



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

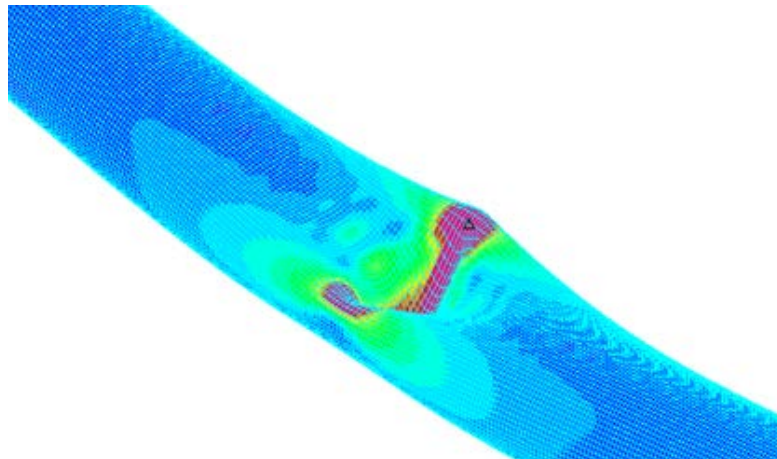
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ
ΚΕΛΥΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ**



Άγγελος Χ. Καρβέλης

Επιβλέποντες:

Χάρης Ι. Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Ε. Μελισσιανός, Υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2015

ΕΜΚ ΔΕ 2015 1

Άγγελος Χ. Καρβέλης (2015)

Διερεύνηση τοπικού λυγισμού κυλινδρικών κελυφών και υπόγειων αγωγών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 1

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Aggelos Ch. Karvelis (2015)

Local buckling investigation of cylindrical shells and underground pipes

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 1

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

Copyright © Aggelos C. Karvelis, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

No part of these pages, either text or image may be used for any purpose other than personal use. Therefore, reproduction, modification, storage in a retrieval system or retransmission, in any forms or by any mean, electronic, mechanical or otherwise, for reasons other than personal use, is strictly prohibited without prion written permission.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία
ΕΜΚ ΔΕ 2015 1

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
Άγγελος Χ. Καρβέλης

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Ε. Μελισσιανός, Υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η φέρουσα ικανότητα κυλινδρικών κελυφών υπό αξονική θλιπτική φόρτιση και καθαρή ροπή κάμψεως λόγω των οποίων αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Η διερεύνηση αυτή αποτελεί ένα καθοριστικό βήμα για τη μελέτη του τοπικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών μεταφοράς καυσίμων υποκείμενων σε ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια συνοπτική εισαγωγή στην καταπόνηση υπόγειων αγωγών καυσίμων λόγω ενεργοποίησης σεισμικού ρήγματος από το οποίο διέρχονται. Περιγράφονται, επίσης, για τον αγωγό τα είδη των σεισμικών καταπονήσεων, οι επιβαλλόμενες φορτίσεις αλλά και η επιρροή τους στη φέρουσα ικανότητα των αγωγών. Ακόμα, παρατίθενται οι κανονιστικές προβλέψεις έναντι του τοπικού λυγισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα και τον ASCE-ALA.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετώνται κυλινδρικά κελύφη καταπονούμενα από κεντρική αξονική θλιπτική δύναμη μέσω αναλυτικής και αριθμητικής προσέγγισης μέσω μη γραμμικών αναλύσεων, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίνονται.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται αριθμητική διερεύνηση κυλινδρικών κελυφών υπό ροπή κάμψεως. Επιπροσθέτως, εξετάζεται η επιρροή του μήκους του κυλίνδρου στην ανάπτυξη της ωειδούς παραμόρφωσης της διατομής του αγωγού αλλά και η αντίστοιχη μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω του αναπτυσσόμενου τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του, αναδεικνύοντας σε όλες τις περιπτώσεις τη μη γραμμική συμπεριφορά του κυλίνδρου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, εξετάζεται η επιρροή του πάχους του αγωγού στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού και στις αναπτυσσόμενες διαμήκεις παραμορφώσεις για τον αγωγό υπό καθαρή ροπή κάμψεως. Πέραν τούτου μελετάται η επιρροή του εδάφους στο οριακό φορτίο λυγισμού για τον κύλινδρο υπό κεντρική αξονική θλιπτική φόρτιση αλλά και για τον αγωγό υπό καθαρή ροπή κάμψεως λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική ολίσθηση ή μη στη διεπιφάνεια κυλίνδρου και εδάφους.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου.



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

Diploma Thesis
EMK ΔΕ 2015 1

LOCAL BUCKLING INVESTIGATION OF CYLINDRICAL SHELLS AND UNDERGROUND PIPES
Aggelos C. Karvelis

Supervisor: Charis J. Gantes, Professor N.T.U.A.

Co-Supervisor: Vasileios E. Melissianos, PhD Candidate N.T.U.A.

Abstract

In this diploma thesis the bearing capacity of cylindrical shells subjected to axial force and pure bending is investigated, which lead to local buckling of the pipe wall. This investigation is a decisive step towards the investigation of local buckling of oil steel buried pipelines subjected to seismic fault activation.

In the first chapter a brief introduction on buried pipeline stressing due to faulting is presented. Additionally, seismic loading on buried pipelines is described, as well as its effect on pipe integrity. Also, Eurocode and ASCE-ALA provisions for local buckling are outlined.

In the second chapter, cylindrical shells subjected to axial compression force are analytically and numerically studied through advanced nonlinear analyses, whose results are then compared.

In the third chapter, cylindrical shells under pure bending moment are numerically investigated. Also, the influence of cylinder length in the development of cross section ovalization is examined and the corresponding bearing capacity reduction due to local buckling is highlighted, indicating in all cases the nonlinear behavior of the cylinder.

In the fourth chapter, the influence of the wall thickness at the critical buckling load and the developing longitudinal strains for the pipeline under pure bending moment are examined. Furthermore, the influence of surrounding soil on the ultimate buckling load of the cylinder subjected to axial compression and pure bending moment are investigated.

In the fifth and last chapter, the conclusions of the diploma thesis are presented and proposals for the further investigation of this phenomenon are suggested.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με τη διπλωματική μου εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή πολιτικών μηχανικών του ΕΜΠ. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη και συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστώ τον κ. Χάρη Γαντέ για την καθοδήγηση και την επιστημονική κατάρτιση που μου παρείχε για την υλοποίηση της εργασίας αλλά και τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Μελισσιανό για τη συνεχή παρακολούθηση της εργασίας και συνεχούς πολύτιμης βοήθειας. Ευχαριστώ την διδάκτορα πολιτικό μηχανικό Ε.Μ.Π. Ισαβέλλα Βασιλλοπούλου για την συνεισφορά της στη μορφοποίηση του κειμένου. Ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον αναπληρωτή καθηγητή Ιωάννη Ραυτογιάννη και τον καθηγητή Γεώργιο Μπουκοβάλα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω φίλους και γνωστούς οι οποίοι με προέτρεψαν όπως επίσης μου έδωσαν τη δύναμη να συνεχίσω.

Άγγελος Χ. Καρβέλης

Φεβρουάριος 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1. Γενικά.....	1
1.2. Σεισμική καταπόνηση αγωγών.....	2
1.3. Μη σεισμικές δράσεις.....	5
1.3.1. Γενικά.....	5
1.3.2. Συνδυασμοί φορτίων για οριακές καταστάσεις αστοχίας.....	5
1.4. Επιβαλλόμενες φορτίσεις.....	5
1.4.1. Αξονική φόρτιση.....	6
1.4.2. Ροπή κάμψεως.....	6
1.4.2.1. Μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω του φαινομένου Brazier.....	6
1.4.2.2. Μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω τοπικού λυγισμού.....	7
1.5. Τοπικός λυγισμός κελυφών.....	8
1.6. Κανονιστικές προβλέψεις έναντι τοπικού λυγισμού.....	9
1.6.1. Κανονιστικές προβλέψεις Ευρωκωδίκων.....	9
1.6.2. Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις κατά τον ASCE-ALA.....	10
1.7. Βιβλιογραφία.....	10

Κεφάλαιο 2 – Κύλινδρος υπό θλίψη

2.1. Γενικά.....	13
2.2. Αναλυτική προσέγγιση.....	13
2.3. Αριθμητική προσέγγιση.....	14
2.3.1. Στοιχεία αγωγών.....	14
2.3.2. Προσομοίωση κυλίνδρου με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.....	14
2.4. Αριθμητική επίλυση αγωγού A - Ανάλυση λυγισμού.....	15
2.4.1. Πύκνωση πλέγματος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.....	15
2.4.2. Παραμετρική ανάλυση λυγισμού.....	18
2.5. Ανάλυση αγωγού B - Ανάλυση λυγισμού.....	19

2.5.1. Πύκνωση πλέγματος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.....	19
2.5.2. Επιρροή πλέγματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού.....	20
2.6. Ανάλυση αγωγού Β - Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας.....	22
2.6.1. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλειες.....	24
2.6.1.1. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=0.2$	24
2.6.1.2. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=0.5$	26
2.6.1.3. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=1.0$	28
2.7. Ανάλυση αγωγού Β με αλλαγή συστήματος συντεταγμένων (κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων).....	30
2.7.1. Γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού.....	30
2.7.2. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας.....	31
2.8. Συμπεράσματα.....	33
2.9. Βιβλιογραφία.....	33

Κεφάλαιο 3 – Κύλινδρος υπό ροπή κάμψεως

3.1. Γενικά.....	35
3.2. Κατηγορίες αγωγών.....	36
3.3. Γενικά στοιχεία προσομοιωμάτων.....	38
3.4. Ανάλυση αγωγού Β.....	39
3.4.1. Γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού.....	40
3.4.2. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας.....	40
3.5. Ανάλυση αγωγού Γ.....	43
3.5.1. Πύκνωση πλέγματος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.....	43
3.5.2. Γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού.....	44
3.5.3. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας.....	45
3.5.4. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλειες.....	49
3.5.4.1. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=0.2$	49
3.5.4.2. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=0.5$	52
3.5.4.3. Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=1.0$	55
3.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	58
3.7. Συμπεράσματα.....	61
3.8. Βιβλιογραφία.....	62

Κεφάλαιο 4 – Προσομοίωση κυλίνδρων με περιβάλλον έδαφος

4.1. Γενικά.....	63
4.2. Κύλινδρος υπό αξονική φόρτιση.....	64
4.2.1. Σκέτος κύλινδρος.....	64
4.2.2. Κύλινδρος με έδαφος.....	65
4.3. Κύλινδρος υπό ροπή κάμψεως.....	68
4.3.1. Σκέτος κύλινδρος.....	68
4.3.1.1. Παραμετρική ανάλυση πάχους κυλίνδρου.....	72
4.3.2. Κύλινδρος με έδαφος.....	76
4.3.2.1. Παραμετρική ανάλυση μέτρου ελαστικότητας εδάφους.....	76
4.3.2.2. Παραμετρική ανάλυση συντελεστή τριβής εδάφους.....	82
4.4. Συμπεράσματα.....	88

4.5. Βιβλιογραφία.....	88
------------------------	----

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα

5.1. Γενικά.....	89
5.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	90

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι μεταλλικοί αγωγοί αποτελούν το συνηθέστερο, οικονομικότερο και αποτελεσματικότερο τρόπο για τη μεταφορά πετρελαίου και πετρελαϊκών προϊόντων. Κατασκευάζονται συνήθως από ειδικής ποιότητας χάλυβα ο οποίος αφενός πρέπει να έχει επαρκής μηχανικές ιδιότητες, αφετέρου να είναι συγκολλησίμος. Οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων χαρακτηρίζονται ως κατασκευές πολύ υψηλής επικυδυνότητας, καθώς ενδεχόμενη αστοχία τους μπορεί να έχει σημαντικές οικονομικές απώλειες, καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και να οδηγήσει σε ανθρώπινους τραυματισμούς, ακόμα και θύματα, ως αποτέλεσμα επί παραδείγματι μιας έκρηξης.

Οι κύριοι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων (transmission pipelines) έχουν συνήθως μεγάλη διάμετρο και το μεταφερόμενο υγρό βρίσκεται υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Οι αγωγοί αυτοί είτε θάβονται στο έδαφος μερικά μέτρα κάτω από τη στάθμη της επιφάνειας του εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1 και στο Σχήμα 1-2, είτε τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους, πάνω σε βάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3 και στο Σχήμα 1-4. Η επιλογή της ταφής γίνεται προκειμένου να προστατευθούν έναντι διάβρωσης, έναντι εξωτερικών τυχρηματικών δράσεων, όπως είναι τα χτυπήματα από γεωργικά μηχανήματα, αλλά και προκειμένου το έδαφος να παρέχει στήριξη στη διατομή του αγωγού και να εξισορροπεί την εσωτερική πίεση.



Σχήμα 1-1: Υπόγειος μεταλλικός αγωγός



Σχήμα 1-2: Υπόγειος μεταλλικός αγωγός



Σχήμα 1-3: Υπέργειος μεταλλικός αγωγός



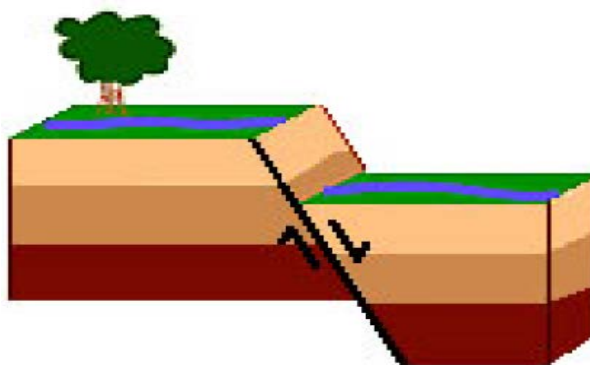
Σχήμα 1-4: Υπέργειος μεταλλικός αγωγός

1.2 Σεισμική Καταπόνηση Αγωγών

Η απόκριση των αγωγών στη σεισμική καταπόνηση διαφέρει από τις συνήθεις κατασκευές. Οι συνήθεις κατασκευές θεμελιώνονται στο έδαφος και είναι υπέργειες. Αντιθέτως, οι αγωγοί είναι θαμμένοι μέσα στο έδαφος, και λόγω του μεγάλου τους μήκους είναι υποχρεωμένοι να ακολουθήσουν την κίνηση του εδάφους. Οι σεισμικές καταπονήσεις των αγωγών οφείλονται στη διάδοση σεισμικών κυμάτων, στη ρευστοποίηση του εδάφους και σε μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις. Στην τελευταία περίπτωση εντάσσονται οι περιπτώσεις κατολίσθησης και ενεργοποίησης σεισμικού ρήγματος, από τα οποία μπορεί να διέρχεται ο αγωγός. Παλαιότερα σεισμικά γεγονότα έχουν αναδείξει ως κύρια αιτία αστοχίας των υπόγειων αγωγών την ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος, η οποία οδηγεί σε διαφορικές εδαφικές μετακινήσεις της τάξης των μερικών μέτρων. Αυτές τις εδαφικές μετακινήσεις ο αγωγός οφείλει να ακολουθήσει. Εξάλλου, το μεγάλο μήκος των αγωγών, οι οποίοι εκτείνονται σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων καθιστά σχεδόν αναπόφευκτη σε πολλές περιπτώσεις τη διέλευση από σεισμικές περιοχές οι οποίες συνήθως περιλαμβάνουν και ενεργά σεισμικά τεκτονικά ρήγματα. Τούτο είναι

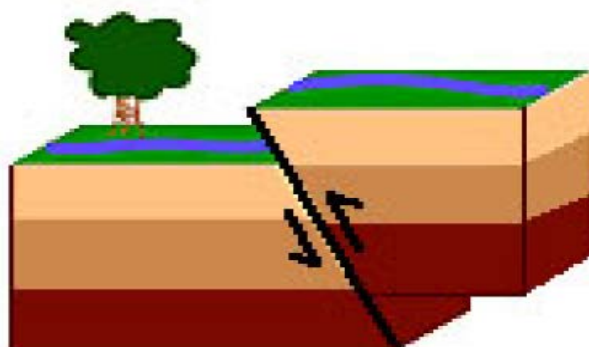
συνέπεια του γεγονότος ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή των αγωγών πραγματοποιείται εντός ενός αυστηρού κανονιστικού και ρυθμιστικού πλαισίου αναφορικά με την προστασία του περιβάλλοντος, την αποφυγή περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών, την αποφυγή κατοικημένων περιοχών και την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ασφάλειας της κατασκευής. Η συνήθης διάκριση των ρηγμάτων είναι:

- Κανονικό ρήγμα: το ένα εδαφικό τμήμα ολισθαίνει προς τα κάτω όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-5. Η γωνία κλίσης συνήθως είναι μεγαλύτερη των 45° . Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται εφελκυστικές δυνάμεις και αυξάνεται ο όγκος του γεωλογικού σχηματισμού.



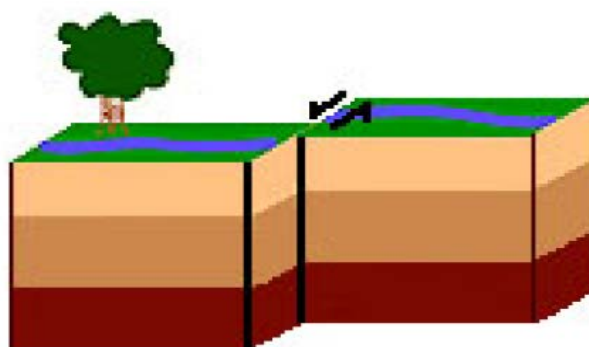
Σχήμα 1-5: Κανονικό ρήγμα

- Ανάστροφο ρήγμα: το πάνω τμήμα ολισθαίνει προς τα πάνω, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-6 σε αντίθεση με τα κανονικά ρήγματα. Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται θλιπτικές δυνάμεις και μειώνεται ο όγκος του γεωλογικού σχηματισμού.



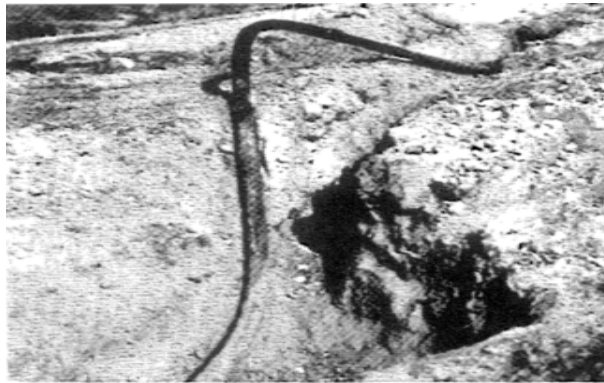
Σχήμα 1-6: Ανάστροφο ρήγμα

- Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης: το ένα εδαφικό τμήμα μετατοπίζεται οριζόντια σε σχέση με το άλλο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-7. Διακρίνονται σε αριστερόστροφα και δεξιόστροφα.



Σχήμα 1-7: Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης

Σύμφωνα με τις εδαφικές παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-5, Σχήμα 1-6 και στο Σχήμα 1-7, ο αγωγός καταπονείται από εφελκυστικές ή θλιπτικές δυνάμεις και καμπτική ροπή ή των συνδυασμό αυτών. Στην περίπτωση των εφελκυστικών δυνάμεων η ενδεχόμενη μορφή αστοχίας του αγωγού είναι η θραύση των συγκολλήσεων των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού. Ο τοπικός λυγισμός του κελύφους του αγωγού οφείλεται σε συγκέντρωση μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων, ενώ ο καθολικός λυγισμός εκδηλώνεται λόγω μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων κυρίως στην περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων. Ο λυγισμός του αγωγού είτε τοπικός είτε καθολικός αποτελεί την κρίσιμότερη μορφή αστοχίας στην περίπτωση ενεργοποίησης του ρήγματος. Η περίπτωση αστοχίας λόγω καθολικού λυγισμού, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-8, είναι κρίσιμη στις περιπτώσεις αγωγών οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε μικρό βάθος ταφής και χαρακτηρίζονται από μικρό λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος. Στην περίπτωση αυτή κατά την αστοχία ο αγωγός παραμορφώνεται με το χαρακτηριστικό σχήμα Ω, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις.

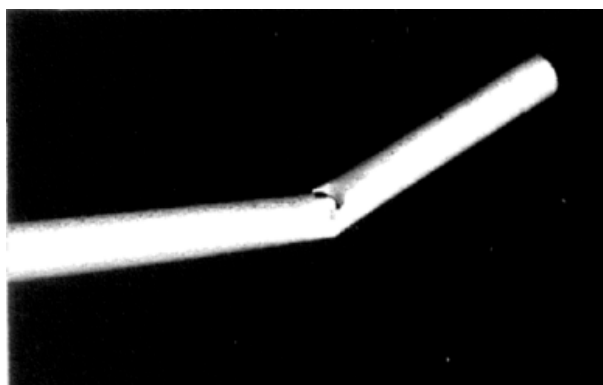


Σχήμα 1-8: Συμπεριφορά αγωγού ως δοκός (Yun and Kyriakides, 1990)

Στις περιπτώσεις όμως, όπου αυξάνεται ο λόγος της ακτίνας προς το πάχος του, όσο πιο λεπτότοιχος δηλαδή είναι ο αγωγός ή με την αύξηση του βάθους ταφής του, ο αγωγός συμπεριφέρεται ως κέλυφος και αναδεικνύεται ως κρίσιμη μορφή αστοχίας ο τοπικός λυγισμός, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-9 και στο Σχήμα 1-10. Εξαιτίας της συμπεριφοράς αυτής κρίνεται σκόπιμο η προσομοίωση των κυλινδρικών αγωγών να πραγματοποιείται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 1-9: Αστοχία αγωγού (Yun and Kyriakides, 1990)



Σχήμα 1-10: Συμπεριφορά αγωγού ως κέλυφος (Yun and Kyriakides, 1990)

Όπως στην περίπτωση του καθολικού λυγισμού, έτσι και στην περίπτωση του τοπικού αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις.

1.3 Μη Σεισμικές Δράσεις

1.3.1 Γενικά

Οι δράσεις που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό μεταλλικών αγωγών σύμφωνα με τον EC3, είναι η εξωτερική πίεση που δέχεται ένας αγωγός, η εσωτερική πίεση στις συνθήκες λειτουργίας του, το ίδιο βάρος του αλλά και των περιεχομένων του, τα φορτία του εδάφους, τα φορτία κυκλοφορίας στην επιφάνεια του εδάφους, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, τα φορτία λόγω σεισμικής διέγερσης αλλά και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις εξαιτίας διαφορικών καθιζήσεων και καθιζήσεων λόγω εξορύξεων και κατολισθήσεων.

1.3.2 Συνδυασμοί φορτίων για οριακές καταστάσεις αστοχίας

Οι συνδυασμοί φορτίσεων για τον έλεγχο του μεταλλικού αγωγού έναντι οριακής κατάστασης αστοχίας είναι:

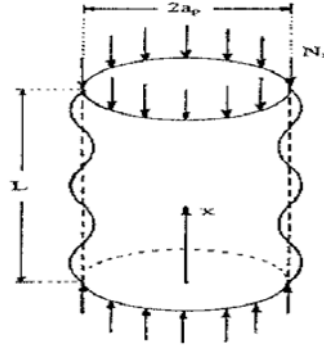
- Η διαφορά της μέγιστης εξωτερικής πίεσης και της μικρότερης εσωτερικής πίεσης, στις οποίες προστίθενται τα φορτία σχεδιασμού. Ο συνδυασμός αυτός χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ωσειδούς παραμόρφωσης της διατομής του αγωγού αλλά και για τον έλεγχο των κρίσιμων παραμορφώσεων.
- Για τον έλεγχο των κρίσιμων παραμορφώσεων λαμβάνεται υπόψη η διαφορά της μέγιστης εσωτερικής πίεσης και της ελάχιστης εξωτερικής πίεσης, προσθέτοντας τα φορτία σχεδιασμού.
- Για τον προσδιορισμό του πάχους ενός αγωγού λαμβάνεται υπόψη η διαφορά μεταξύ της μέγιστης εσωτερικής πίεσης και της ελάχιστης εξωτερικής πίεσης.

