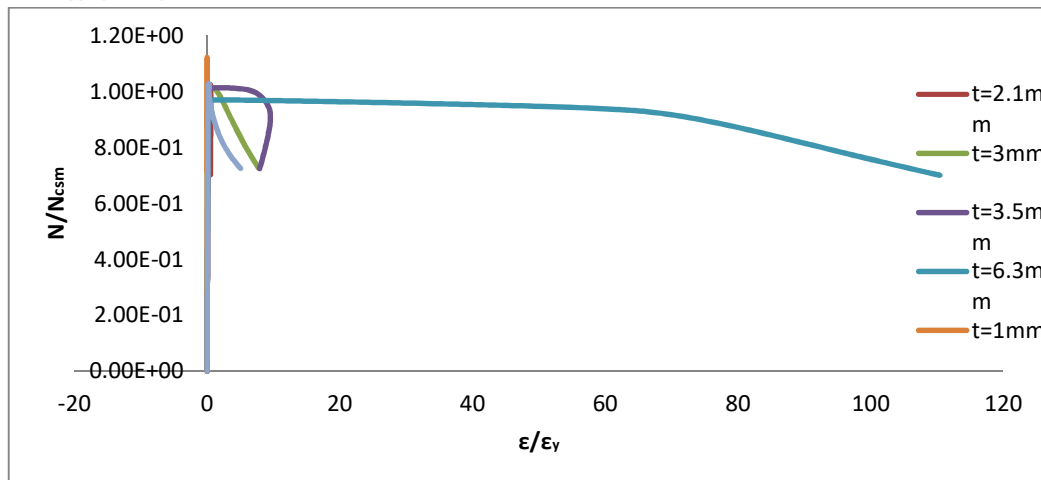
Από τη σύγκριση της μεθόδου συνεχούς αντοχής με τον Ευρωκώδικα 3 προκύπτει ότι η μέθοδος υπολογίζει έως 1.35 φορές μεγαλύτερες αντοχές από τον Ευρωκώδικα, κυρίως για τις λεπτότοιχες διατομές (Διάγραμμα 5-3).



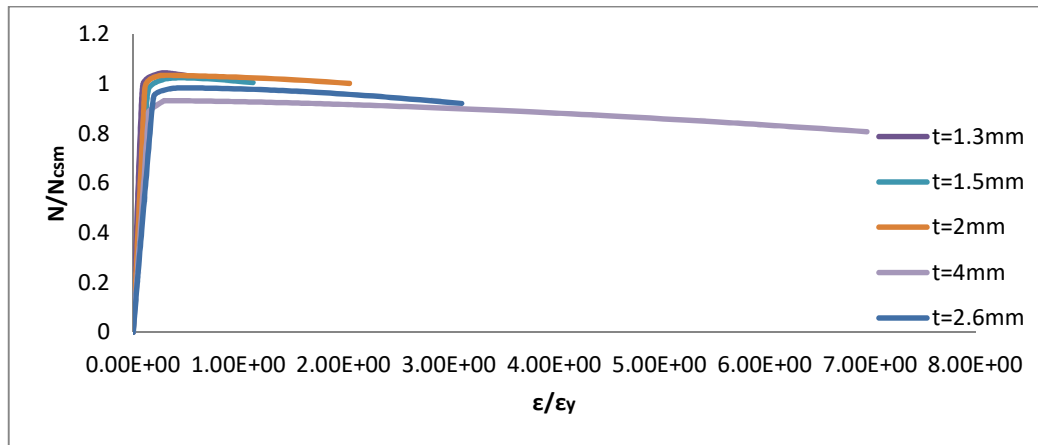
Διάγραμμα 5-3: Σύγκριση μεθόδου συνεχούς αντοχής και Ευρωκώδικα 3 στον υπολογισμό της αντοχής σε μονοαξονική κάμψη για χάλυβα ψυχρής έλασης