1.4 Επιβαλλόμενες φορτίσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μια καθοριστικής σημασίας εισαγωγή στη μελέτη του τοπικού λυγισμού των κυλινδρικών αγωγών. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και ποιο συγκεκριμένα η ακτίνα και το πάχος του, καθορίζουν τη φέρουσα ικανότητά του. Όμως, η διαφοροποίηση του μήκους στα κυλινδρικά προσομοιώματα μεταβάλλει η συμπεριφορά τους (Rotter et al., 2014). Επιπροσθέτως, υπό την επιβολή φορτίσεων όπως η ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος, ο εδαφικός όγκος περιορίζει την ελεύθερη μετακίνηση του αγωγού. Όμως για τη μελέτη του φαινομένου, συνηθίζεται να μελετώνται αρχικά σε ερευνητικό επίπεδο απλούστερες μορφές φόρτισης και κατόπιν συνθετότερες. Έτσι, οι φορτίσεις που επιλέγονται για τη μελέτη του κελύφους είναι η κεντρική αξονική θλιπτική φόρτιση και η καθαρή ροπή κάμψης, όπως αυτές που περιγράφονται στις παραγράφους 1.4.1 και 1.4.2 αντίστοιχα.

1.4.1 Αξονική φόρτιση

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αλλά και γενικότερα μελετάται τόσο η συμπεριφορά όσο και η φέρουσα ικανότητα κυλινδρικών αγωγών οι οποίοι υποβάλλονται σε κεντρική αξονική θλιπτική φόρτιση. Υπό την επιβολή της θλίψης τα κελύφη δύνανται να αναπτύξουν την αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-11.



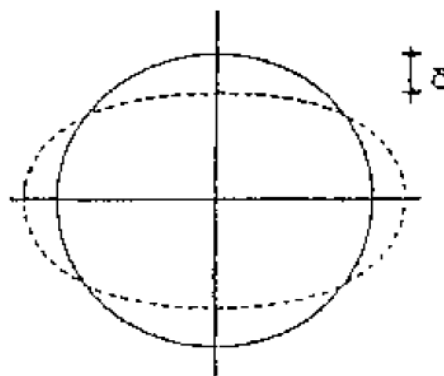
Σχήμα 1-11: Αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού (Gantes and Gerogianni, 2002)

1.4.2 Ροπή κάμψεως

Με την επιβολή καθαρής ροπής κάμψεως σε έναν κυλινδρικό αγωγό, αναπτύσσονται θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις στα δυο άκρα της διατομής του αγωγού στο επίπεδο της κάμψης. Λόγω της ανάπτυξης θλιπτικών παραμορφώσεων στα τοιχώματα του αγωγού δύναται να εκδηλωθεί τοπικός λυγισμός του αγωγού. Σε ένα βραχύ κύλινδρο υπό κάμψη αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού, χωρίς να οβαλοποιείται η διατομή του. Όμως με την αύξηση του μήκους του κυλινδρικού αγωγού, παρατηρείται η σταδιακή ωσειδής παραμόρφωση της διατομής του, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας του. Για αγωγούς μεγάλου μήκους η μείωση της φέρουσας ικανότητας εμφανίζεται μέσω του οριακού σημείου ή λόγω τοπικού λυγισμού.

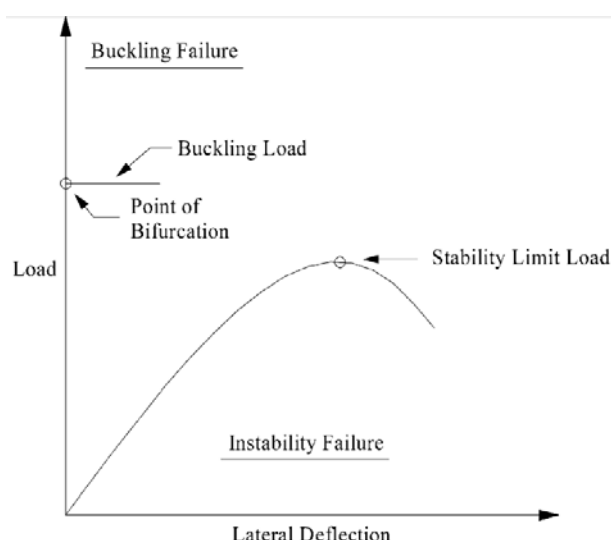
1.4.2.1 Μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω του φαινομένου Brazier

Τα κυλινδρικά κελύφη που καταπονούνται από καθαρή ροπή κάμψεως υφίστανται παραμόρφωση της διατομής τους από την αρχικά κυκλική σε ωσειδής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-12.



Σχήμα 1-12: Ωσειδής παραμόρφωση κυλινδρικού αγωγού (Gantes and Gerogianni, 2002)

Λόγω της παραμόρφωσης αυτής, μειώνεται σταδιακά και η φέρουσα ικανότητα του κυλίνδρου. Ο δρόμος ισορροπίας ενός μοντέλου με αυτά τα χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-13. Όπως παρατηρείται, ο δρόμος ισορροπίας χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα και το φορτίο λυγισμού αντιστοιχεί στο οριακό σημείο του (stability limit load).



Σχήμα 1-13: Δρόμος ισορροπίας με οριακό σημείο (Kim and Kim, 2002)

Το οριακό σημείο του δρόμου ισορροπίας περιεγράφηκε από τον Brazier και προσδιορίζεται αναλυτικά από τη σχέση (1.1):

$$M_{\text{Braz}} = 1.035Ert^2 \quad (1.1)$$

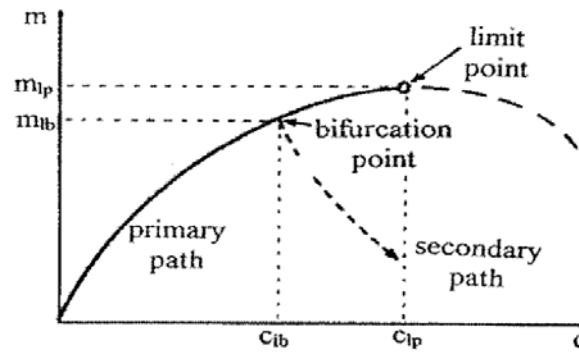
όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού, r η ακτίνα του αγωγού και t το πάχος του αγωγού.

1.4.2.2 Μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω τοπικού λυγισμού

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες διατομές αγωγών είναι αρκετές λεπτότοιχες, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης τοπικού λυγισμού. Ο λυγισμός χαρακτηρίζεται εν γένει από έντονη μη-γραμμικότητα, όπου η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Έτσι, οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα πρέπει να διατυπώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση. Οπότε, για την αξιολόγηση της προλυγισμικής και της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του αγωγού απαιτούνται μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας. Η φέρουσα ικανότητα ενός αγωγού υποβαλλόμενου σε καθαρή ροπή κάμψεως εξαρτάται από το μήκος του. Στην περίπτωση των βραχέων κυλίνδρων, όπου δεν οβαλοποιείται η διατομή του, η αστοχία επέρχεται για ροπή κάμψεως ίση με:

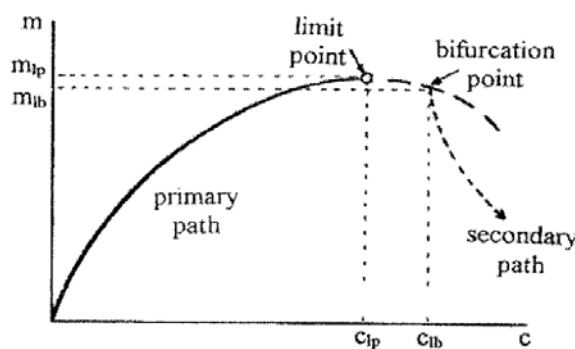
$$M_{\text{cl}} = 1.901Ert^2 \quad (1.2)$$

Για μακρύτερους όμως κυλίνδρους, όπως ήδη αναφέρθηκε, μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του αγωγού λόγω της οβαλοποίησης την οποία υφίσταται η διατομή. Παρόλα αυτά, υπάρχει το ενδεχόμενο να αναπτυχθεί τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού τόσο πριν το οριακό σημείο όσο και μετά από αυτό. Στο Σχήμα 1-14 περιγράφεται η περίπτωση όπου ο τοπικός λυγισμός εκδηλώνεται μέσω σημείου διακλάδωσης (bifurcation point) πριν το οριακό σημείο.



Σχήμα 1-14: Αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού (Gantes and Gerogianni, 2002)

Αντιθωσ, για την περίπτωση όπου ο τοπικός λυγισμός αναπτυχθεί μετά το οριακό σημείο, ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-15.



Σχήμα 1-15: Αστοχία λόγω οριακού σημείου (Gantes and Gerogianni, 2002)

Έτσι, από τις σχέσεις (1.1) και (1.2), προκύπτει ότι:

$$\frac{M_{cl}}{M_{Braz}} = 1.837 \quad (1.3)$$

Από τη σχέση (1.3) προκύπτει ότι η μείωση της φέρουσας ικανότητας ενός αγωγού λόγω της ωσειδούς παραμόρφωσης είναι αρκετά μεγάλη.

1.5 Τοπικός λυγισμός κελυφών

Ο τοπικός λυγισμός των κυλινδρικών κελυφών, όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες αποτελεί την κρίσιμη μορφή αστοχίας τους και δύναται να προκαλέσει καταστροφικές βλάβες με επιπτώσεις τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές στην περίπτωση των αγωγών. Για το λόγο αυτό, η ευστάθεια των κελυφών αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό θέμα τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο. Οι Kim and Kim (2002) παρουσίασαν μια παραμετρική ανάλυση κυλίνδρων και δεξαμενών υπό αξονική φόρτιση και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού προκύπτει όταν ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο του αγωγού είναι μικρότερος από 0.5 και ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος του είναι μεγαλύτερος από 900. Οι Rotter et al. (2014) ερεύνησαν την επιρροή του μήκους του αγωγού στον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου και παρουσίασαν τέσσερις κατηγορίες αγωγών συνδέοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους με το φορτίο αστοχίας. Οι Houliaira and Karamanos (2006) μελέτησαν αγωγούς υποβαλλόμενους σε φορτία εσωτερικής πίεσης και κάμψης και κατέληξαν στο γεγονός ότι οι συνθήκες εξωτερικής πίεσης μειώνουν το φορτίο αστοχίας ενώ η παρουσία εσωτερικής πίεσης μειώνει την ωσειδή παραμόρφωση της

διατομής του αγωγού διότι επιβάλλει ομοιόμορφο εφελκυσμό που ανακουφίζει από τις θλιπτικές παραμορφώσεις που προκαλούν λυγισμό. Οι Yun and Kyriakides (1990) διερεύνησαν τα είδη αστοχίας ενός αγωγού και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι εξαρτώνται από το βάθος στο οποίο ο αγωγός είναι τοποθετημένος, το λόγο της ακτίνας προς το πάχος του αγωγού, το βάρος του περιεχόμενου υγρού καθώς και τη μεγάλη επιρροή των αρχικών ατελειών στα είδη αστοχίας. Οι Vazouras et al. (2012) μελέτησαν τη συμπεριφορά αγωγών υποκείμενων σε μετακίνηση σεισμικών ρηγμάτων και διαπίστωσαν ότι η δημιουργία του τοπικού λυγισμού λόγω θλιπτικών τάσεων αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας.

1.6 Κανονιστικές προβλέψεις έναντι τοπικού λυγισμού

Ο τοπικός λυγισμός και η οβαλοποίηση της διατομής αποτελούν κρίσιμες μορφές αστοχίας υπόγειων μεταλλικών αγωγών. Για την αποφυγή των αστοχιών αυτών, προτείνονται στους κανονισμούς περιορισμοί για τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στους αγωγούς και κατά κύριο λόγο των θλιπτικών παραμορφώσεων, αφού αυτές προκαλούν τον τοπικό λυγισμό.

1.6.1 Κανονιστικές προβλέψεις Ευρωκωδίκων

Στο μέρος 4-3 του Ευρωκώδικα 3 προβλέπονται διατάξεις για τον περιορισμό των παραμορφώσεων και κατά κύριο λόγο θλιπτικών παραμορφώσεων. Επίσης, μέσω της παραμέτρου a ελέγχεται η ωσειδής παραμόρφωση του αγωγού που έχει ως στόχο τον περιορισμό της σταδιακής οβαλοποίησης της διατομής του αγωγού, η οποία οδηγεί σε μείωση της φέρουσας ικανότητας του αγωγού, και ισούται με:

$$a = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{4} \quad (1.4)$$

όπου D_{\max} είναι η εξωτερική διάμετρος και D_{\min} η εσωτερική διάμετρος του αγωγού.

Η παραμόρφωση θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη τιμή της ωσειδούς παραμόρφωσης, η οποία ισούται με:

$$a_{\max} = xD_e \quad (1.5)$$

όπου D_e είναι η εξωτερική διάμετρος και x είναι η προτεινόμενη τιμή του Ευρωκώδικα η οποία ισούται με 0.05.

Ο έλεγχος των θλιπτικών παραμορφώσεων ϵ_{cr} πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων (1.6) και (1.7).

$$\epsilon_{cr} = 0.25 \frac{t}{r_o} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{pr_o}{Et} \right)^2 \frac{|p|}{p}, \text{ για } \frac{r_o}{t} \leq 60 \quad (1.6)$$

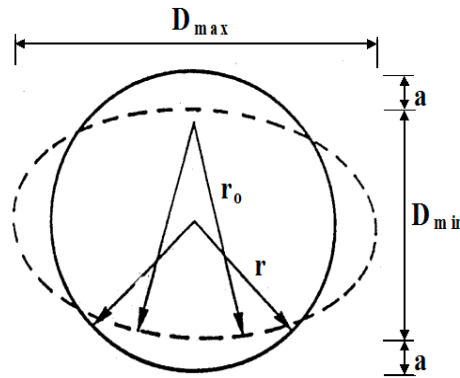
ή

$$\epsilon_{cr} = 0.10 \frac{t}{r_o} + 3000 \left(\frac{pr_o}{Et} \right)^2, \text{ για } \frac{r_o}{t} \geq 60 \quad (1.7)$$

Στις σχέσεις (1.6) και (1.7) η παράμετρος r_o υπολογίζεται ως εξής:

$$r_o = \frac{r}{1 - \frac{3a}{r}} \quad (1.8)$$

Οι παράμετροι της σχέσης (1.8) παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-16:



Σχήμα 1-16: Ακτίνα r_o σε ωσειδώς παραμορφωμένη διατομή (EC3)

Σε όλες τις περιπτώσεις ελέγχου αστοχίας των αγωγών, θα πρέπει να ικανοποιείται η ανισότητα ασφαλείας:

$$\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_{cr} \quad (1.9)$$

1.6.2 Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις κατά τον ASCE-ALA

Στον κανονισμό ASCE-ALA προτείνονται ανάλογα όρια για τις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις αγωγών οι οποίοι καταπονούνται από μόνιμες μετατοπίσεις του εδάφους λόγω ρηγμάτων. Ειδικότερα, η μέγιστη διαμήκης εφελκυστική παραμόρφωση $\varepsilon_{t,c}$ ορίζεται ως:

$$\varepsilon_{t,c} = 2\% \quad (1.10)$$

ενώ η μέγιστη διαμήκης θλιπτική παραμόρφωση $\varepsilon_{c,c}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{c,c} = 0.50\left(\frac{t}{D'}\right) - 0.0025 + 3000\left(\frac{pD}{2Et}\right)^2 \quad (1.11)$$

Στη σχέση (1.11), ως D' ορίζεται:

$$D' = \frac{D}{1 - \frac{3}{D}(D - D_{\min})} \quad (1.12)$$

όπου D είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, D_{\min} η εσωτερική διάμετρος του αγωγού, t το πάχος του αγωγού, p η εσωτερική πίεση του αγωγού και E το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού.

1.7 Βιβλιογραφία

ADINA R & D Inc., Theory and Modelling guide Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, Watertown, USA, 2008

ALA American Lifelines Alliance, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe – July 2001 (with addenda through February 2005), 2005

Calladine C.R., "Theory of shell structures", Cambridge University Press, 1983

Dimopoulos, C.A., Gantes, C.J., "Comparison of alternative algorithms for buckling analysis of slender steel structures", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 44, No. 2, pp. 219-238, 2012

EN 1993-4-3 (2007). Eurocode 3: Design of steel structures. Part 4-3 Pipelines. CEN, Brussels

- Gantes, C.J. and Gerogianni, D.S., "Infinitely Long Buried Pipelines under Bending and Internal Pressure", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS*, Vol. 43, No. 2, pp. 101-114, 2002
- Houliara, S. and Karamanos, S.A., "Buckling and post-buckling of long pressurized elastic thin-walled tubes under in-plane bending", *International Journal of Non-linear Mechanics* 41, pp. 491-511, 2006
- Kim, S.-E. and Kim, C.-S., "Buckling strength of the cylindrical shell and tank subjected to axially compressive loads", *Thin-Walled Structures* 40, pp. 329–353, 2002
- Rotter, J.M., Sadowski, A.J. and Chen, L., "Nonlinear stability of thin elastic cylinders of different length under global bending", *International Journal of Solids and Structures* 51, pp. 2826-2839, 2014
- Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas, P., "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 41, pp. 164-180, 2012
- Yun, H. and Kyriakides, S., "On the beam and shell modes of buckling of buried pipelines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 179-193, 1990
- Βασικές έννοιες σεισμολογίας, Σημειώσεις ΕΜΠ

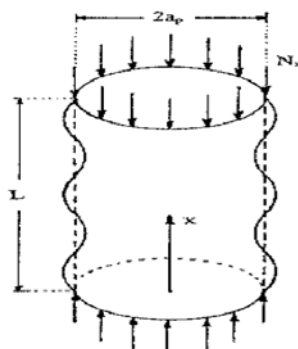
2 ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΥΠΟ ΘΛΙΨΗ

2.1 Γενικά

Οι σεισμικές δράσεις που ασκούνται σε έναν υπόγειο μεταλλικό αγωγό οφείλονται σε ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος, σε ρευστοποίηση του εδάφους κλπ. και τον καταπονούν έντονα με αποτέλεσμα να κινδυνεύει άμεσα η δομική του ακεραιότητα. Η καταπόνηση οφείλεται σε ανάπτυξη σύνθετης έντασης και ο έλεγχος του αγωγού γίνεται σε όρους ανηγμένων παραμορφώσεων. Έτσι, η ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων ενδέχεται να οδηγήσει σε θραύση των συγκολλήσεων μεταξύ των διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων του αγωγού, ενώ η ανάπτυξη θλιπτικών παραμορφώσεων δύναται να οδηγήσει σε εκδήλωση τοπικού λυγισμού. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς κυλινδρικών αγωγών υπό τη δράση κεντρικής θλιπτικής αξονικής δύναμης με στόχο τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA (2008) με αναλυτικές σχέσεις οι οποίες έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Η διερεύνηση περιλαμβάνει τόσο τα φορτία λυγισμού, όσο και την πλήρη μη-γραμμική συμπεριφορά του φορέα.

2.2 Αναλυτική προσέγγιση

Η αναλυτική προσέγγιση για τον προσδιορισμό του κρίσιμου φορτίου της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού ενός αγωγού υπό κεντρική αξονική θλίψη όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1, παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο και συγκρίνεται με αριθμητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 2-1: Αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού (Gantes and Gerogianni, 2002)

Σύμφωνα με το άρθρο των Gantes and Gerogianni (2002), η κρίσιμη δύναμη λυγισμού $N_{x(cr)}$ της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού δίνεται από τη σχέση:

$$N_{x(cr)} = \frac{E_p t_p^2}{a_p \sqrt{3(1-\nu_p^2)}} \sqrt{1 + \frac{K_s a_p^2}{E_p t_p}} \quad (2.1)$$

όπου a_p είναι η ακτίνα του αγωγού, t_p το πάχος του αγωγού, E_p το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού και ν_p ο λόγος Poisson. Ως K_s ορίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ακτινικών μετακινησιακών ελατηρίων περιμετρικά του αγωγού, με τα οποία προσομοιώνεται η εδαφική μάζα. Ακολούθως, η τιμή της κρίσιμης τάσης λυγισμού σ_{cr} της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{(cr)} = \frac{E_p t_p}{a_p \sqrt{3(1-\nu_p^2)}} \sqrt{1 + \frac{K_s a_p^2}{E_p t_p}} \quad (2.2)$$

Αν αμελήσουμε τον όρο που περιγράφει τη δυσκαμψία του εδάφους στη σχέση (2.2) προκύπτει:

$$\sigma_{(cr)} = \frac{E_p t_p}{a_p \sqrt{3(1-\nu_p^2)}} \quad (2.3)$$

Σύμφωνα με το άρθρο των Kim and Kim (2002) η κρίσιμη τάση λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sigma_{cr}}{E} = 1.19 \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.0256} \frac{t}{D} \quad (2.4)$$

όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού, H το ύψος του αγωγού, t το πάχος του αγωγού και E το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού.

2.3 Αριθμητική προσέγγιση

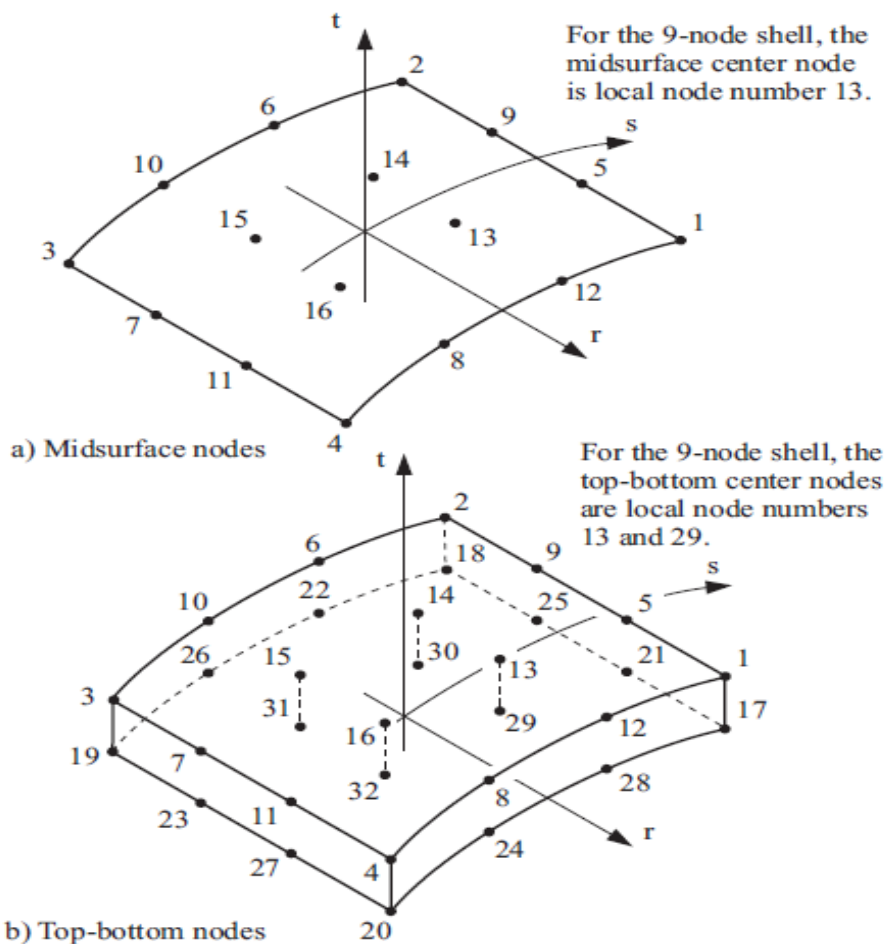
2.3.1 Στοιχεία αγωγών

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η αριθμητική προσομοίωση του κυλίνδρου υπό κεντρική θλίψη με πεπερασμένα στοιχεία και στη συνέχεια η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις αναλυτικές λύσεις οι οποίες έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και ποιο συγκεκριμένα με τις σχέσεις (2.3) και (2.4). Η αριθμητική προσομοίωση των κυλίνδρων υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA (2008). Λόγω της φύσης του φαινομένου που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία και ποιο συγκεκριμένα του τοπικού λυγισμού κυλινδρικών αγωγών απαιτείται η προσομοίωση του φορέα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ελαστικός χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.3$. Για την αριθμητική μελέτη του αξονοσυμμετρικού λυγισμού αναλυθήκαν δυο αγωγοί με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο αγωγός A έχει μήκος $L=1\text{m}$, διάμετρο $D=2\text{m}$ και πάχος $t=1.43\text{mm}$ και ο αγωγός B, ο οποίος είναι ένας αγωγός που διατίθεται στο εμπόριο με διάμετρο $D=0.914\text{m}$ μήκος $L=0.457\text{m}$ και πάχος $t=7.92\text{mm}$. Τα στοιχεία αυτά επιλέχθηκαν με κριτήριο οι δύο αγωγοί να έχουν τον ίδιο λόγο του μήκους προς τη διάμετρο του αγωγού (L/D).

2.3.2 Προσομοίωση κυλίνδρου με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

Η μοντελοποίηση του κυλίνδρου πραγματοποιήθηκε τόσο με τετρακομβικά όσο και οκτακομβικά με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Η βασική διαφορά των δυο αυτών στοιχείων έγκειται

στις συναρτήσεις σχήματος. Τα τετρακομβικά στοιχεία έχουν δυο κόμβους σε κάθε πλευρά τους και χρησιμοποιούνται γραμμικά πολυώνυμα για το μετασχηματισμό των συντεταγμένων. Αντίθετα, τα οκτακομβικά στοιχεία έχουν τρεις κόμβους σε κάθε πλευρά τους και χρησιμοποιούνται πολυώνυμα δευτέρου βαθμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων ενός τυχαίου σημείου.

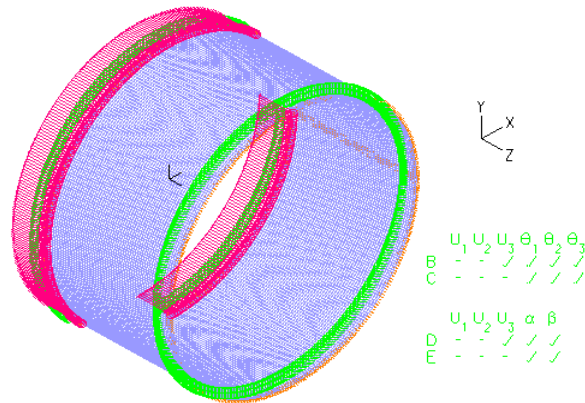


Σχήμα 2-2: Τετρακομβικά και οκτακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους στο πρόγραμμα ADINA

2.4 Αριθμητική επίλυση αγωγού A - Ανάλυση Λυγισμού

2.4.1 Πύκνωση πλέγματος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η πύκνωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για τον αγωγό A. Ποιο συγκεκριμένα ο αγωγός A έχει πάχος $t=1.43\text{mm}$, μήκος $L=1\text{m}$ και διάμετρο $D=2\text{m}$, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3. Στο μοντέλο αυτό έχουν επιβληθεί στους κόμβους των δυο ακραίων διατομών συνοριακές συνθήκες αμφιέριστης δοκού.



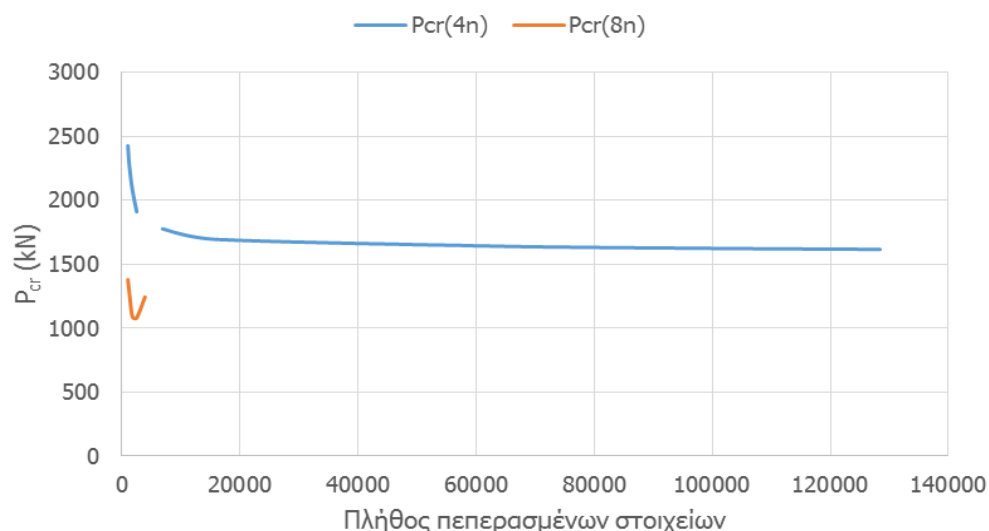
Σχήμα 2-3: Προσομοίωμα αγωγού A

Με χρήση της διαθέσιμης στο πρόγραμμα ADINA μεθόδου Lanczos, στον Πίνακα 2-1 περιγράφεται η πορεία πύκνωσης του πλέγματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων τόσο με τη χρήση τετρακομβικών ($P_{cr.(4n)}$), όσο και οκτακομβικών ($P_{cr.(8n)}$) επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Η πορεία πύκνωσης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πύκνωσης των στοιχείων τόσο ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, όσο και ως προς την υπολογιστική δυνατότητα.

Πίνακας 2-1: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αγωγού A με χρήση της μεθόδου Lanczos

Πλήθος Στοιχείων	Κόμβοι		Φορέα	
	$P_{cr(4n)}$ (kN)	$P_{cr(8n)}$ (kN)	$P_{cr(4n)}$ (kN)	$P_{cr(8n)}$ (kN)
1027	30.72	17.47	2426.88	1390.13
1260	25.27	14.19	2274.30	1277.10
1785	19.84	10.39	2083.20	1090.95
2520	15.16	8.58	1910.16	1081.46
3925	-	7.93	-	1244.85
6897	8.50	-	1777.13	-
15700	5.40	5.19	1695.29	1629.66
62800	2.61	-	1642.22	-
77478	2.34	-	1633.32	-
98125	2.07	-	1624.95	-
128414	1.80	-	1616.40	-

Στις περιοχές του Πίνακα 2-1 όπου υπάρχει παύλα (-) δεν προέκυψαν αποτελέσματα λόγω αριθμητικής αστάθειας του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-1, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-4, όπου στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος παρουσιάζεται το κρίσιμο φορτίο, το οποίο προκύπτει τόσο με τη χρήση τετρακομβικών ($P_{cr(4n)}$) όσο και οκτακομβικών ($P_{cr(8n)}$) επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων ενώ στον οριζόντιο το πλήθος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.



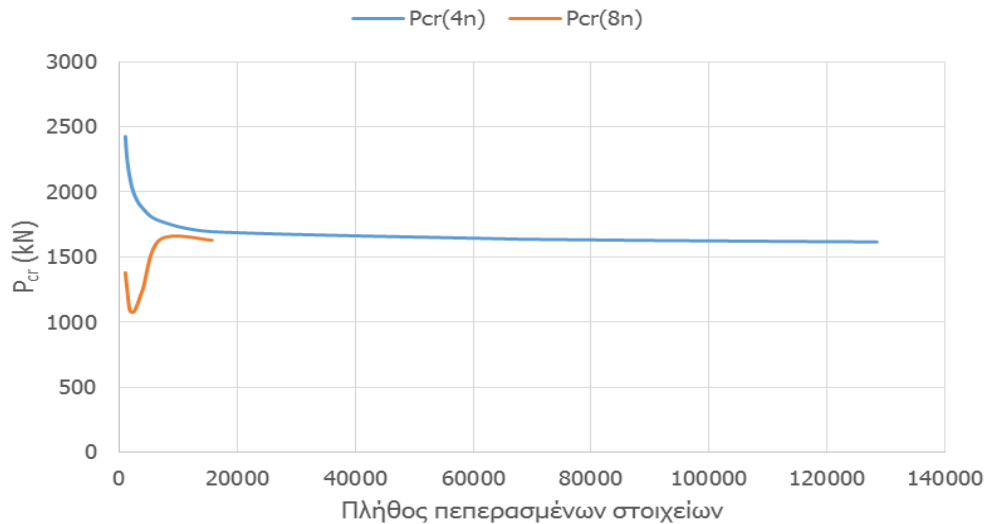
Σχήμα 2-4: Διάγραμμα πύκνωσης δικτύου πεπερασμένων στοιχείων αγωγού Α με χρήση της μεθόδου Lanczos

Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA, εκτός από τη μέθοδο Lanczos, προσφέρεται και η μέθοδος Standard. Τα αποτελέσματα με χρήση της μεθόδου αυτής παρουσιάζονται στο Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αγωγού Α με χρήση της μεθόδου Standard

Πλήθος στοιχείων	Κόμβοι		Φορέα	
	P _{cr} (4n) (kN)	P _{cr} (8n) (kN)	P _{cr} (4n) (kN)	P _{cr} (8n) (kN)
1027	30.72	17.47	2426.88	1380.13
1260	25.27	14.19	2274.30	1277.10
1785	20.10	10.39	2110.50	1090.95
2520	15.73	8.58	1981.98	1081.46
3925	11.95	7.93	1876.15	1244.85
6897	8.50	7.82	1777.13	1634.17
15700	5.40	5.19	1695.29	1629.66
62800	2.61	-	1642.22	-
77478	2.34	-	1633.32	-
98125	2.07	-	1624.95	-
128414	1.80	-	1616.40	-

Στις περιοχές του Πίνακα 2-2 όπου υπάρχει παύλα (-) δεν προέκυψαν αποτελέσματα λόγω αριθμητικής αστάθειας του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-2, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-5, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το κρίσιμο φορτίο P_{cr}, ενώ στον οριζόντιο το πλήθος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 2-5: Διάγραμμα πύκνωσης δικτύου πεπερασμένων στοιχείων αγωγού A με χρήση της μεθόδου Standard

Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις δυο προσφερόμενες μεθόδους του προγράμματος ADINA, ήτοι Lanczos και Standard. Σύμφωνα, όμως, με τους Dimoroulios and Gantes (2012) η μέθοδος standard δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στο φορτίο λυγισμού των κατασκευών πολιτικού μηχανικού, γι' αυτό και υιοθετείται.

Πίνακας 2-3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πύκνωσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων με χρήση των μεθόδων Lanczos και Standard

Πλήθος Στοιχείων	Lanczos		Standard	
	$P_{cr(4n)}$ (kN)	$P_{cr(8n)}$ (kN)	$P_{cr(4n)}$ (kN)	$P_{cr(8n)}$ (kN)
1027	2426.88	1390.13	2426.88	1380.13
1260	2274.30	1277.10	2274.30	1277.10
1785	2083.20	1090.95	2110.50	1090.95
2520	1910.16	1081.46	1981.98	1081.46
3925	-	1244.85	1876.15	1244.85
6897	1777.13	-	1777.13	1634.17
15700	1695.29	1629.66	1695.29	1629.66
62800	1642.22	-	1642.22	-
77478	1633.32	-	1633.32	-
98125	1624.95	-	1624.95	-
128414	1616.40	-	1616.40	-

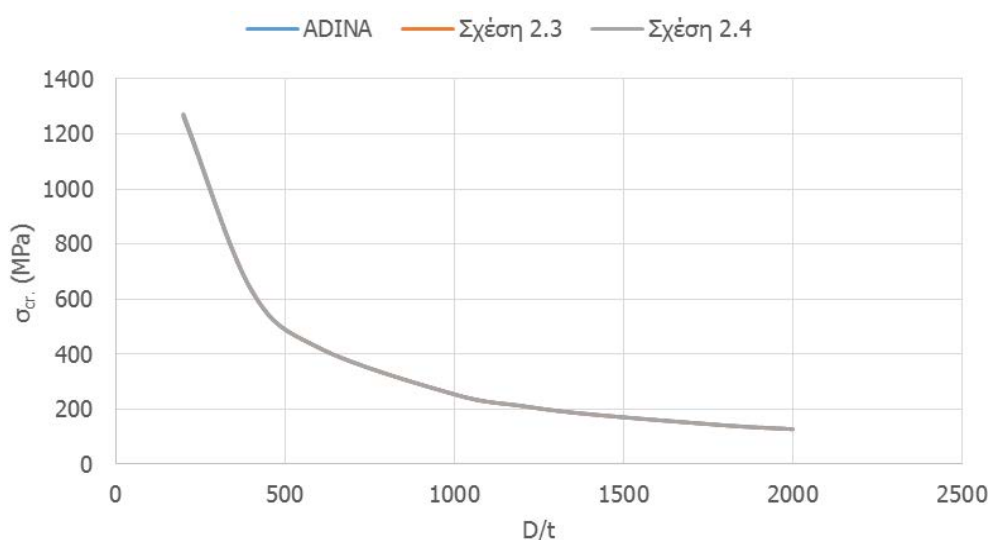
2.4.2 Παραμετρική ανάλυση λυγισμού

Η μεταβολή των διαστάσεων των κυλινδρικών αγωγών επιφέρει διαφοροποιήσεις στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, όπως αυτό προκύπτει από τη γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Στην περίπτωση του βραχύ κυλίνδρου, όπως η υπό εξέταση περίπτωση, με την μείωση του πάχους των τοιχωμάτων του μειώνεται η στιβαρότητα του που οδηγεί σε μείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς το πάχος των τοιχωμάτων του κυλίνδρου που αναδεικνύει τη μεταβολή στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού. Στον Πίνακα 2-4 παρουσιάζεται ο αριθμητικός υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού που έχει προκύψει από το πρόγραμμα ADINA και η οποία συγκρίνεται με τις αναλυτικές σχέσεις (2.3) και (2.4). Ο αριθμητικός υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού γίνεται με διαίρεση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού προς το εμβαδό της διατομής του κυλίνδρου. Επίσης στον Πίνακα 2-4 παρουσιάζεται και το σφάλμα της αριθμητικής επίλυσης από την εκάστοτε αναλυτική λύση.

Πίνακας 2-4: Παραμετρική ανάλυση λυγισμού

A/A	D/t	$\sigma_{cr(ADINA)}$ (MPa)	Σχέση (2.3)		Σχέση (2.4)	
			σ_{cr} (MPa)	Σφάλμα (%)	σ_{cr} (MPa)	Σφάλμα (%)
1	200	1263.71	1270.98	0.57	1271.87	0.64
2	400	633.99	635.49	0.23	635.93	0.30
3	600	423.32	423.66	0.08	423.96	0.15
5	1000	254.68	254.19	0.19	254.37	0.12
6	1200	212.41	211.83	0.27	211.98	0.20
7	1400	182.28	181.57	0.39	181.69	0.32
9	1800	142.01	141.22	0.56	141.32	0.49
10	2000	127.86	127.10	0.60	127.19	0.53

Στο Σχήμα 2-6 παρουσιάζεται η μείωση του κρίσιμου φορτίου συναρτήσει της μείωσης του πάχους του κυλίνδρου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον Πίνακα 2-4. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος παρουσιάζεται η κρίσιμη τάση λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού, ενώ στον οριζόντιο, ο αδιάστατος λόγος της διαμέτρου του κυλίνδρου προς το πάχος του.



Σχήμα 2-6: Επίρροή του πάχους των τοιχωμάτων στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού του αγωγού A

2.5 Ανάλυση αγωγού B - Ανάλυση λυγισμού

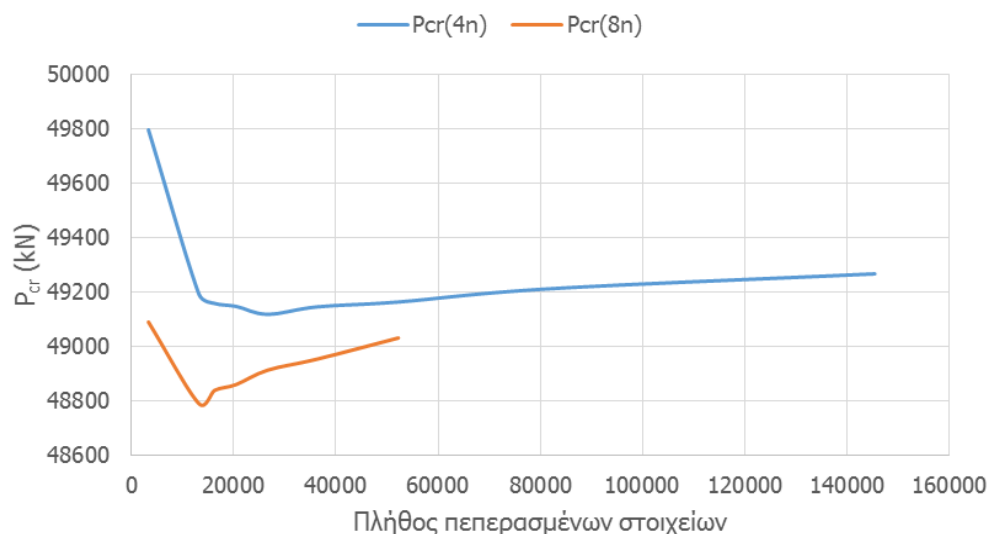
2.5.1 Πύκνωση πλέγματος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή μελετάται ο αγωγός B, ο οποίος έχει διάμετρο $D=914\text{mm}$ και πάχος $t=7.92\text{mm}$ και διατίθεται στο εμπόριο. Κατ' αντιστοιχία του αγωγού A που αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο, ο οποίος αποτελείται από αδιάστατο λόγο καθώς και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε ως μήκος αγωγού $L=457\text{mm}$. Στον Πίνακα 2-5 παρουσιάζεται η πύκνωση του πλέγματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, η οποία πραγματοποιήθηκε τόσο με τη χρήση τετρακομβικών επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων $P_{cr(4n)}$ όσο και οκτακομβικών $P_{cr(8n)}$.

Πίνακας 2-5: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αγωγού Β

Πλήθος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων	Κόμβου		Φορέα	
	$P_{cr(4n)}$ (kN)	$P_{cr(8n)}$ (kN)	$P_{cr(4n)}$ (kN)	$P_{cr(8n)}$ (kN)
3312	352.30	340.90	49795.20	49089.60
13202	171.40	170.00	49191.80	48790.00
16269	154.10	153.10	49157.90	48838.90
20463	136.90	136.10	49147.10	48859.90
26650	119.80	119.30	49118.00	48913.00
36404	102.60	102.20	49145.40	48953.80
52234	85.65	85.42	49163.10	49031.08
81852	68.54	-	49211.72	-
145464	51.48	-	49266.36	-

Στις περιοχές του Πίνακα 2-5 όπου υπάρχει παύλα (-) δεν προέκυψαν αποτελέσματα λόγω αριθμητικής αστάθειας του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-5, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-7, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το κρίσιμο φορτίο, το οποίο προέκυψε τόσο με τη χρήση τετρακομβικών όσο και οκτακομβικών επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων ενώ στον οριζόντιο το πλήθος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 2-7: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αγωγού Β

Από το Σχήμα 2-7 προκύπτει ότι η προσομοίωση του αγωγού με τετρακομβικά επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία είναι επαρκής. Τα στοιχεία αυτά προτιμώνται επειδή η υπολογιστική μνήμη που απαιτείται είναι μικρότερη συγκριτικά με τα οκτακομβικά επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 2-4, Σχήμα 2-5 και το Σχήμα 2-7. Με τον τρόπο αυτό δύναται να χρησιμοποιηθεί πυκνότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των κυλινδρικών αγωγών. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας 2-5 περιέχει τα κρίσιμα φορτία της πρώτης ιδιομορφής που προέκυψαν από τη γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού.

2.5.2 Επιρροή του πλέγματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού

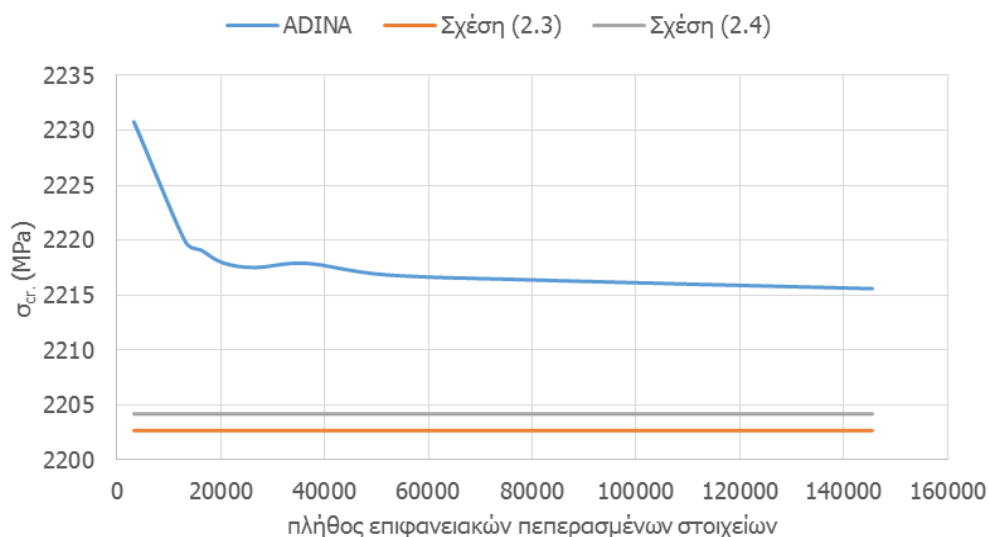
Για τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA κρίθηκε σκόπιμο να αναζητηθεί στα αποτελέσματα η αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τις αναλυτικές λύσεις (2.3) και (2.4). Για το λόγο

αυτό στον Πίνακα 2-6 περιέχονται οι κρίσιμες τάσεις της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού που προέκυψαν από τις εν λόγω αριθμητικές επιλύσεις, καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις αναλυτικές σχέσεις (2.3) και (2.4). Επιπρόσθετα, στο Πίνακα 2-6 παρουσιάζεται και το σφάλμα της αριθμητικής επίλυσης συγκριτικά με τις αναλυτικές λύσεις.

Πίνακας 2-6: Επιρροή της πυκνότητας του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στο κρίσιμο φορτίο της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού

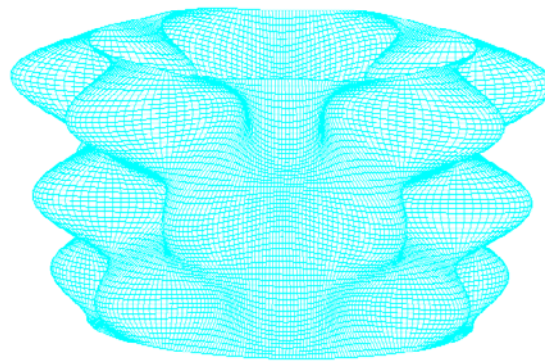
Πλήθος στοιχείων	σ_{cr} (ADINA)	Σχέση (2.3)		Σχέση (2.4)	
		σ_{cr} (MPa)	Σφάλμα (%)	σ_{cr} (MPa)	Σφάλμα (%)
3312	2230.76	2202.66	1.28	2204.20	1.20
13202	2219.86		0.78		0.71
16269	2219.09		0.75		0.67
20463	2217.94		0.69		0.62
26650	2217.52		0.67		0.60
36404	2217.90		0.69		0.62
52234	2216.83		0.64		0.57
81852	2216.36		0.62		0.55
145464	2215.59		0.59		0.52

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-6 παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-8, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η κρίσιμη τάση λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού σ_{cr} , ενώ στον οριζόντιο το πλήθος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.