5.1.3 Ικανότητα παραμόρφωσης της διατομής

Ένα εξίσου ενδιαφέρον συμπέρασμα που προέκυψε από τις αριθμητικές προσομοιώσεις είναι η απόκλιση των διατομών στις δυο αυτές εντατικές καταστάσεις. Αναλυτικότερα, παρατηρήθηκε ότι η ικανότητα παραμόρφωσης μια διατομής σχετίζεται άρρηκτα με τη λυγηρότητα της και μάλιστα αυξάνεται όσο η λυγηρότητα μειώνεται. Το εύρημα αυτό έρχεται σε πλήρη ρήξη με τη λογική των Κανονισμών Σχεδιασμού, οι οποίοι πρεσβεύουν την άποψη ότι διατομές που ανήκουν στην ίδια κατηγορία (βλ. Κεφ. 1: Εισαγωγή) έχουν την ίδια ικανότητα παραμόρφωσης. Σύμφωνα με τα διαγράμματα 5-4 και 5-5 που ακολουθούν, λεπτότοιχες διατομές, που σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 ανήκουν στην κατηγορία 4, φαίνεται να εμφανίζουν διαφορετική ικανότητα παραμόρφωσης, η οποία μάλιστα αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος τους.



Διάγραμμα 5-4: Αδιάστατοι δρόμοι ισορροπίας για διατομές από χάλυβα ψυχρής έλασης



Διάγραμμα 5-5: Αδιάστατοι δρόμοι ισορροπίας για διατομές από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε σύγκριση της μεθόδου συνεχούς αντοχής για κοίλες κυκλικές διατομές με τον Ευρωκώδικα 3 για δυο εντατικές καταστάσεις: κεντρική θλίψη και μονοαξονική κάμψη για δυο μόνο είδη χάλυβα. Στο μέλλον θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιηθούν αριθμητικές αναλύσεις και για άλλα είδη χάλυβα κυρίως για τα διάφορα είδη ανοξείδωτων χαλύβων, καθώς χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στον χώρο των κατασκευών. Επιπλέον, προτείνεται έρευνα στα πλαίσια της μεθόδου, προκειμένου να ευρεθεί κατάλληλο μοντέλο περιγραφής της συμπεριφοράς του χάλυβα θερμής έλασης, αφού κάτι τέτοιο δεν υφίσταται ακόμα. Κρίνεται επίσης σκόπιμο να μελετηθεί και συνδυασμός εντατικών καταστάσεων, όπως διαξονική κάμψη ή θλίψη και μονοαξονική κάμψη, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για την αξιοπιστία της μεθόδου, όσο και για την απόκριση των διατομών υπό συνδυασμένη φόρτιση. Τέλος, θα ήταν χρήσιμο να ελεγχθεί η μέθοδος συνεχούς αντοχής και για άλλου είδους διατομές π.χ. διπλά T.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C.M. King, J.B. Davison "Cross section slenderness limits for columns with plastic rotations", Journal of Constructional Steel Research, January 2014
- [2] Shahabeddin Tarabian, Benjamin W. Schafer "Role of local slenderness in the rotation capacity of structural steel members", Journal of Constructional Steel Research, December 2013
- [3] Mahmud Ashraf, Leroy Gardner, David A. Nethercot "Resistance of stainless steel CHS columns based on cross-section deformation capacity", Journal of Constructional Steel Research, 2008
- [4] Andrew Liew, Leroy Gardner "Ultimate capacity of structural steel cross-sections under compression, bending and combined loading", Journal of Constructional Steel Research, September 2014
- [5] Craig Buchanan, Leroy Gardner, Andrew Liew "The continuous strength method for the design of circular hollow sections", Journal of Constructional Steel Research, November 2015
- [6] EN 1993-1-6: General rules - Strength and stability of shell structures.
- [7] Μ. Παπαδρακάκης, "Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
- [8] S. Alfshan, L. Gardner "The continuous strength method for structural stainless steel design", Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London, UK
- [9] Seung-Eock Kim, Chang-Sung Kim "Buckling strength of the cylindrical shell and tank subjected to axially compressive loads", Department of Civil and Environmental Engineering, Construction Tech. Research Institute, Sejong University, Seoul, South Korea, October 2001
- [10] BS EN1090-2:2008: Execution of steel structures and aluminium structures Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures