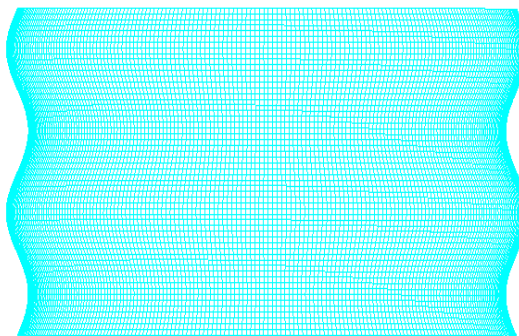


Σχήμα 2-8: Επιρροή της πυκνότητας του πλέγματος των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων στην κρίσιμη τάση της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού

Στο Σχήμα 2-8 παρατηρείται ότι για το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που αποτελείται από 3312 στοιχεία, παρουσιάζει σφάλμα 1.28% σύμφωνα με τη σχέση (2.3) και 1.20% σύμφωνα με τη σχέση (2.4). Η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού του κυλίνδρου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-9 και η αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού στο Σχήμα 2-10. Σημειώνεται ότι ο κύλινδρος έχει προσομοιωθεί με 20463 επιφανειακά τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία.



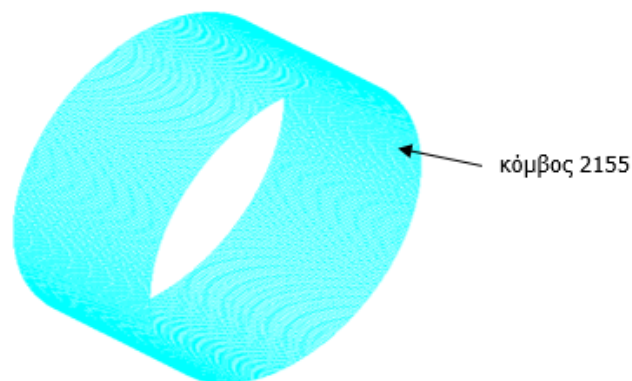
Σχήμα 2-9: 1η ιδιομορφή λυγισμού – $P_{cr}=136.9\text{kN}$



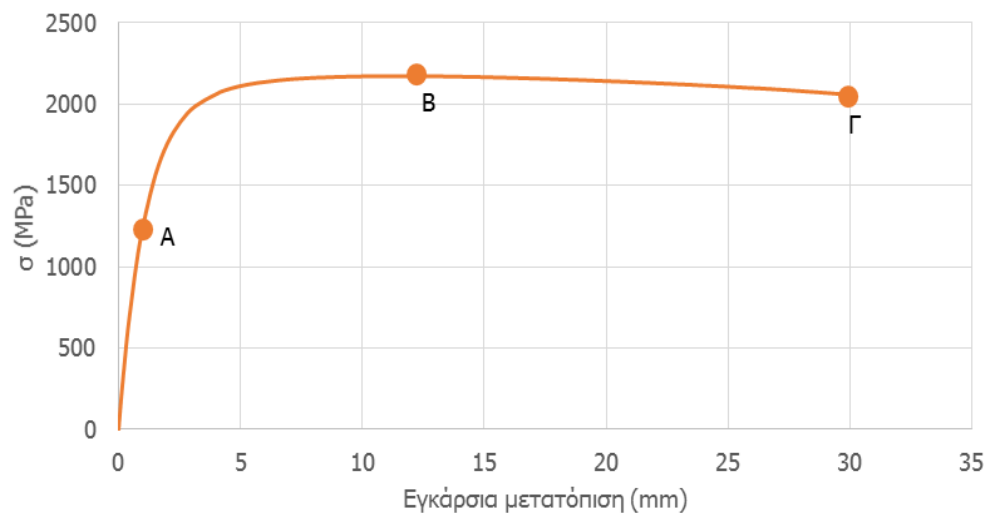
Σχήμα 2-10: 19η ιδιομορφή λυγισμού (αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού) – $P_{cr}=140.5\text{kN}$

2.6 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Για τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα του κυλίνδρου B όπου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του είναι πάχος $t=7.92\text{mm}$ και διάμετρος $D=914\text{mm}$. Ο κύλινδρος προσομοιώνεται με 20463 πεπερασμένα στοιχεία. Ο δρόμος ισορροπίας απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2-12, όπου κάθε σημείο του αντιστοιχεί σε μια κατάσταση ισορροπίας του φορέα. Στον κατακόρυφο άξονα του σχήματος παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο, ενώ στον οριζόντιο η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 2155 του κυλίνδρου, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση στο τέλος της ανάλυσης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-11.

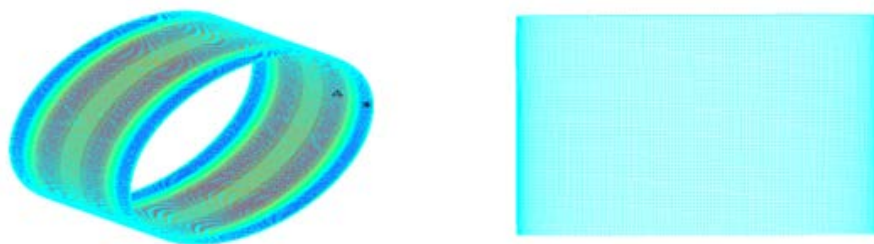


Σχήμα 2-11: Θέση κόμβου 2155 με τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση

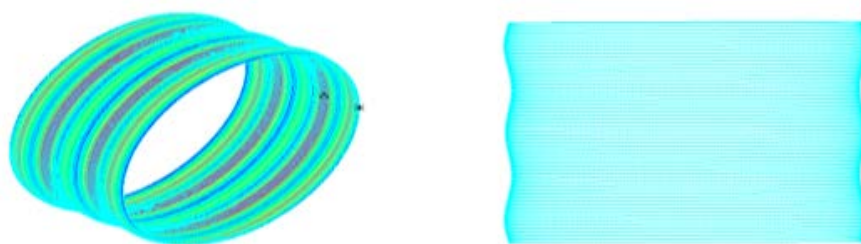


Σχήμα 2-12: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

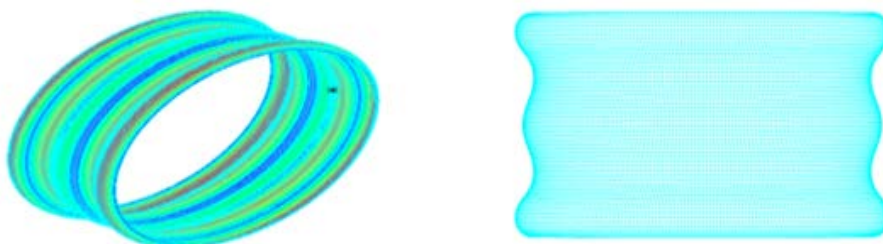
Από το Σχήμα 2-12 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $\sigma_u=2172.66\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο αφού το κρίσιμο φορτίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα ο φορέας να μη διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-13, Σχήμα 2-14 και το Σχήμα 2-15 αντίστοιχα.



Σχήμα 2-13: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και κατανομή τάσεων στο σημείο A

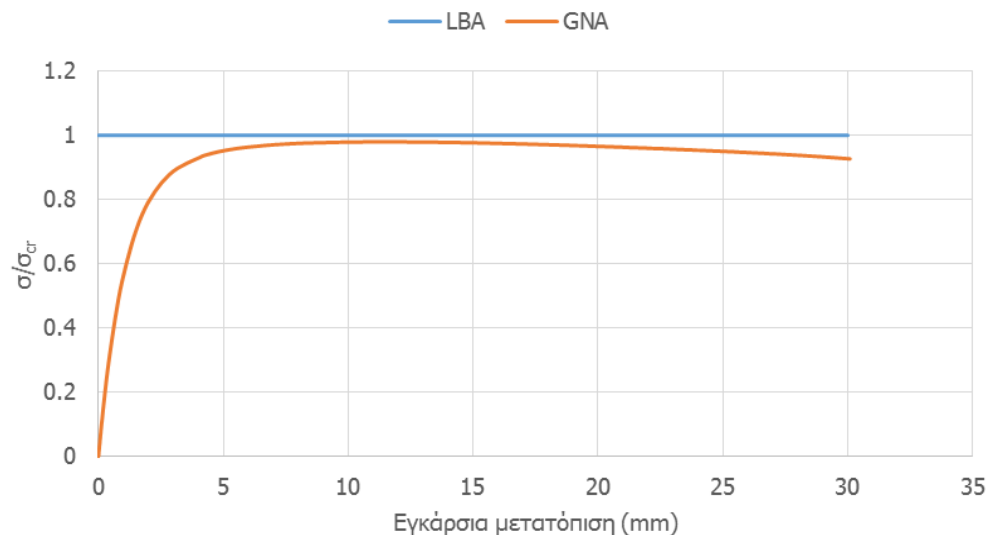


Σχήμα 2-14: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και κατανομή τάσεων στο σημείο B



Σχήμα 2-15: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ

Στο Σχήμα 2-16 απεικονίζεται ο αδιαστατοποιημένος δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο λόγος της κρίσιμης τάσης λυγισμού προς την κρίσιμη τάση της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού σ_{cr} , ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 2155, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση.



Σχήμα 2-16: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

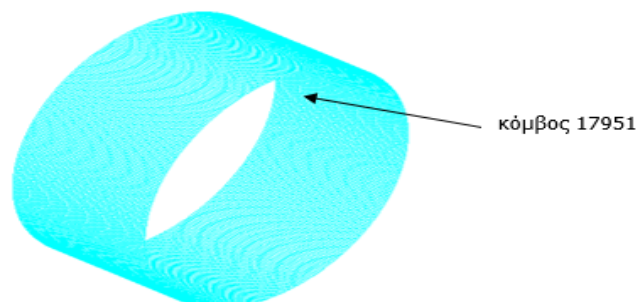
Σύμφωνα με το Σχήμα 2-16, το οριακό φορτίο της μη γραμμική ανάλυσης γεωμετρίας είναι 2% μικρότερο από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού.

2.6.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

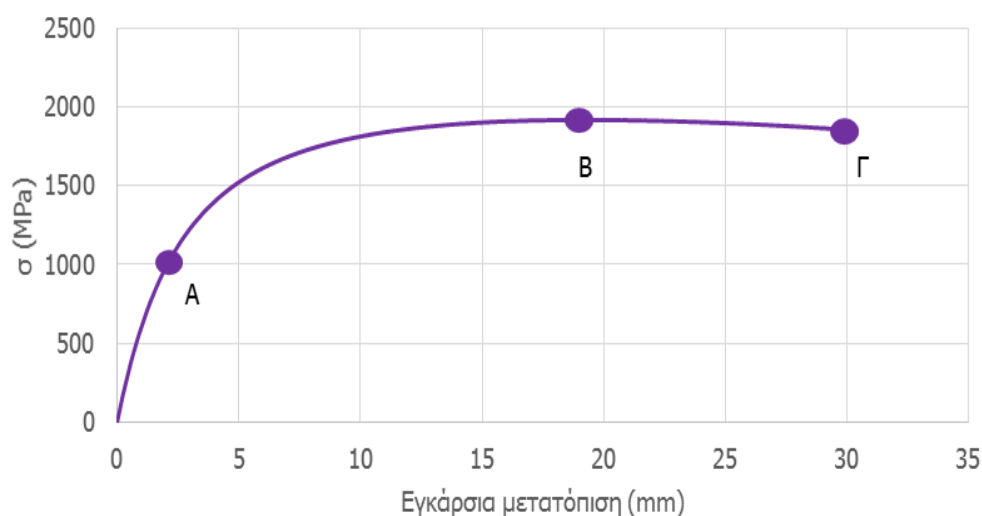
Οι κατασκευαστικές ατέλειες είναι γενικώς αποδεκτό ότι είναι αναπόφευκτες σε όλες τις κατασκευές και επιφέρουν αποκλίσεις από την ιδεατή γεωμετρία του φορέα με αποτέλεσμα την επιρροή τους στην απόκριση. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί η μείωση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής λόγω των αρχικών ατελειών, είναι μη γραμμική γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες. Η αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού, χρησιμοποιήθηκε ως σχήμα αρχικών ατελειών για τη μη γραμμική ανάλυση του φορέα με ατέλειες. Το μέγεθος των ατελειών που υιοθετήθηκαν για την ανάλυση αυτήν, ισούνται με 20%, 50% και 100% του πάχους του αγωγού ή σε αδιαστατοποιημένους όρους $\delta/t=0.2$, $\delta/t=0.5$ και $\delta/t=1.0$.

2.6.1.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$

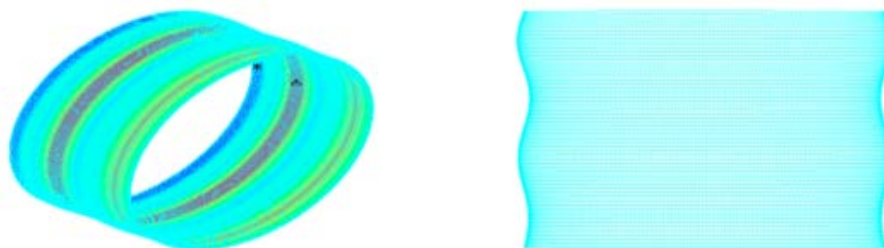
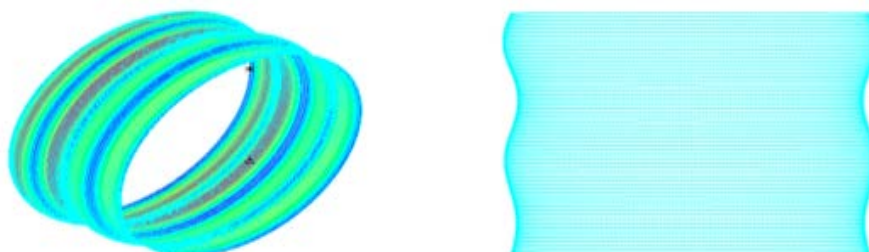
Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια, η οποία αντιστοιχεί στο 20% του πάχους του αγωγού. Ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-18, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η ασκούμενη τάση, ενώ στον οριζόντιο η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 17951, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση στο τέλος της ανάλυσης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-17.

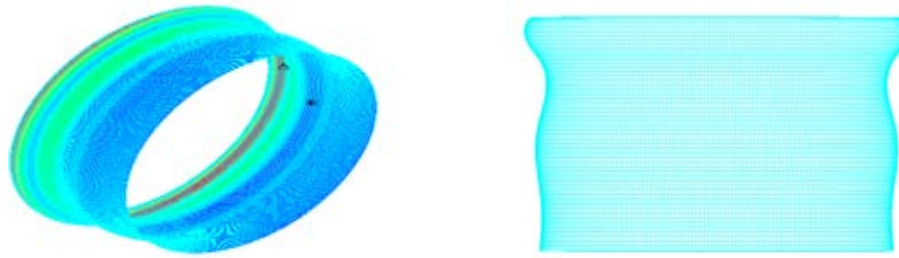


Σχήμα 2-17: Θέση κόμβου 17951 με την μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση

Σχήμα 2-18: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t = 0.2$

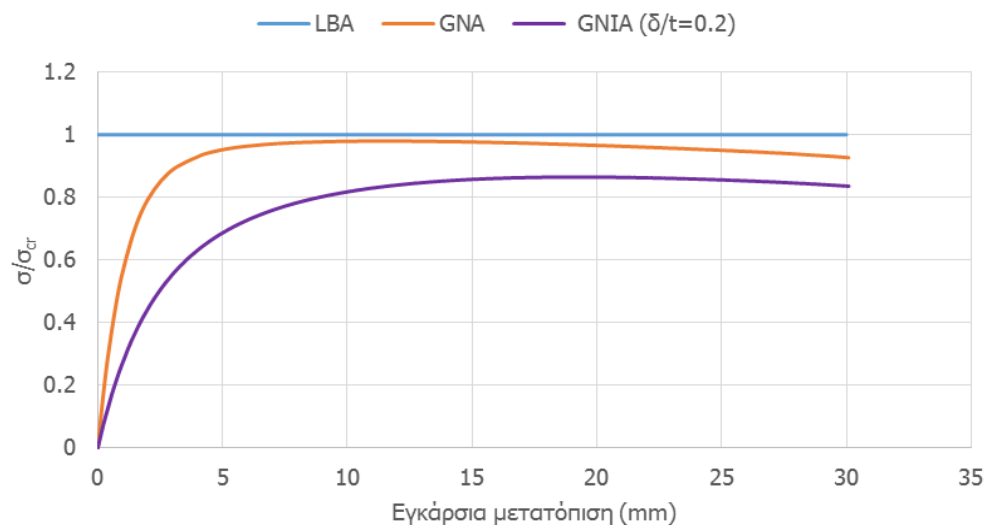
Από το Σχήμα 2-18 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $\sigma_u = 1917.85 \text{ MPa}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο αφού το κρίσιμο φορτίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα ο φορέας να μην διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Παρατηρείται πως λόγω της αρχικής ατέλειας μεταβλήθηκε ο δρόμος ισορροπίας συγκριτικά με τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας χωρίς ατέλειες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-12, αφού μειώθηκε το οριακό φορτίο. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-19, Σχήμα 2-20 και το Σχήμα 2-21 αντίστοιχα.

Σχήμα 2-19: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και κατανομή τάσεων στο σημείο AΣχήμα 2-20: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και κατανομή τάσεων στο σημείο B



Σχήμα 2-21: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ

Στο Σχήμα 2-22 παρουσιάζεται ο αδιαστατοποιημένος δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$. Στον κατακόρυφο άξονα περιγράφεται ο λόγος της κρίσιμης τάσης λυγισμού προς το κρίσιμο φορτίο της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού σ_{cr} , ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 17951, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση.

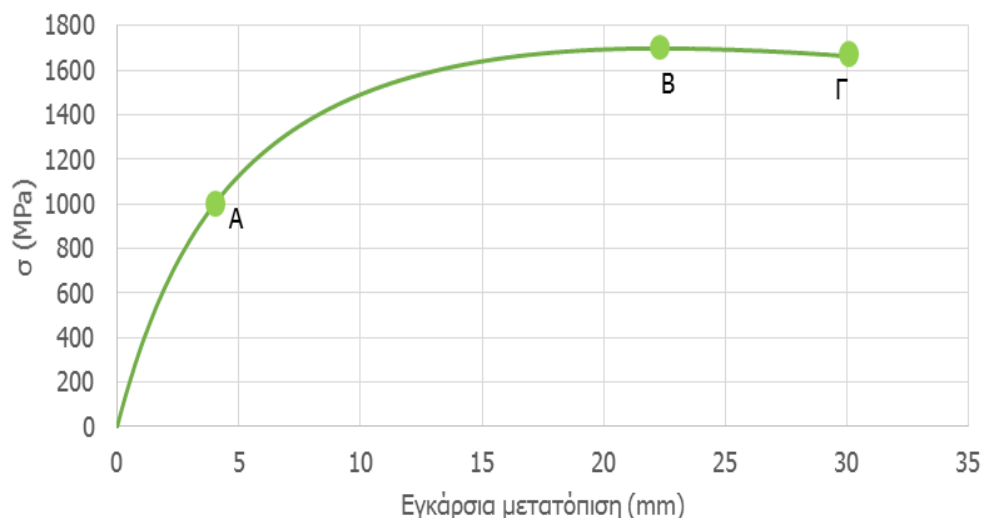


Σχήμα 2-22: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς και με ατέλεια $\delta/t=0.2$

Παρατηρείται ότι το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ είναι 13.53% μικρότερο συγκριτικά με κρίσιμο φορτίο λυγισμού και 11.49% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας.

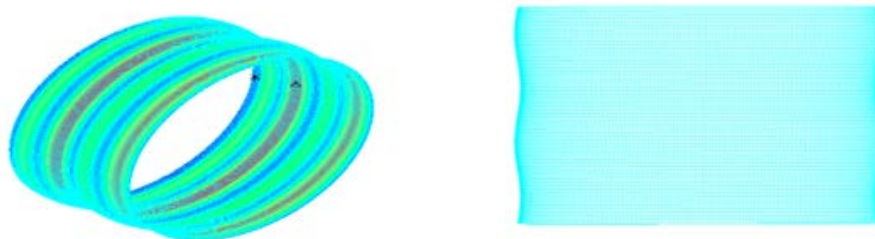
2.6.1.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια, η οποία αντιστοιχεί στο 50% του πάχους του αγωγού. Ο δρόμος ισορροπίας της συγκεκριμένης ανάλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-23, όπου στον κατακόρυφο άξονα περιγράφεται η ασκούμενη τάση, ενώ στον οριζόντιο η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 17951, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση.

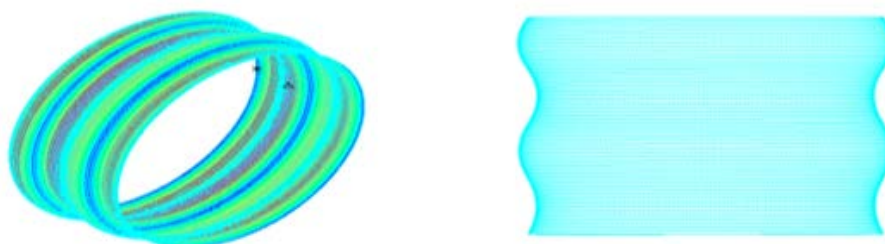


Σχήμα 2-23: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t = 0.5$

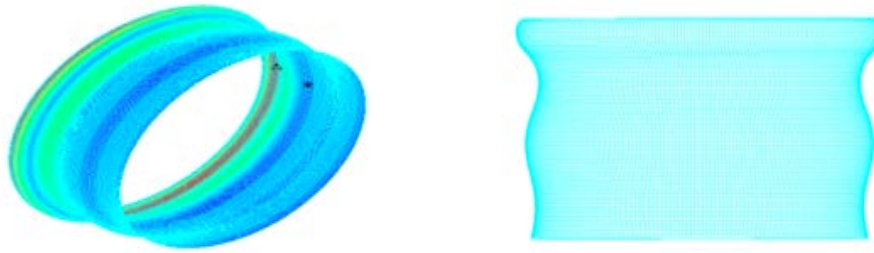
Σύμφωνα με το Σχήμα 2-23, ο δρόμος ισορροπίας συνεχίζει και έχει την ίδια μορφή με τις προηγούμενες αναλύσεις, καθώς όπως παρατηρείται είναι έντονα μη γραμμικός και εμφανίζεται το οριακό φορτίο ίσο με $\sigma_u = 1697.66 \text{ MPa}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός και ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο αφού το κρίσιμο φορτίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα ο φορέας να μην διαθέτει μεταλυσιμική αντοχή. Παρατηρείται πως λόγω της αρχικής ατέλειας μεταβλήθηκε ο δρόμος ισορροπίας, αφού μειώθηκε το οριακό φορτίο. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-24, Σχήμα 2-25 και το Σχήμα 2-26 αντίστοιχα.



Σχήμα 2-24: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ και κατανομή τάσεων στο σημείο A

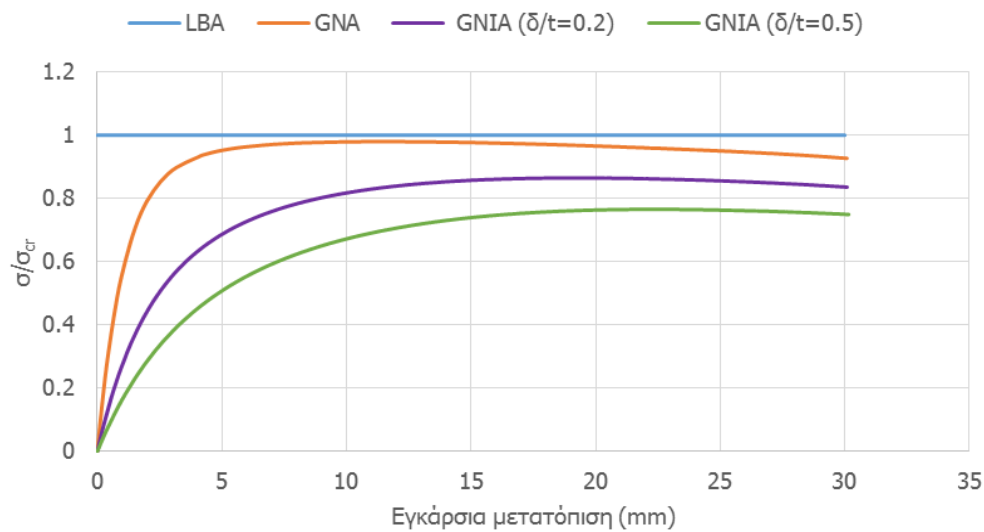


Σχήμα 2-25: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ και κατανομή τάσεων στο σημείο B



Σχήμα 2-26: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ

Στο Σχήμα 2-27, παρουσιάζεται ο αδιαστατοποιημένος δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο λόγος της ασκούμενης τάσης προς το κρίσιμο φορτίο της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού σ_{cr} , ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 17951, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση στο τέλος της ανάλυσης.

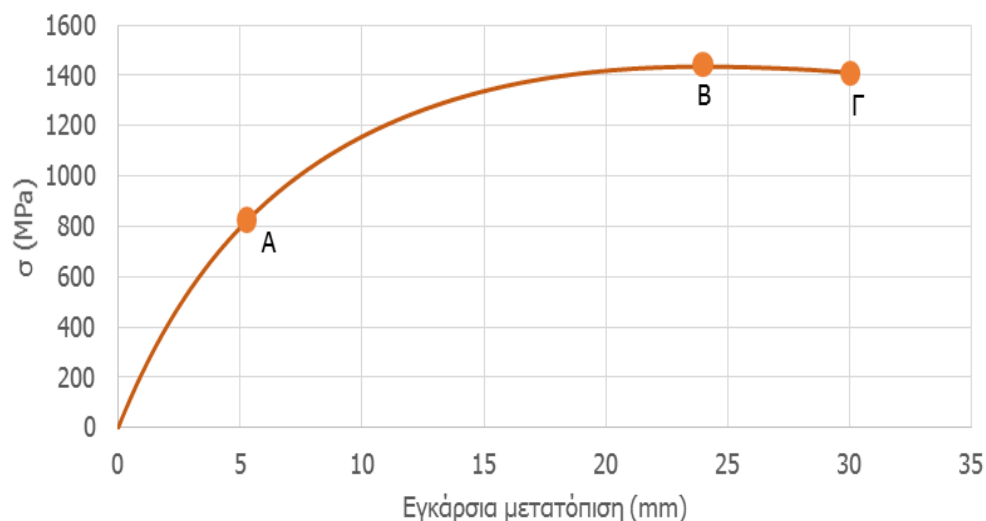


Σχήμα 2-27: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς και με ατέλειες $\delta/t=0.2$ και $\delta/t=0.5$

Στο Σχήμα 2-27 παρατηρείται η μεγάλη επιρροή της αρχικής ατέλειας στη φέρουσα ικανότητα του φορέα αφού το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ είναι κατά 23.46% μικρότερο συγκριτικά με κρίσιμο φορτίο λυγισμού και 21.42% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας. Επίσης το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ είναι κατά 9.93% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$.

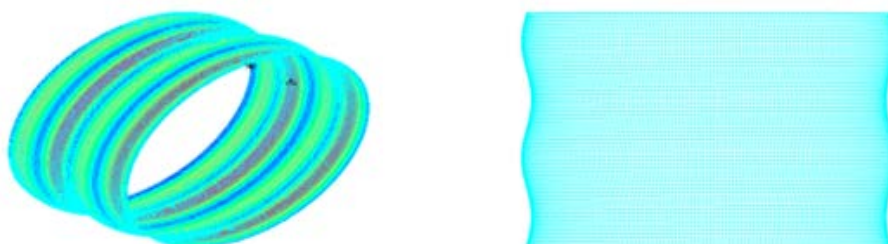
2.6.1.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια, η οποία αντιστοιχεί στο 100% του πάχους του αγωγού. Ο δρόμος ισορροπίας της συγκεκριμένης ανάλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-28, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η ασκούμενη τάση, ενώ στον οριζόντιο η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 17951, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση.

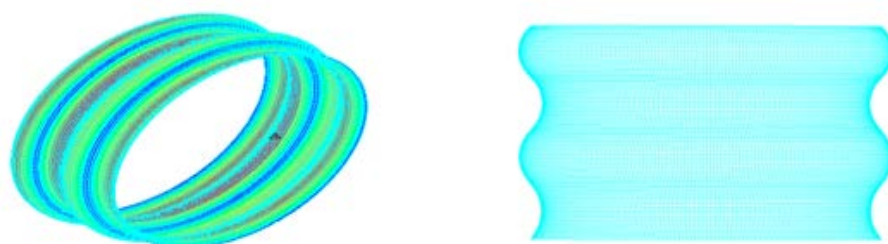


Σχήμα 2-28: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$

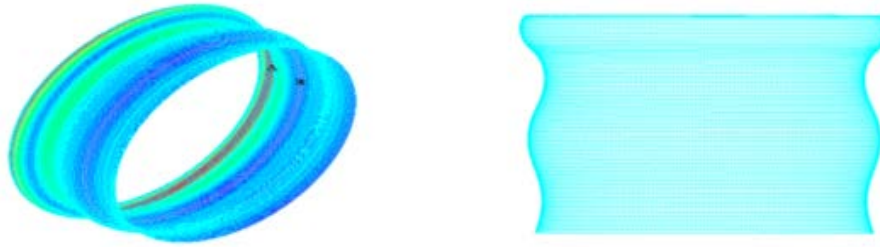
Από το Σχήμα 2-28 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $\sigma_u=1434.59\text{MPa}$. Και σε αυτή την περίπτωση το οριακό σημείο και ο δρόμος ισορροπίας είναι έντονα μη γραμμικός χωρίς να διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή ο φορέας. Παρατηρείται πως λόγω της αρχικής ατέλειας μεταβλήθηκε ο δρόμος ισορροπίας αφού μειώθηκε το οριακό φορτίο. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-29, Σχήμα 2-30 και στο Σχήμα 2-31 αντίστοιχα.



Σχήμα 2-29: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο A

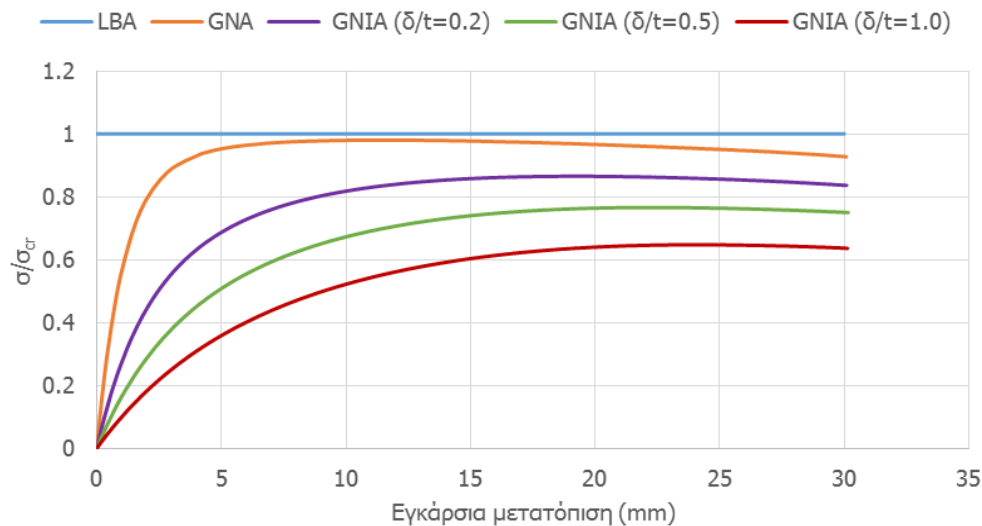


Σχήμα 2-30: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο B



Σχήμα 2-31: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ

Στο Σχήμα 2-32 παρουσιάζεται ο αδιαστατοποιημένος δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται ο λόγος της ασκούμενης θλιπτικής τάσης αδιαστατοποιημένης ως προς το κρίσιμο φορτίο της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού σ_{cr} , ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η εγκάρσια μετατόπιση του κόμβου 17951, οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη εγκάρσια μετατόπιση στο τέλος της ανάλυσης.

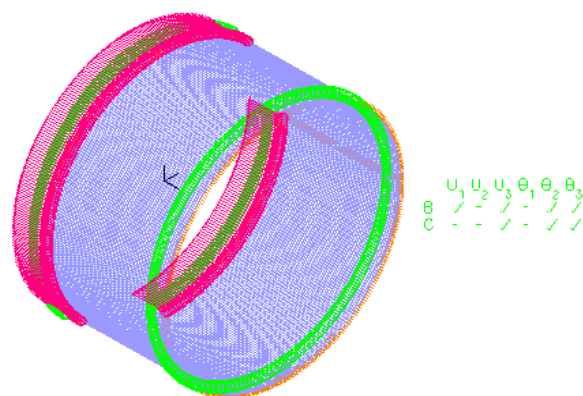


Σχήμα 2-32: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς και με ατέλειες $\delta/t=0.2$, $\delta/t=0.5$ και $\delta/t=1.0$

Από το Σχήμα 2-32 προκύπτει μεγάλη επιρροή των αρχικών ατελειών. Πιο συγκεκριμένα, το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ είναι κατά 35.32% μικρότερο συγκριτικά με κρίσιμο φορτίο λυγισμού και 33.28% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας. Επίσης το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ είναι κατά 21.79% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και 11.86% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$.

2.7 Ανάλυση αγωγού Β με αλλαγή συστήματος συντεταγμένων (κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων)

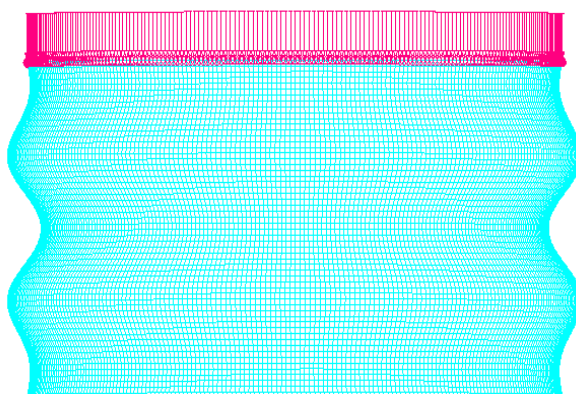
Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του αγωγού Β με αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων από καρτεσιανό σε κυλινδρικό. Οι βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν στην διαμήκη, την επαπτομενική και την ακτινική μετακίνηση των κόμβων του φορέα. Επίσης έχει δεσμευτεί ο στροφικός βαθμός ελευθερίας στις ακραίες διατομές. Ο φορέας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-33. Η αλλαγή αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό την ελεύθερη ακτινική μετακίνηση των ακραίων διατομών του φορέα.



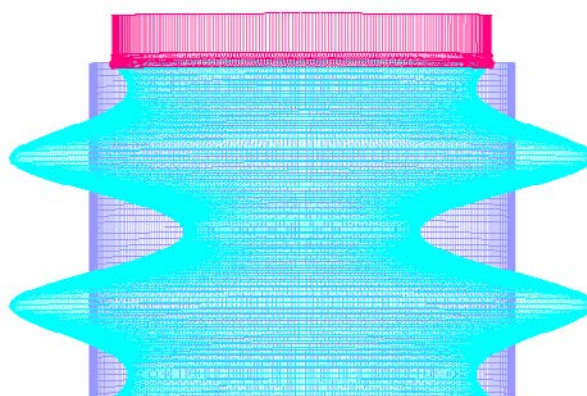
Σχήμα 2-33: Προσομοίωμα αγωγού B με κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων

2.7.1 Γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε η γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού του υπό εξέταση φορέα. Η αξονοσυμμετρική ιδιομορφή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-34 και στο Σχήμα 2-35, συγκριτικά με τον "απαραμόρφωτο" φορέα.



Σχήμα 2-34: Αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού



Σχήμα 2-35: Αξονοσυμμετρική ιδιομορφή λυγισμού

Σύμφωνα με το Σχήμα 2-34 και το Σχήμα 2-35 στον Πίνακα 2-7 παρουσιάζεται η τάση λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού καθώς και η σύγκριση με τις αναλυτικές σχέσεις (2.2) και (2.4).

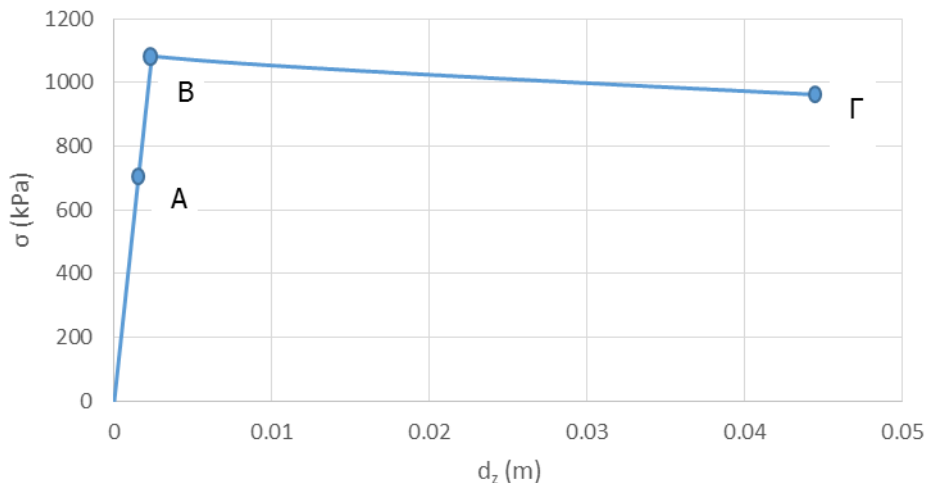
Πίνακας 2-7: Αποτελέσματα κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων

Πλήθος Στοιχείων	$\sigma_{cr(ADINA)}$ (MPa)	Σχέση 2.2		Σχέση 2.4	
		σ_{cr} (MPa)	Σφάλμα (%)	σ_{cr} (MPa)	Σφάλμα (%)
20463	2331.60	2202.66	5.53	2204.20	5.46
36404	2327.43		5.36		5.29

Από το Σχήμα 2-35 διαπιστώνεται η μετακίνηση των κόμβων των ακραίων διατομών. Η ιδιομορφή αυτή έχει μεγαλύτερο σφάλμα συγκριτικά με την ιδιομορφή η οποία προκύπτει από το μοντέλο με τις συνοριακές συνθήκες στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Στην ιδιομορφή του Σχήματος 2-10 αναπτύσσονται ημιτονοειδή κύματα με σταθερό πλάτος, εν αντιθέσει με την ιδιομορφή του Σχήματος 2-35 στην οποία το πλάτος των ημιτονοειδών κυμάτων δεν είναι σταθερό. Οι αναλυτικές εξισώσεις προσδιορισμού του κρίσιμου φορτίου θεωρούν σταθερό πλάτος ημιτονοειδών κυμάτων και σε αυτό το λόγο ίσως οφείλεται η διαφοροποίηση του κρίσιμου φορτίου και κατ' επέκταση το μεγαλύτερο σφάλμα.

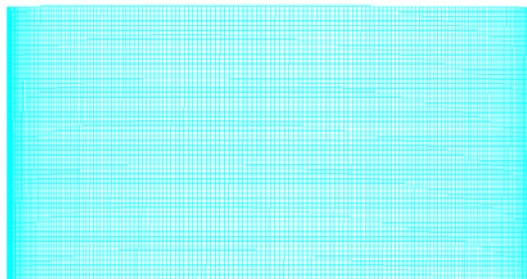
2.7.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας του βραχέως κυλίνδρου με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμπορικού αγωγού με διάμετρο $D=914\text{mm}$, πάχος $t=7.92\text{mm}$ και μήκος $L=457\text{mm}$. Ο δρόμος ισορροπίας του εν λόγω αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-36.

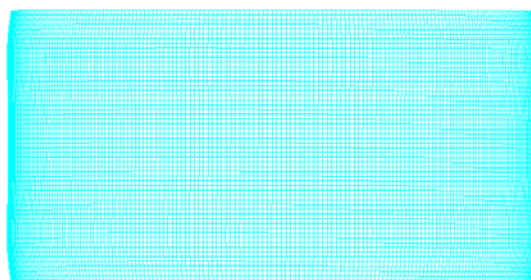


Σχήμα 2-36: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων

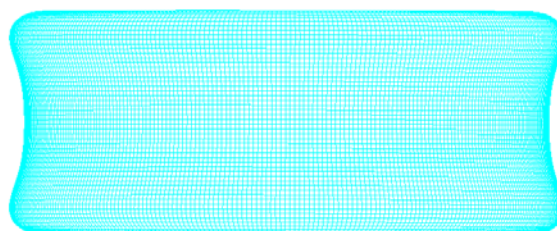
Από το Σχήμα 2-36 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο ισούται με $\sigma_u=1081.82\text{kN}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός και ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο αφού το κρίσιμο φορτίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα ο φορέας να μη διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία Α, Β και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-37, το Σχήμα 2-38 και το Σχήμα 2-39 αντίστοιχα.



Σχήμα 2-37: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας, σημείο Α



Σχήμα 2-38: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας, σημείο Β



Σχήμα 2-39: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας, σημείο Γ

2.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν δυο κυλινδρικά κελύφη υπό κεντρική αξονική θλίψη και ελέγχθηκε η επιρροή του πάχους του τοιχώματος αγωγού, όπου σύμφωνα με το Σχήμα 2-6, παρατηρήθηκε η μείωση του κρίσιμου φορτίου της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού όσο μειώνεται το πάχος του. Επίσης, πραγματοποιήθηκε γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού από την οποία προέκυψε ότι η χρήση τετρακομβικών επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων επαρκεί για τη προσομοίωση των αγωγών, σύμφωνα με το Σχήμα 2-7. Επιπρόσθετα, ελέγχθηκε η επιρροή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού και πραγματοποιήθηκε η σύγκριση με τις αναλυτικές σχέσεις (2.3) και (2.4), όπου σύμφωνα με το Σχήμα 2-8, ακόμη για τον κυλινδρικό αγωγό με το πιο αραιό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε και αποτελείται από 3312 επιφανειακά στοιχεία προέκυψε ικανοποιητικά μικρό σφάλμα 1.28%. Στη συνέχεια, από τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2-12, προέκυψε ότι ο δρόμος ισορροπίας του φορέα είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής, οπότε δε διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή ο φορέας. Πιο συγκεκριμένα το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας είναι κατά 2% μικρότερο από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού, ενώ σύμφωνα με το Σχήμα 2-32, παρατηρείται η μεγάλη επιρροή των ατελειών στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Για την περίπτωση που υιοθετηθεί ατέλεια της τάξεως του 20% του πάχους του αγωγού το οριακό φορτίο είναι το 86.47% του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Επιπλέον στην περίπτωση των ατελειών $\delta/t=0.5$ και $\delta/t=1.0$ το οριακό φορτίο μειώνεται κατά 23.46% και 35.32% συγκριτικά με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού. Στην περίπτωση που προσομοιωθεί ο φορέας με κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-33, τότε από τη γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού προκύπτει μεγαλύτερο σφάλμα συγκριτικά με το αντίστοιχο μοντέλο το οποίο έχει προσομοιωθεί στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-7. Η διαφορά αυτή ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι στην ιδιομορφή του Σχήματος 2-10 αναπτύσσονται ημιτονοειδή κύματα με σταθερό πλάτος, εν αντιθέσει με την ιδιομορφή του Σχήματος 2-35 στην οποία το πλάτος των ημιτονοειδών κυμάτων δεν είναι σταθερό. Οι αναλυτικές εξισώσεις προσδιορισμού του κρίσιμου φορτίου (2.2) και (2.4) θεωρούν σταθερό πλάτος ημιτονοειδών κυμάτων και σε

αυτό το λόγο ίσως οφείλεται η διαφοροποίηση του κρίσιμου φορτίου και κατ' επέκταση το μεγαλύτερο σφάλμα.

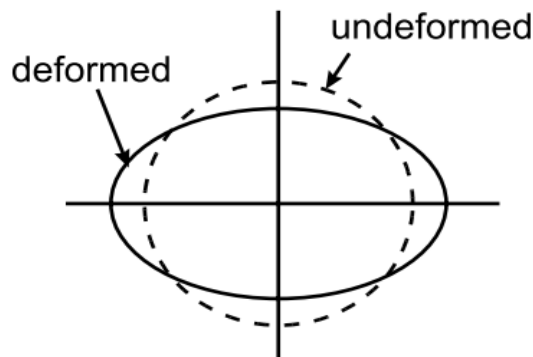
2.9 Βιβλιογραφία

- ADINA R & D Inc., Theory and Modeling guide Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, Watertown, USA, 2008
- Dimopoulos, C.A. and Gantes, C.J., "Comparison of alternative algorithms for buckling analysis of slender steel structures", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 44, No. 2, pp. 219-238, 2012
- Gantes, C.J. and Gerogianni, D.S., "Infinitely long buried pipelines under bending and internal pressure", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Vol. 43, No.2, pp. 101-114, 2002
- Kim, S.-E. and Kim, C.-S., "Buckling strength of the cylindrical shell and tank subjected to axially compressive loads", Thin-Walled Structures, Vol. 40, pp. 329-353, 2002
- Παπαδρακάκης Μ., "Ανάλυση Φορέων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2001

3 ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΥΠΟ ΡΟΠΗ ΚΑΜΨΕΩΣ

3.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων μπορεί να επιφέρει μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω τοπικού λυγισμού. Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η συμπεριφορά δυο κυλινδρικών κελυφών υποβαλλόμενων σε καθαρή ροπή κάμψεως. Με την επιβολή του συγκεκριμένου είδους φόρτισης δύναται να αναπτυχθεί τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Υπό την επιβολή καθαρής ροπής κάμψεως σε ένα κύλινδρο κέλυφος, πραγματοποιείται σταδιακή ωσειδής παραμόρφωση της διατομής του (deformed), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1, με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητας του.

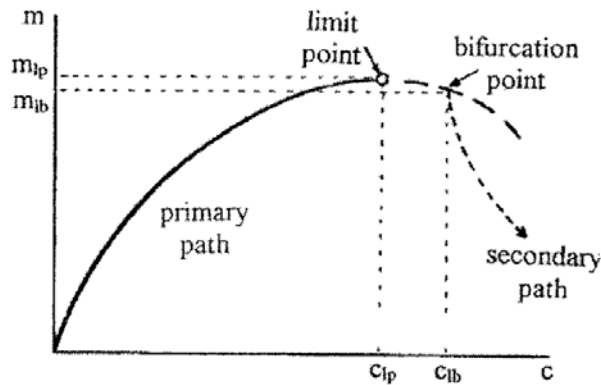


Σχήμα 3-1: Ωσειδής παραμόρφωση κυλινδρικού κελύφους (Karamanos, 2002)

Η μείωση της φέρουσας ικανότητας περιγράφεται μέσω του οριακού σημείου το οποίο αρχικά προτάθηκε από τον Brazier. Το οριακό αυτό σημείο αντιστοιχεί σε ροπή κάμψεως:

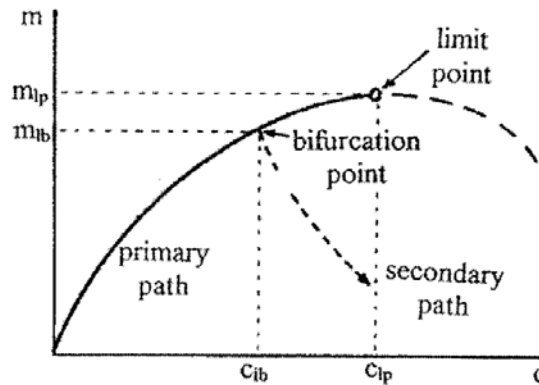
$$M_{\text{Braz}} \approx 1.035Ert^2 \quad (3.1)$$

όπου r είναι η ακτίνα του αγωγού, t το πάχος του αγωγού, E το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού. Στο Σχήμα 3-2 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας ροπής κάμψεως – καμπυλότητας κυλινδρικού κελύφους, στο οποίο παρατηρείται η μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω του οριακού σημείου (limit point). Παρά τη μείωση αυτή, δύναται να αναπτυχθεί τοπικός λυγισμός μέσω σημείου διακλάδωσης (bifurcation point) στο τοίχωμα του κυλινδρικού αγωγού μετά από το οριακό σημείο όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα.



Σχήμα 3-2: Αστοχία μέσω οριακού σημείου (Gantes and Gerogianni, 2002)

Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας καμπτόμενου κυλίνδρου, για τον οποίο ο τοπικός λυγισμός αναπτύσσεται πριν το οριακό σημείο. Μετά την εκδήλωση του τοπικού λυγισμού μέσω σημείου διακλάδωσης (bifurcation point) ακολουθεί ο δευτερεύων δρόμος ισορροπίας (secondary path).



Σχήμα 3-3: Αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού (Gantes and Gerogianni, 2002)

Η περίπτωση του οριακού σημείου ευνοείται όταν το μήκος των κυλινδρικών κελυφών είναι αρκούντως επαρκές, ώστε να είναι μειωμένη η επιρροή των συνοριακών συνθηκών. Σε περιπτώσεις όμως όπου αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός χωρίς όμως να οβαλοποιείται η διατομή του κυλινδρικού αγωγού τότε η αστοχία πραγματοποιείται για ροπή M_{cl} , η οποία ισούται με:

$$M_{cl} \approx 1.901Ert^2 \quad (3.2)$$

3.2 Κατηγορίες αγωγών

Υπό την επιβολή καθαρής ροπής κάμψεως, σύμφωνα με τους Rotter et al. (2014), υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά των κυλινδρικών αγωγών ανάλογα με το μήκος τους. Οι κυλινδρικοί αγωγοί που εντάσσονται στις κατηγορίες αυτές διαφέρουν στη συμπεριφορά και κατ' επέκταση στη φέρουσα ικανότητά τους. Οι σημαντικότερες παράμετροι οι οποίες συμβάλλουν σε αυτή την διακριτοποίηση είναι το μήκος, η ακτίνα και το πάχος του κυλίνδρου. Η κατηγοριοποίηση των αγωγών πραγματοποιείται με τη βοήθεια των αδιάστατων συντελεστών μήκους ω και Ω , οι οποίοι ορίζονται ως ακολούθως:

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{rt}} = \frac{\sqrt{Z}}{\sqrt[4]{1-\nu^2}} \quad (3.3)$$

όπου το L είναι το μήκος του αγωγού, r η ακτίνα του αγωγού, t το πάχος του αγωγού, ν ο λόγος Poisson, και Z είναι η παράμετρος αδιάστατου μήκους του Batdorf, και η οποία ισούται με:

$$Z = \frac{L^2}{rt} \sqrt{1 - \nu^2} = \omega^2 \sqrt{1 - \nu^2} \quad (3.4)$$

Και:

$$\Omega = \frac{L}{r} \sqrt{\frac{t}{r}} = \frac{t}{r} \omega \quad (3.5)$$

Χρησιμοποιώντας τους δυο αδιάστατους συντελεστές μήκους ω και Ω ορίζονται οι εξής κατηγορίες κυλινδρικών αγωγών:

- Κοντοί κύλινδροι, στους οποίους η επίδραση των συνοριακών συνθηκών είναι σημαντική λόγω του μικρού μήκους του κυλίνδρου. Ο λυγισμός αναπτύσσεται για ροπή μεγαλύτερη από τη ροπή M_{cl} .
- Μεσαίου μήκους κύλινδροι, στους οποίους η επίδραση των συνοριακών συνθηκών συνεχίζει να είναι σημαντική. Σε αυτήν την περίπτωση, στον καμπτόμενο κύλινδρο δεν παρατηρείται η ωσειδής παραμόρφωση με αποτέλεσμα ο λυγισμός να αναπτύσσεται για ροπή ίση με M_{cl} .
- Μεταβατικού μήκους κύλινδροι, στους οποίους η επίδραση των συνοριακών συνθηκών μειώνεται με αποτέλεσμα την οβαλοποίηση της διατομής του κυλίνδρου. Ο λυγισμός αναπτύσσεται για φορτίο περίπου ίσο με τη ροπή M_{Braz} .
- Μακρείς κύλινδροι, στους οποίους είναι έντονο το φαινόμενο της ωσειδούς παραμόρφωσης και εμφανίζεται το οριακό σημείο, όπως περιγράφεται και στο Σχήμα 3-2. Στη περίπτωση αυτή, ο λυγισμός αναπτύσσεται για φορτίο μικρότερο από τη ροπή M_{Braz} .

Τα όρια των κατηγοριών, βάσει των αδιάστατων συντελεστών μήκους ω και Ω , παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Κατηγορίες κυλινδρικών αγωγών υποβαλλόμενων σε ροπή κάμψεως

Κατηγορία	Εύρος ω	Εύρος Ω
Κοντοί κύλινδροι	$3 \leq \omega < 4.8$	n/a
Μεσαίου μήκους κύλινδροι	$4.8 \leq \omega < 0.5\left(\frac{r}{t}\right)$	$\Omega < 0.5$
Μεταβατικού μήκους κύλινδροι	$\omega \geq 0.5\left(\frac{r}{t}\right)$	$0.5 \leq \Omega < 7.0$
Μακρείς κύλινδροι	n/a	$\Omega \geq 7.0$

Το πεδίο εφαρμογής του Πίνακα 3-1 είναι:

$$\frac{r}{t} \geq 50 \quad (3.6)$$

όπου r είναι η ακτίνα του αγωγού και t το πάχος του αγωγού.

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (M_{cr}) μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά από τη σχέση:

$$\frac{M_{cr}}{M_{cl}} = 1 + \frac{4}{\omega^2} \quad (3.7)$$

3.3 Γενικά στοιχεία προσομοιωμάτων

Στις ακόλουθες ενότητες αναλύθηκε ο αγωγός του εμπορίου που χρησιμοποιήθηκε και στο κεφάλαιο 2, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι πάχος $t=7.92\text{mm}$ και διάμετρος $D=914\text{mm}$. Η αδιάστατη παράμετρος του λόγου της ακτίνας του αγωγού προς το πάχος του σύμφωνα με τη σχέση (3.6), ισούται με:

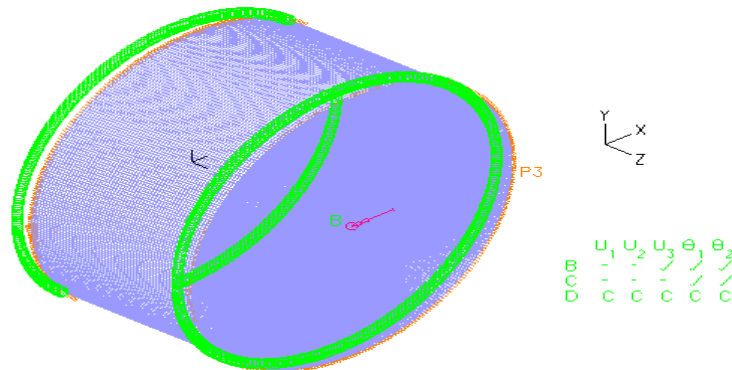
$$\frac{r}{t} = \frac{(914 / 2)}{7.92} = 57.70 \geq 50 \quad (3.8)$$

οπότε και δύναται να χρησιμοποιηθεί ο Πίνακας 3-1. Σύμφωνα με αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά οι κατηγορίες των αγωγών διαμορφώνονται ως εξής:

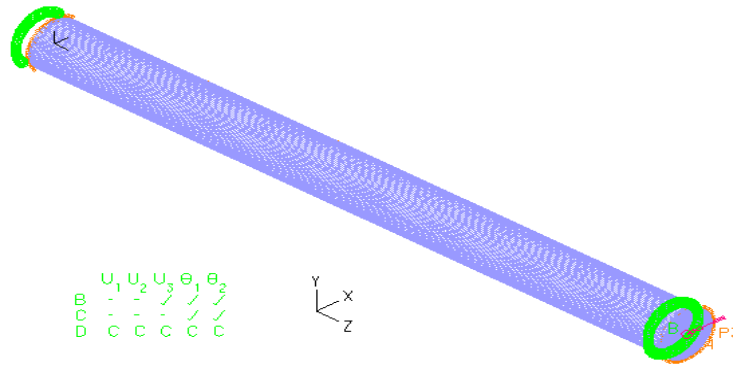
Πίνακας 3-2: Κατηγορίες αγωγού εμπορίου

Κατηγορία	ω	Ω
Κοντοί κύλινδροι	$3 \leq \omega < 4.8$	n/a
Μεσαίου μήκους κύλινδροι	$4.8 \leq \omega < 0.5 \frac{r}{t} = 0.5 \frac{457}{7.92} = 28.85$	$\Omega < 0.5$
Μεταβατικού μήκους κύλινδροι	$\omega \geq 0.5 \frac{r}{t} = 0.5 \frac{457}{7.92} = 28.85$	$0.5 \leq \Omega < 7.0$
Μακρείς κύλινδροι	n/a	$\Omega \geq 7.0$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3-2, μεταβάλλοντας το μήκος του αγωγού και διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σταθερά, αλλάζει και η κατηγορία στην οποία αυτός εντάσσεται. Συνέπεια αυτής της μεταβολής είναι η αλλαγή της συμπεριφοράς και της φέρουσας ικανότητας του. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά μήκη για τη μελέτη του συγκεκριμένου αγωγού προκειμένου αυτοί να εντάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2. Τα μήκη που επιλέχθηκαν είναι 0.457m και 11.425m. Το προσομοίωμα του αγωγού Β με μήκος $L_B=0.457\text{m}$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-4, ενώ το προσομοίωμα του αγωγού Γ με μήκος $L_G=11.425\text{m}$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-4: Προσομοίωμα αγωγού Β



Σχήμα 3-5: Προσομοίωμα αγωγού Γ

Οι συνοριακές συνθήκες αμφίεριστης δοκού έχουν εφαρμοστεί σε σημεία που συνδέονται με τις ακραίες διατομές του κυλίνδρου μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links). Επίσης έχει δεσμευτεί ο στροφικός βαθμός ελευθερίας. Για τη δημιουργία των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Οι ροπές M_{cl} και M_{Braz} παραμένουν σταθερές για τους αγωγούς Β και Γ, μιας και η διαφοροποίηση των δυο αυτών αγωγών έγκειται στο μήκος τους και μόνο. Σύμφωνα με τη σχέση (3.1), η ροπή M_{Braz} , είναι:

$$M_{Braz} = 1.035Ert^2 = 1.035(210 \times 10^6)(0.457)(0.00792)^2 = 6230.55 \text{ kNm} \quad (3.9)$$

ενώ, σύμφωνα με τη σχέση (3.2), η ροπή M_{cl} , είναι:

$$M_{cl} = 1.901Ert^2 = 1.901(210 \times 10^6)(0.457)(0.00792)^2 = 11443.74 \text{ kNm} \quad (3.10)$$

3.4 Ανάλυση αγωγού Β

Στην παρούσα ενότητα αναλύθηκε ο πρώτος από τους δυο αγωγούς που εξετάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού Β είναι μήκος $L_B=0.457\text{m}$, διάμετρος $D=914\text{mm}$ και πάχος $t=7.92\text{mm}$. Για τον εν λόγω αγωγό οι αδιάστατοι συντελεστές μήκους προκύπτουν ως εξής:

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{rt}} = \frac{457}{\sqrt{914 \times 7.92}} = 7.60 \quad (3.11)$$

και:

$$\Omega = \frac{L}{r} \sqrt{\frac{t}{r}} = \frac{457}{457} \sqrt{\frac{7.92}{457}} = 0.13 \quad (3.12)$$

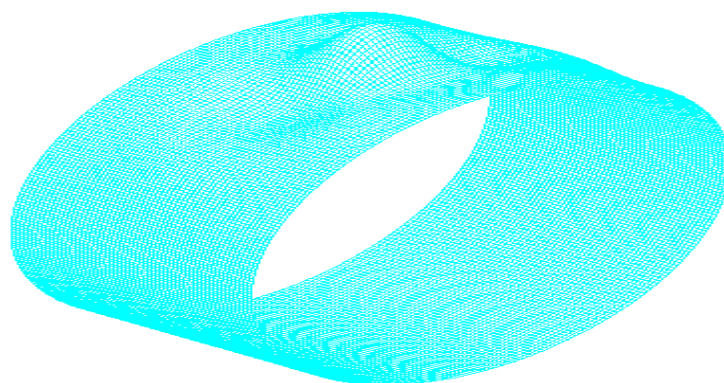
Επομένως, σύμφωνα με τις κατηγορίες του Πίνακα 3-2, ο αγωγός εντάσσεται στην κατηγορία μεσαίου μήκους. Επειδή ο συγκεκριμένος αγωγός χρησιμοποιήθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, η πύκνωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

3.4.1 Γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού

Στη παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε η γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού του κυλίνδρου. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.7), και είναι:

$$\frac{M_{cr}}{M_{cl}} = 1 + \frac{4}{\omega^2} \Rightarrow M_{cr} = \left(1 + \frac{4}{7.60^2}\right) 11443.74 \Rightarrow M_{cr} = 12237.04 \text{ kNm} \quad (3.13)$$

Τα αποτελέσματα της γραμμικοποιημένης ανάλυσης λυγισμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-6.

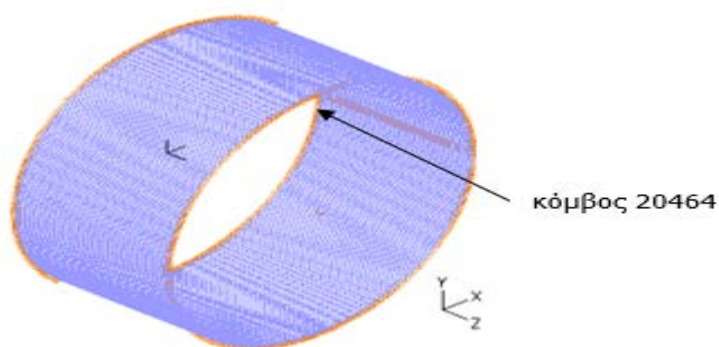


Σχήμα 3-6: Κρίσιμη ιδιομορφή λυγισμού – κρίσιμο φορτίο $M_{cr}=12061\text{kNm}$

Το σφάλμα μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης είναι 1.44%.

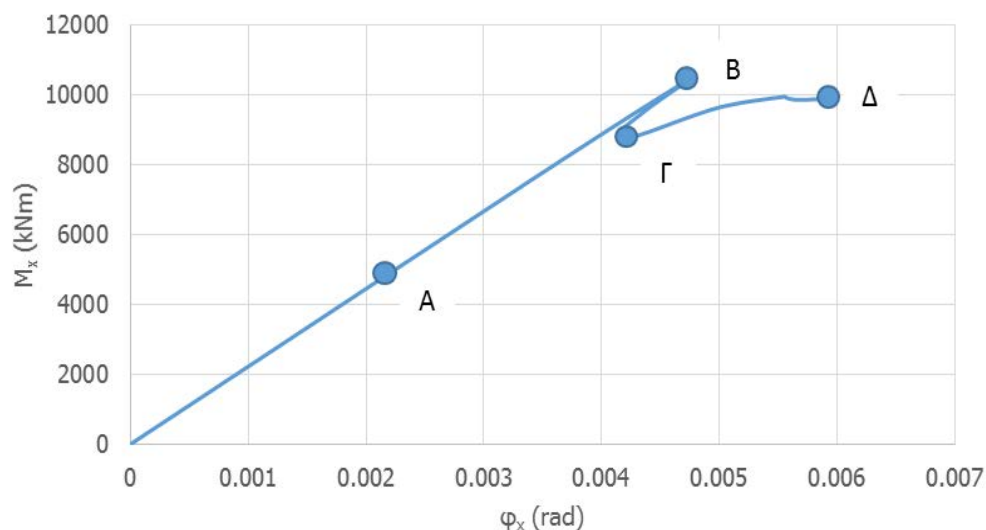
3.4.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιήθηκε η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα διατυπώνονται στην παραμορφωμένη του κατάσταση, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την προλυγισμική και μεταλυγισμική του συμπεριφορά. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την ανάλυση αυτή είναι ελαστικός χάλυβας. Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας του φορέα για τον κόμβο 20464, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-7 και επιλέχθηκε επειδή αναπτύσσει τη μέγιστη στρόφη περί τον άξονα x του αγωγού στο τέλος της ανάλυσης.



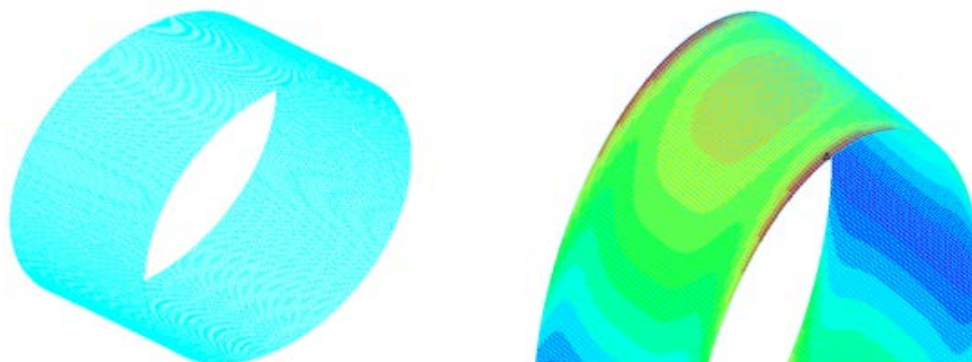
Σχήμα 3-7: Θέση κόμβου 20464 με τη μεγαλύτερη στρόφη

Στον κατακόρυφο άξονα του δρόμου ισορροπίας παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο (M_x), ενώ στον οριζόντιο η στρόφη του φορέα περί τον άξονα x (φ_x).

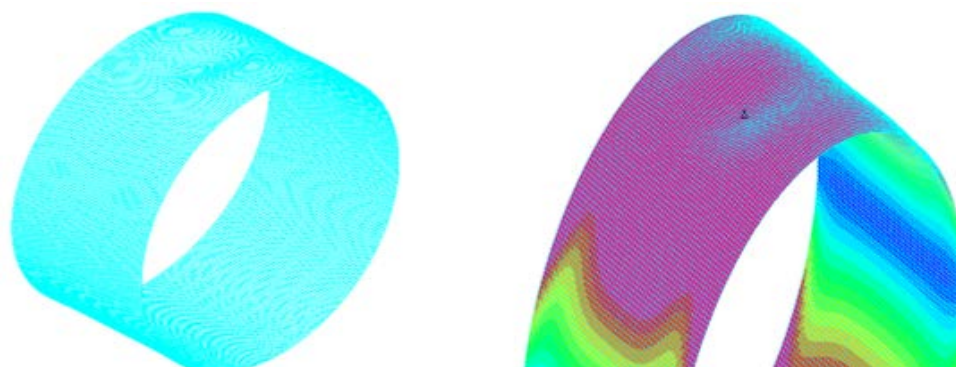


Σχήμα 3-8: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

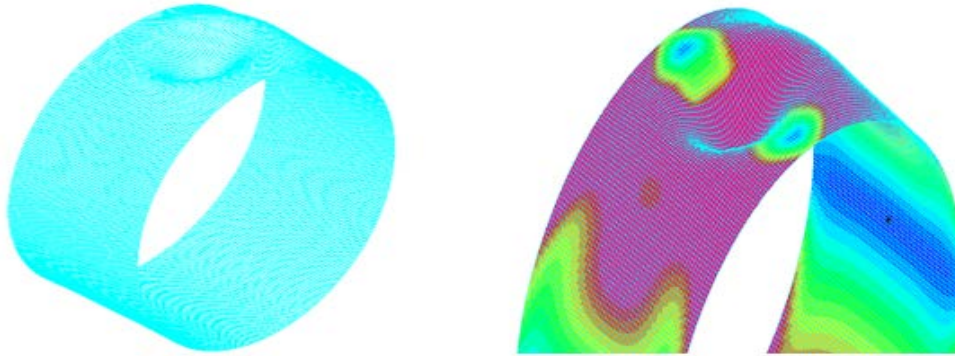
Από το Σχήμα 3-8, προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $M_u=10404\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικός έως το σημείο B, που είναι σημείο διακλάδωσης, όπου και εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Ο λυγισμός προκαλείται ακαριαία στο σημείο B και ο κύλινδρος δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό, επομένως πρόκειται για φορέα χωρίς μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία A, B, Γ και Δ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-9, Σχήμα 3-10, Σχήμα 3-11 και στο Σχήμα 3-12 αντίστοιχα.



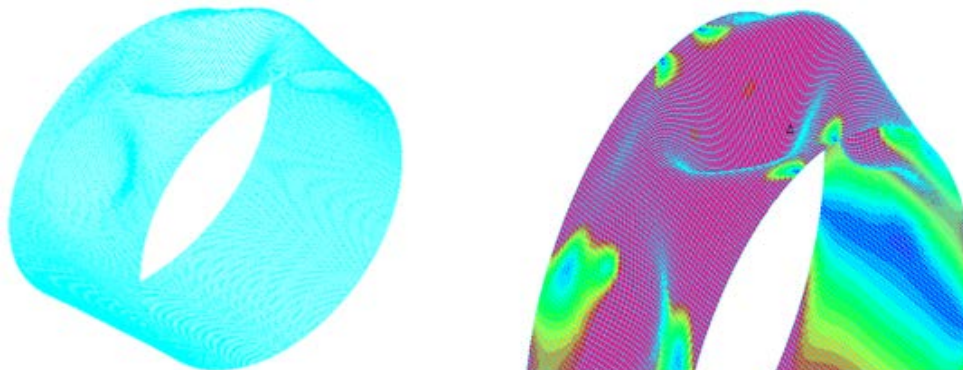
Σχήμα 3-9: Παραμόρφωση και κατανομή τάσεων αγωγού B στο σημείο A



Σχήμα 3-10: Παραμόρφωση και κατανομή τάσεων αγωγού B στο σημείο B

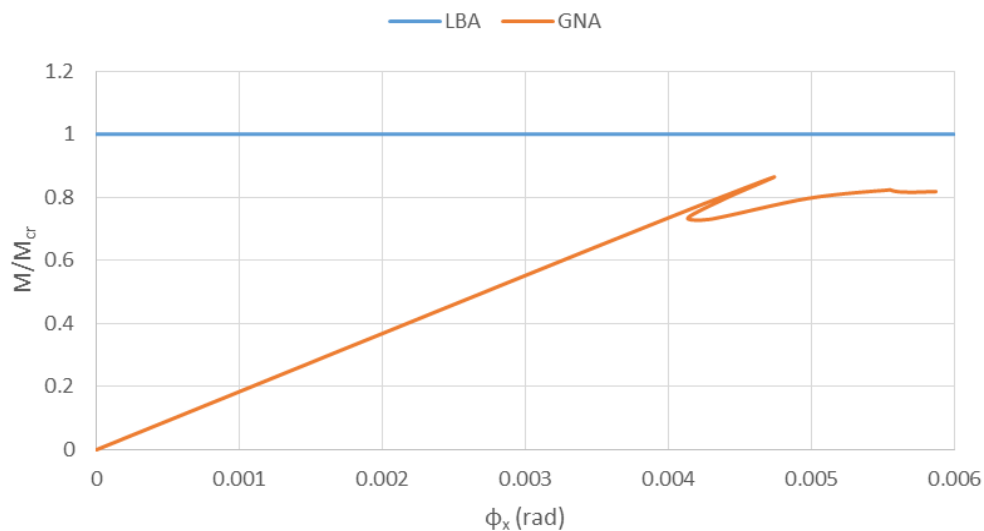


Σχήμα 3-11: Παραμόρφωση και κατανομή τάσεων αγωγού Β στο σημείο Γ



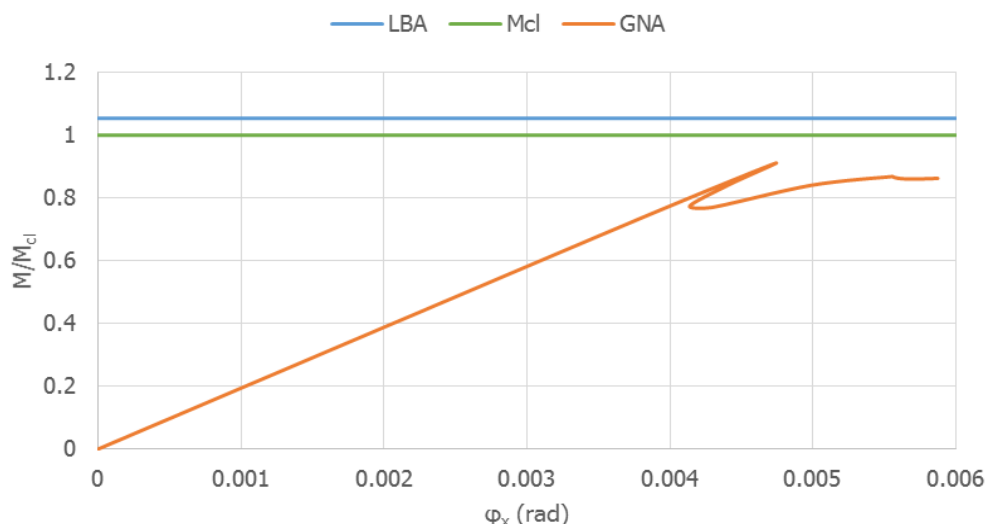
Σχήμα 3-12: Παραμόρφωση και κατανομή τάσεων αγωγού Β στο σημείο Δ

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων στο Σχήμα 3-13, τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας αδιαστατοποιήθηκαν με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (M_{cr}) της αριθμητικής ανάλυσης.



Σχήμα 3-13: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Στο Σχήμα 3-13, παρατηρείται ότι το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 13.70% συγκριτικά με κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Στο Σχήμα 3-14, το φορτίο έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς τη ροπή M_{cl} .



Σχήμα 3-14: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Στο Σχήμα 3-14, παρατηρείται ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αυξημένο κατά 5% συγκριτικά με τη ροπή M_{cl} , ενώ το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 9.10%.

3.5 Ανάλυση αγωγού Γ

Στην παρούσα ενότητα αναλύθηκε ένας κυλινδρικός αγωγός με τα ίδια χαρακτηριστικά του αγωγού Β, με διαφοροποίηση στο μήκος του. Η αλλαγή αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να είναι δυνατή η ωσειδής παραμόρφωση της διατομής του αγωγού. Σύμφωνα με τις κατηγορίες των αγωγών, όπως αυτές περιγράφονται στην ενότητα 3.3, η κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται για τη μεταβατικού μήκους κατηγορία, αλλά κυρίως για την κατηγορία μακρών κυλίνδρων. Για το λόγο αυτό αυξήθηκε το μήκος του κυλίνδρου σε $L_{\Gamma}=11.425\text{m}$ διατηρώντας την ακτίνα, το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του σταθερά. Με τη τροποποίηση αυτή στο μήκος του αγωγού οι αδιάστατοι συντελεστές μήκους διαμορφώνονται ως εξής:

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{rt}} = \frac{11425}{\sqrt{914(7.92)}} = 189.90 \quad (3.14)$$

και:

$$\Omega = \frac{L}{r} \sqrt{\frac{t}{r}} = \frac{11425}{457} \sqrt{\frac{7.92}{457}} = 3.29 \quad (3.15)$$

Επομένως ο αγωγός Β εντάσσεται στην κατηγορία μεταβατικού μήκους. Επειδή στις ροπές M_{Braz} και M_{cl} , δε συμπεριλαμβάνεται ο όρος του μήκους του αγωγού, τότε οι ροπές αυτές παραμένουν σταθερές στην περίπτωση που η ακτίνα, το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού παραμείνουν σταθερά, ανεξάρτητα από το μήκος του, όπως οι δυο υπό εξέταση κύλινδροι του παρόντος κεφαλαίου.

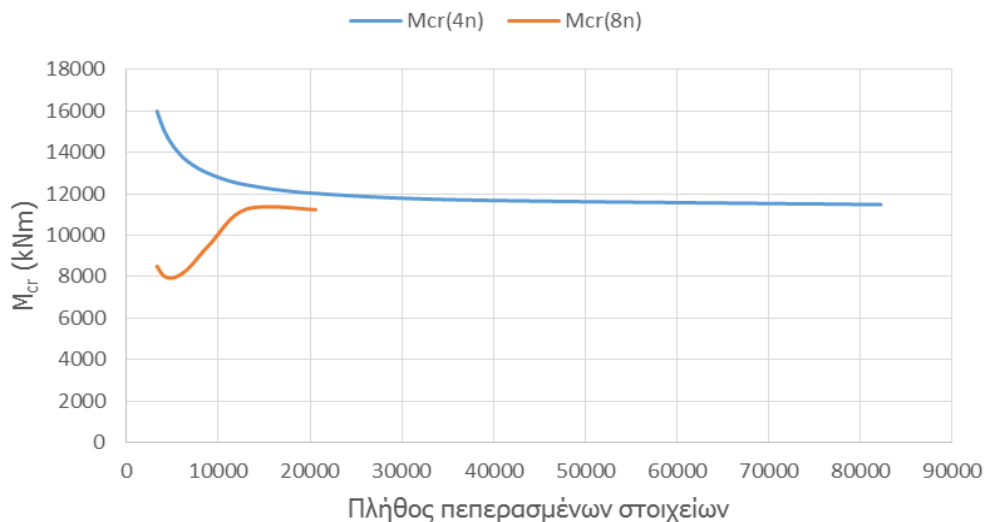
3.5.1 Πύκνωση πλέγματος επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων

Στον Πίνακα 3-3 παρουσιάζεται η πύκνωση του δικτύου του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η πύκνωση αυτή πραγματοποιήθηκε με τετρακομβικά ($P_{cr(4n)}$) και οκτακομβικά ($P_{cr(8n)}$) επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Επίσης, σε αυτόν τον πίνακα παρουσιάζεται το σφάλμα που προκύπτει ανάμεσα στις τιμές του κρίσιμου φορτίου.

Πίνακας 3-3: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

A/A	Πλήθος στοιχείων	$P_{cr(4n)}$ (kNm)	Απόκλιση (%)	$P_{cr(8n)}$ (kNm)	Απόκλιση (%)
1	3306	15994		8503	
2	4064	15069	5.78	8037	5.48
3	5148	14253	5.41	7963	0.92
4	6683	13558	4.88	8383	5.27
5	9120	12949	4.49	9598	14.49
6	13053	12436	3.96	11265	17.37
7	20592	12023	3.32	11241	0.21
8	36576	11708	2.62	-	-
9	82224	11484	1.91	-	-

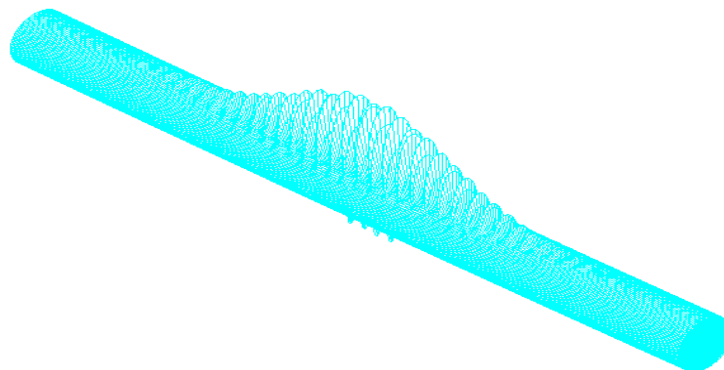
Στις περιοχές του Πίνακα 3-3 όπου υπάρχει παύλα (-) δεν προέκυψαν αποτελέσματα λόγω αριθμητικής αστάθειας του αλγορίθμου. Στο Σχήμα 3-15 παρουσιάζεται η πύκνωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τον Πίνακα 3-3. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος παρουσιάζεται το κρίσιμο φορτίο όπως αυτό έχει προκύψει τόσο με χρήση τετρακομβικών ($P_{cr(4n)}$) όσο και οκτακομβικών ($P_{cr(8n)}$) επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στον οριζόντιο το πλήθος των στοιχείων.



Σχήμα 3-15: Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων αγωγού Β

3.5.2 Γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού

Στη παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε η γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού του κυλίνδρου. Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον αγωγό Γ, σύμφωνα με το Σχήμα 3-15 χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που αποτελείται από 36576 τετρακομβικά επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Τα αποτελέσματα της γραμμικοποιημένης ανάλυσης λυγισμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-16.



Σχήμα 3-16: Κρίσιμη ιδιομορφή λυγισμού – κρίσιμο φορτίο $M_{cr} = 11708 \text{ kNm}$

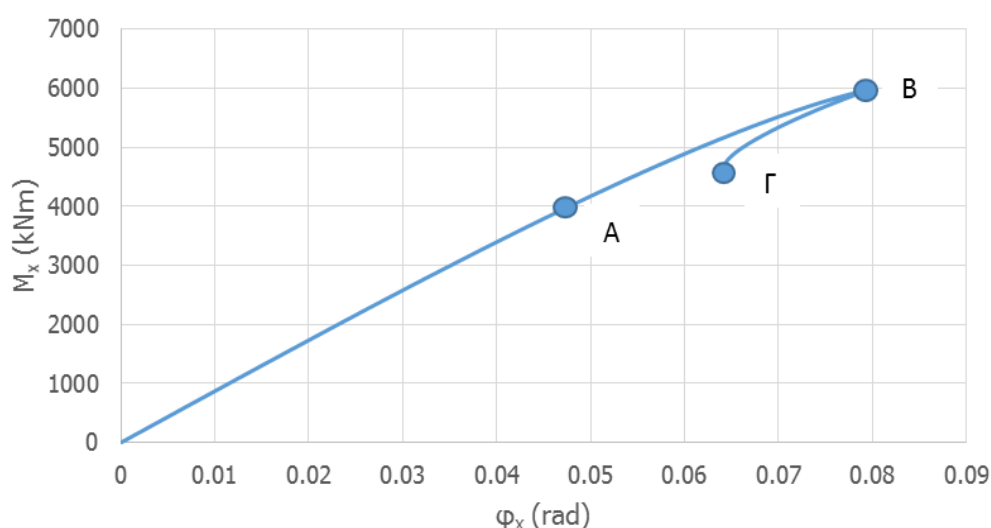
Σύμφωνα με τη σχέση (3.7), το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι:

$$\frac{M_{cr}}{M_{cl}} = 1 + \frac{4}{\omega^2} \Rightarrow M_{cr} = \left(1 + \frac{4}{189.90^2}\right) 11443.74 \Rightarrow M_{cr} = 11445.01 \text{ kNm} \quad (3.16)$$

Το σφάλμα μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης είναι 2.25%.

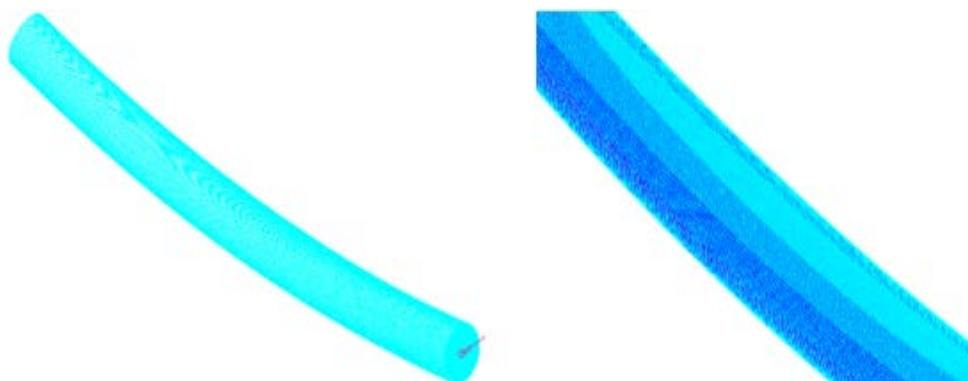
3.5.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιήθηκε η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα διατυπώνονται στην παραμορφωμένη του κατάσταση, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την προλυγισμική και μεταλυγισμική του συμπεριφορά. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την ανάλυση είναι ελαστικός χάλυβας. Στο Σχήμα 3-17 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας όπου στον κατακόρυφο άξονα περιγράφεται το ασκούμενο φορτίο (M_x) και στον οριζόντιο η στρόφη του φορέα περί τον άξονα x (φ_x), όπως αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-5.

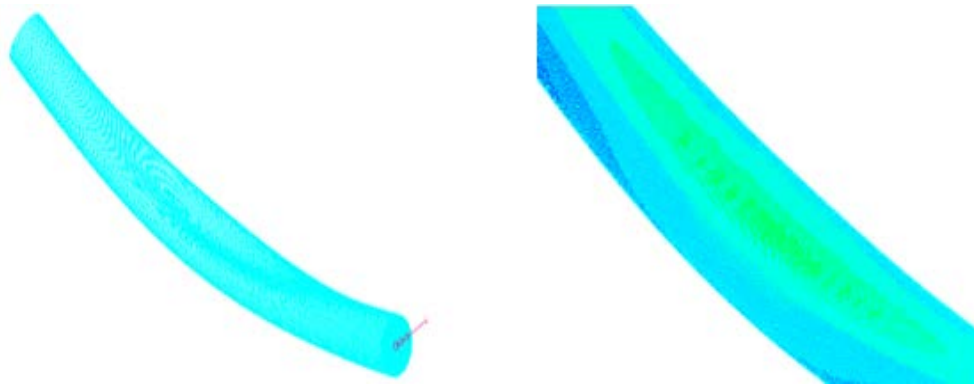


Σχήμα 3-17: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

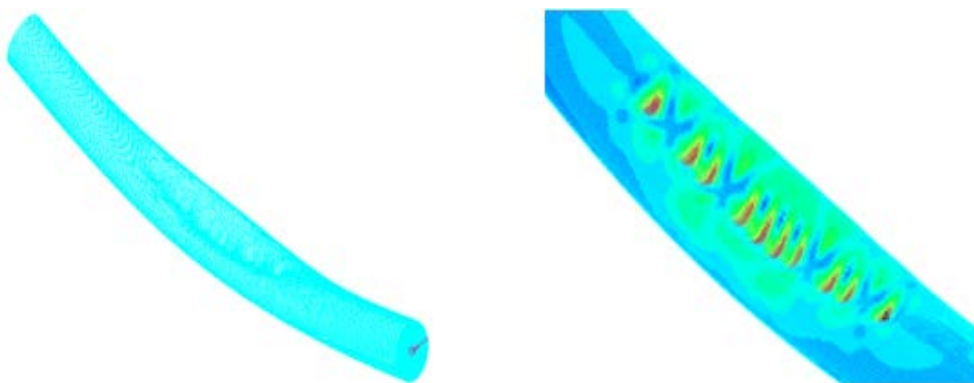
Από το Σχήμα 3-17 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο ισούται με $M_u = 5961 \text{ kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά περίπου γραμμικός έως το σημείο Β, που είναι σημείο διακλάδωσης, όπου και εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Ο λυγισμός προκαλείται ακαριαία στο σημείο Β και ο κύλινδρος δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό, επομένως πρόκειται για φορέα χωρίς μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία Α, Β και Γ του δρόμου ισορροπίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-18, Σχήμα 3-19 και στο Σχήμα 3-20 αντίστοιχα.



Σχήμα 3-18: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και κατανομή τάσεων στο σημείο Α του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

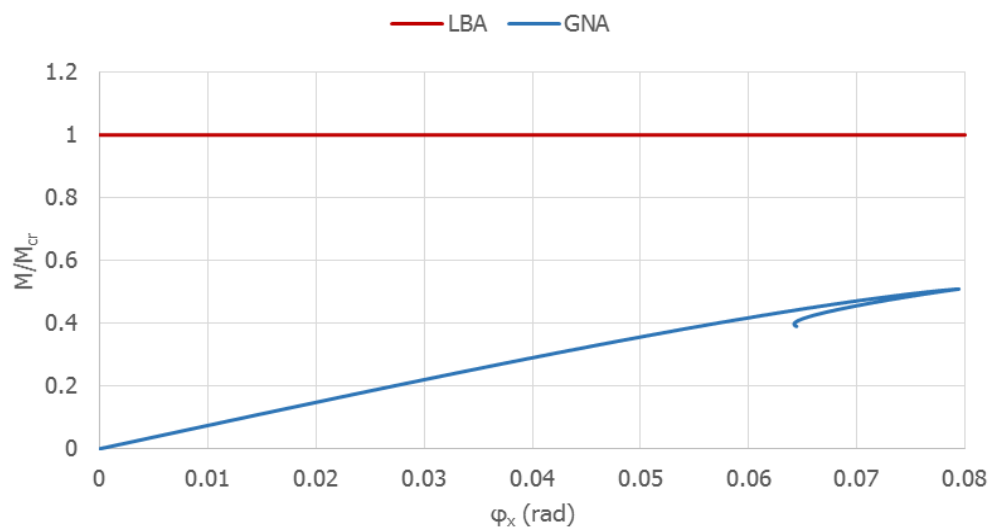


Σχήμα 3-19: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και κατανομή τάσεων στο σημείο Β του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

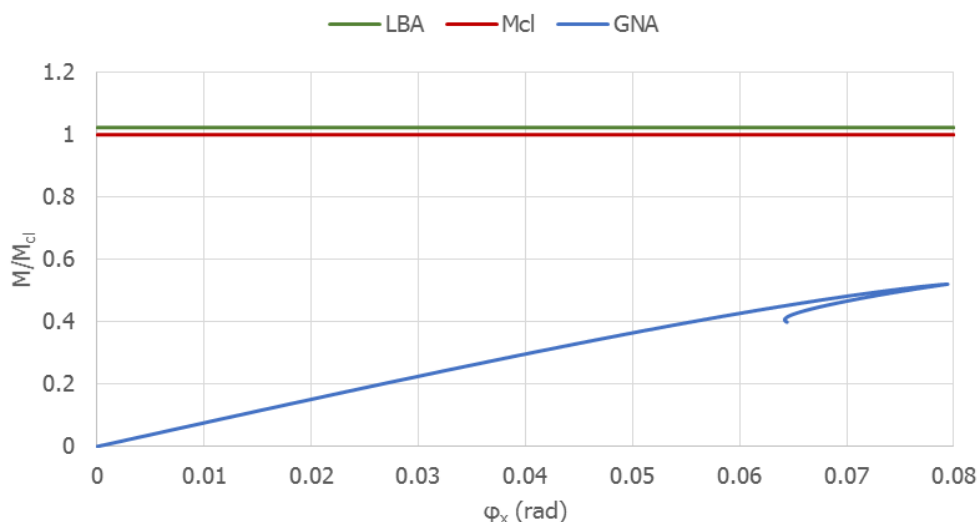


Σχήμα 3-20: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

Στο Σχήμα 3-21, στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας αδιαστατοποιημένο ως προς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού M_{cr} , ενώ στον οριζόντιο η στροφή του φορέα περί τον άξονα x (φ_x). Από το Σχήμα 3-21 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 49.09% συγκριτικά με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

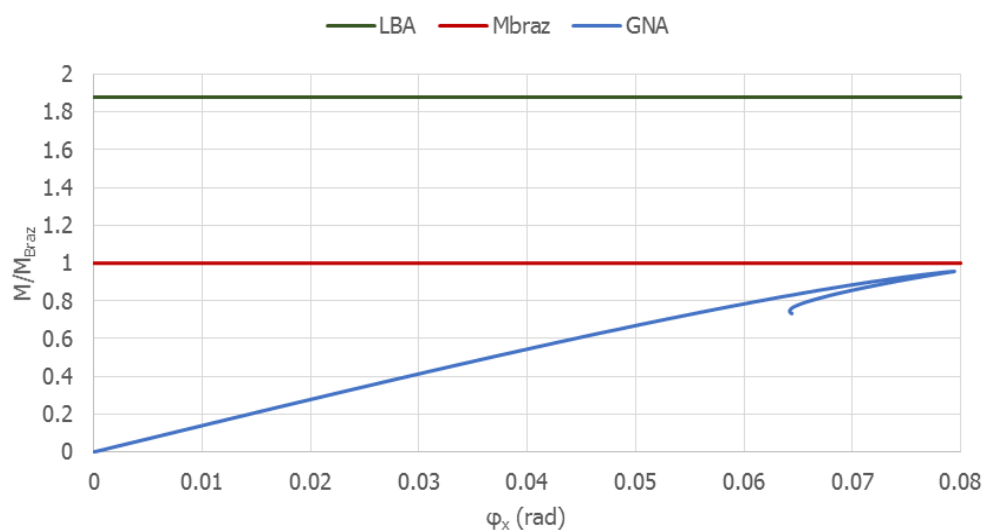


Σχήμα 3-21: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας



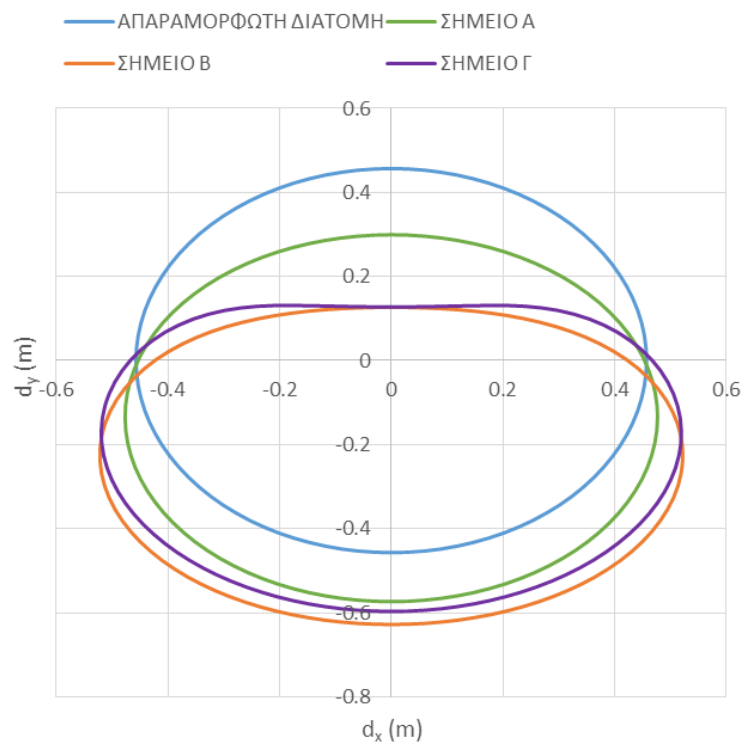
Σχήμα 3-22: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Στο Σχήμα 3-22 παρατηρείται η πολύ μικρή διαφορά του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και της ροπής M_{cl} . Πιο συγκεκριμένα το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι 1.02% μεγαλύτερο από τη ροπή M_{cl} . Επίσης το οριακό φορτίο λυγισμού είναι 47.91% μικρότερο από τη M_{cl} . Λόγω της ωσειδούς παραμόρφωσης του φορέα κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη ροπή M_{Braz} , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-23.

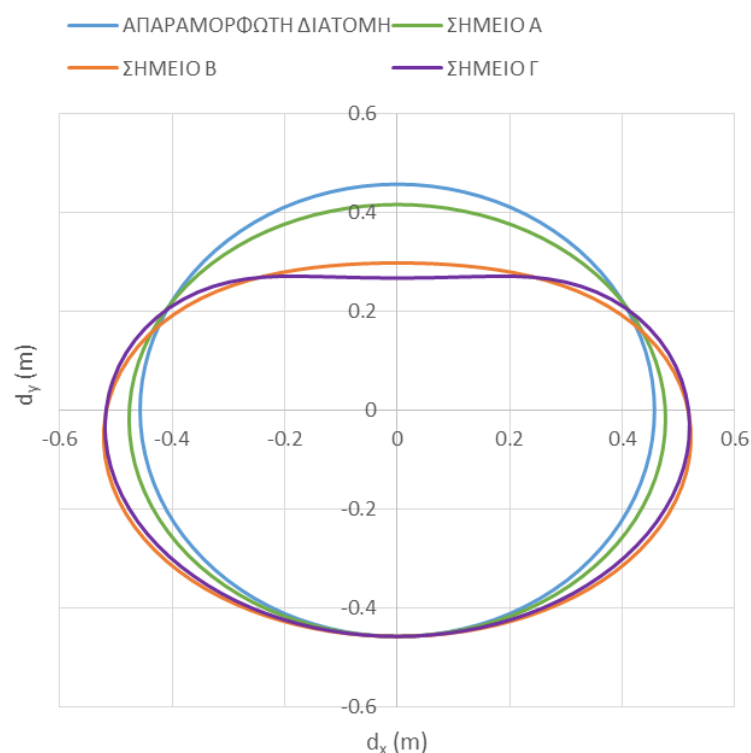


Σχήμα 3-23: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Στο Σχήμα 3-23 παρατηρείται ότι το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 4.33% συγκριτικά με τη ροπή M_{Braz} . Επίσης παρατηρείται η επίδραση της οβαλοποίησης του αγωγού στο κρίσιμο φορτίο αφού $M_{cl}/M_{Braz}=1.837$. Η παραμορφωμένη εικόνα της διατομής του φορέα η οποία υφίσταται οβαλοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-24 και το Σχήμα 3-25. Στο Σχήμα 3-24 παρατηρείται η παραμόρφωση της διατομής του κυλίνδρου με ταυτόχρονη μετατόπιση του κατά τον άξονα y λόγω της κάμψεως του κυλίνδρου. Για εποπτικούς λόγους στο Σχήμα 3-25 παρουσιάζεται μόνο η οβαλοποίηση της διατομής.



Σχήμα 3-24: Παραμορφωμένες διατομές φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας



Σχήμα 3-25: Παραμορφωμένες διατομές φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Στον Πίνακα 3-4 παρουσιάζεται το μέγεθος της οβαλοποίησης (y/D) όπως προέκυψε στα σημεία Α, Β και Γ του δρόμου ισορροπίας, όπου y είναι η μετατόπιση της ακραίας ίνας της διατομής και D η διάμετρος.

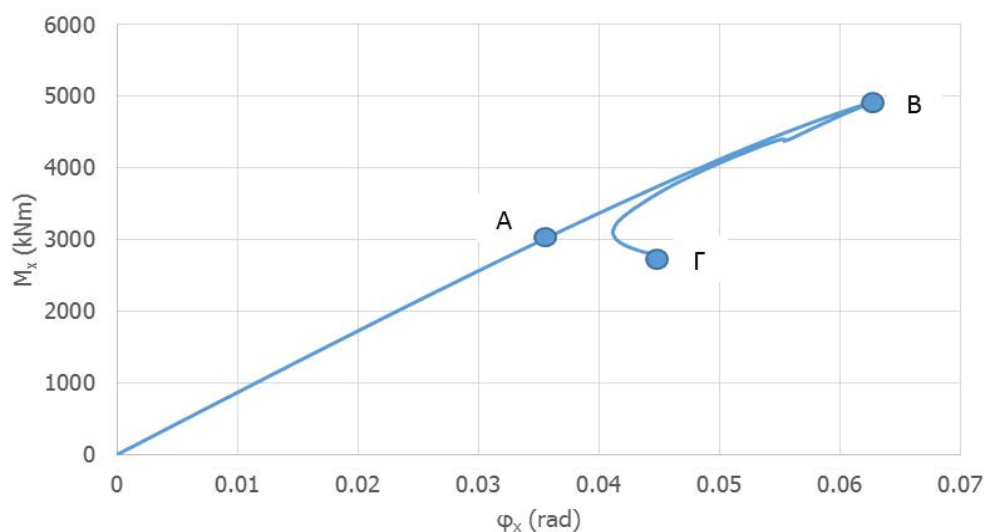
Πίνακας 3-4: Οβαλοποίηση διατομής μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Σημείο	Οβαλοποίηση (y/D)
A	0.04
B	0.17
Γ	0.21

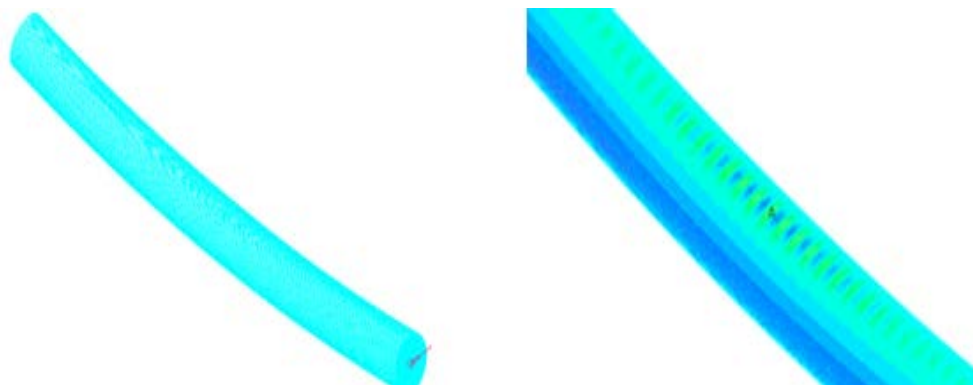
3.5.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλειες

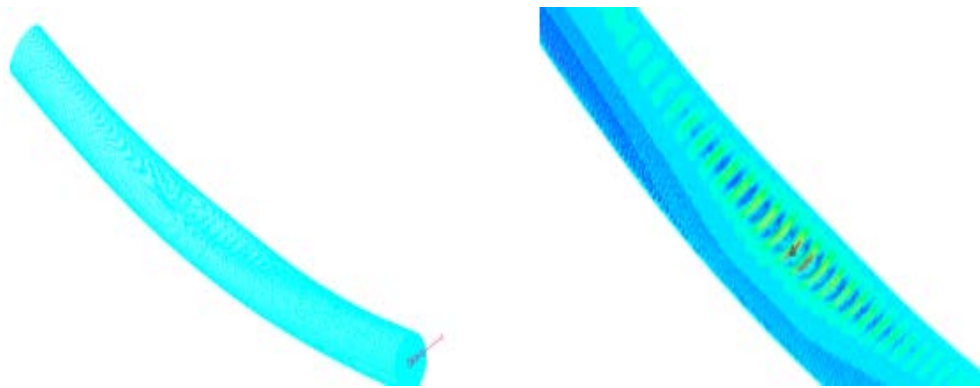
3.5.4.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια η οποία αντιστοιχεί στο 20% του πάχους του αγωγού. Στο Σχήμα 3-26 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της εν λόγω αναλύσεως, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο (M_x) και στον οριζόντιο η στρόφη του φορέα περί τον άξονα x (ϕ_x).

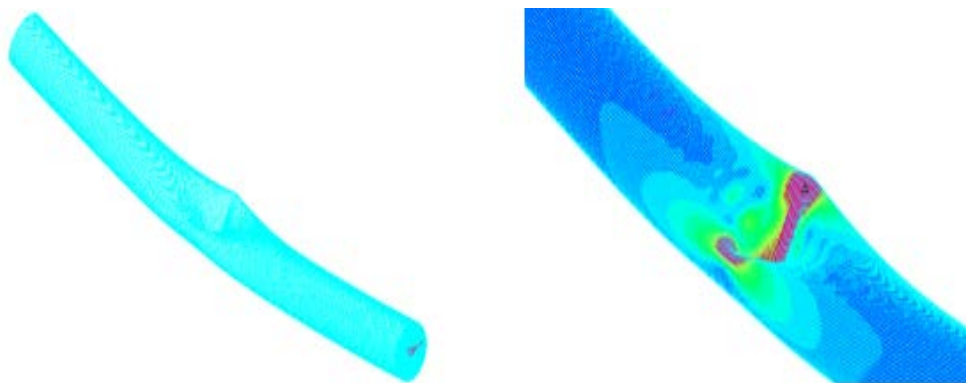
Σχήμα 3-26: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$

Από το Σχήμα 3-26 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $M_u=4929\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά σχεδόν γραμμικός έως το σημείο διακλάδωσης B όπου εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Ο λυγισμός επέρχεται ακαριαία στο σημείο B και ο φορέας δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό, επομένως πρόκειται για δρόμο ισορροπίας χωρίς μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-27, Σχήμα 3-28 και στο Σχήμα 3-29 αντίστοιχα.

Σχήμα 3-27: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και κατανομή τάσεων στο σημείο A του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

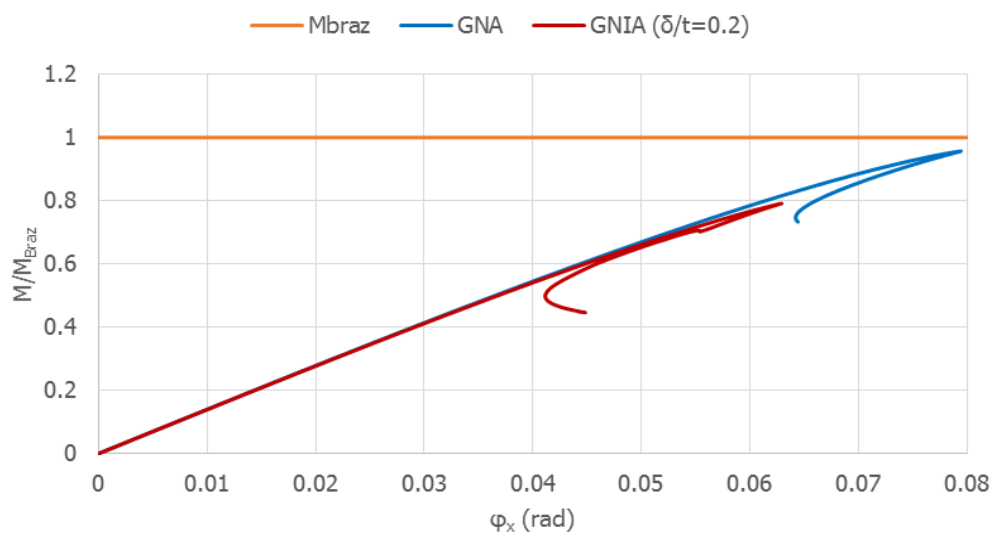


Σχήμα 3-28: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Β του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους



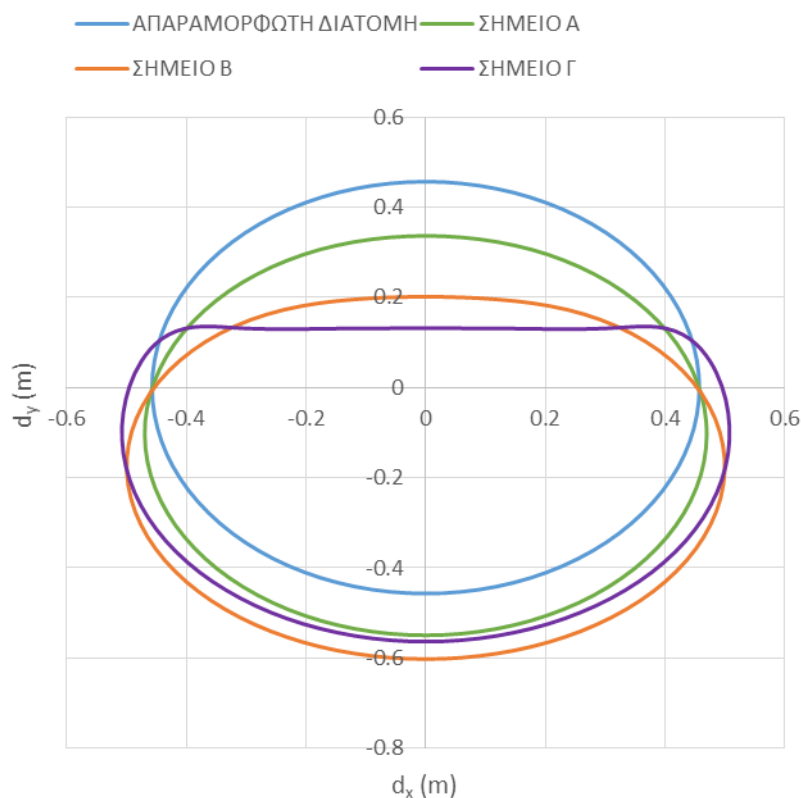
Σχήμα 3-29: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

Στο Σχήμα 3-30 το ασκούμενο φορτίο έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς τη ροπή M_{Braz} .

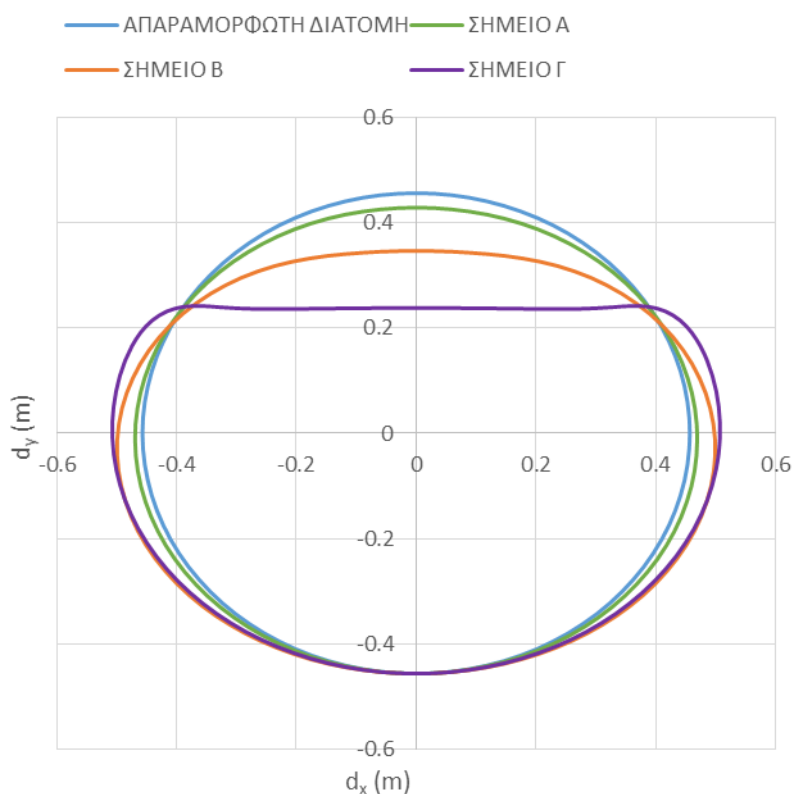


Σχήμα 3-30: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς και με ατέλεια $\delta/t=0.2$

Από το Σχήμα 3-30 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ είναι 20.88% μικρότερο σε σχέση με τη ροπή M_{Braz} και 16.55% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς ατέλειες. Η παραμορφωμένη εικόνα της διατομής του φορέα η οποία υφίσταται οβαλοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-31 και το Σχήμα 3-32. Στο Σχήμα 3-31 παρατηρείται η παραμόρφωση της διατομής του κυλίνδρου με ταυτόχρονη μετατόπιση του κατά τον άξονα y λόγω της κάμψης του κυλίνδρου. Για εποπτικούς λόγους στο Σχήμα 3-32 παρουσιάζεται μόνο η οβαλοποίηση της διατομής.



Σχήμα 3-31: Παραμορφωμένη διατομή φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$



Σχήμα 3-32: Παραμορφωμένη διατομή φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$

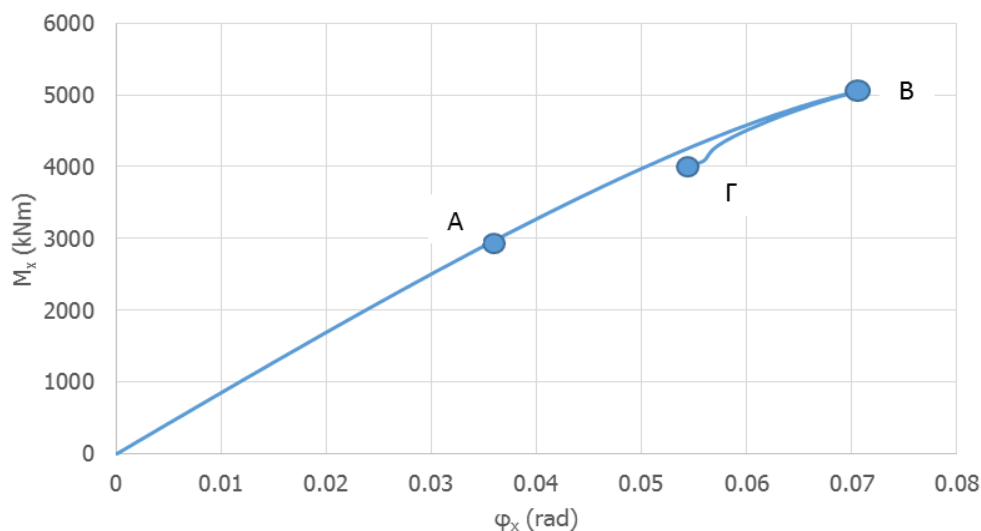
Στον Πίνακα 3-4 παρουσιάζεται το μέγεθος της οβαλοποίησης (y/D) όπως προέκυψε στα σημεία Α, Β και Γ του δρόμου ισορροπίας, όπου y είναι η μετατόπιση της ακραίας ίνας της διατομής και D η διάμετρος.

Πίνακας 3-5: Οβαλοποίηση διατομής μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$

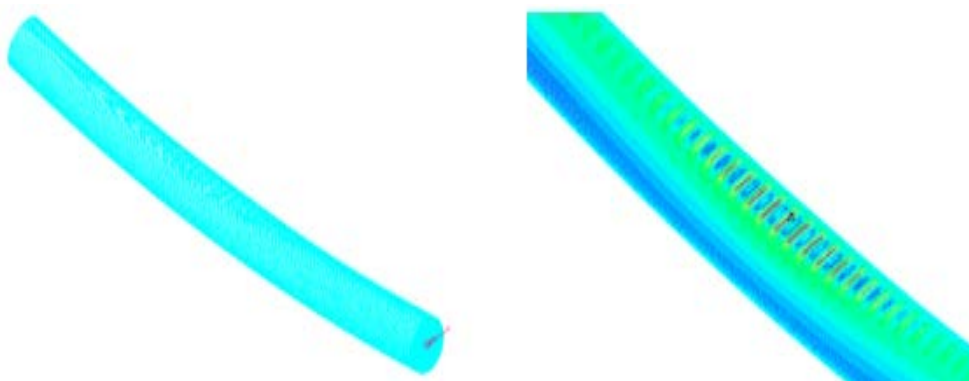
Σημείο	Οβαλοποίηση (y/D)
A	0.03
B	0.12
Γ	0.24

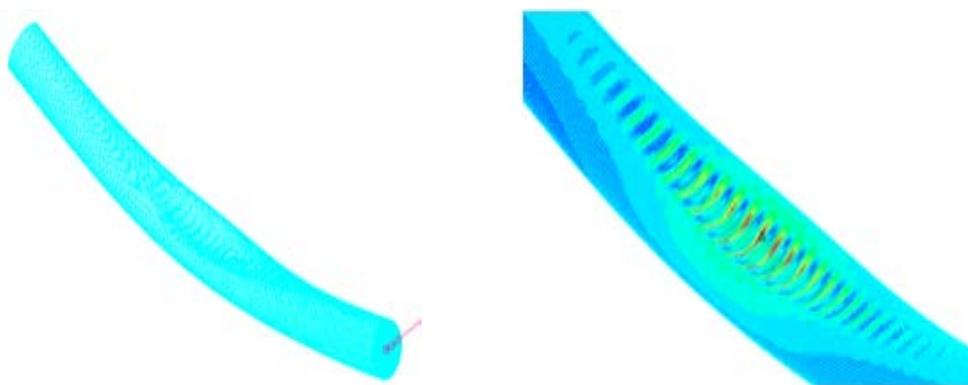
3.5.4.2 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια η οποία αντιστοιχεί στο 50% του πάχους του αγωγού. Στο Σχήμα 3-33 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της εν λόγω αναλύσεως, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο (M_x) και στον οριζόντιο η στρόφη του φορέα περί τον άξονα x (ϕ_x).

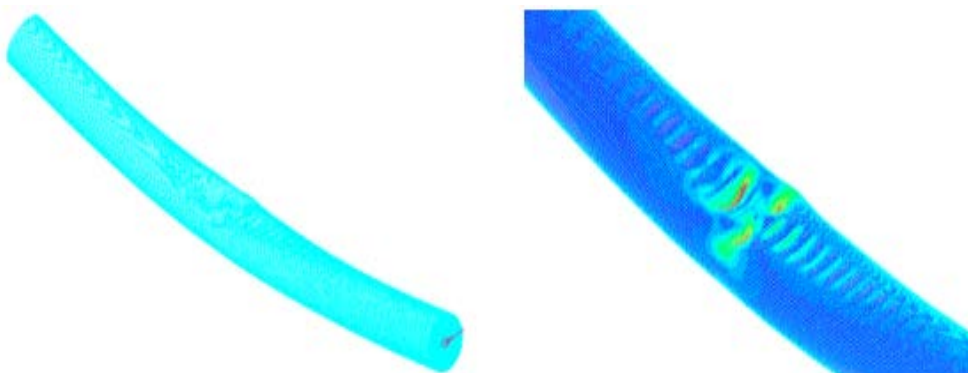
Σχήμα 3-33: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$

Από το Σχήμα 3-33 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $M_u=5048\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι ελαφρώς μη γραμμικός, ώσπου στο σημείο B (σημείο διακλάδωσης) εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού και ο φορέας δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό, επομένως πρόκειται για ασταθή συμπεριφορά χωρίς μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-34, Σχήμα 3-35 και στο Σχήμα 3-36 αντίστοιχα.

Σχήμα 3-34: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Α αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

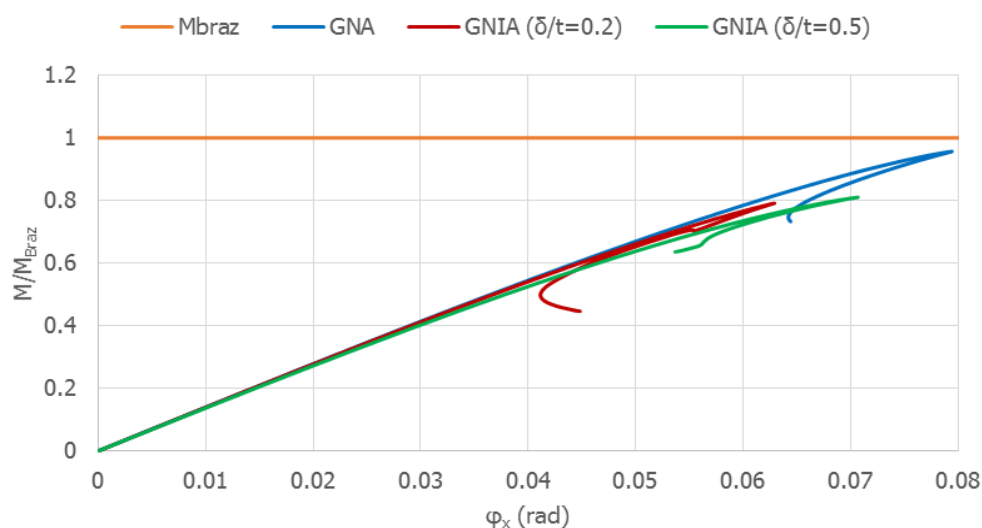


Σχήμα 3-35: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Β αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους



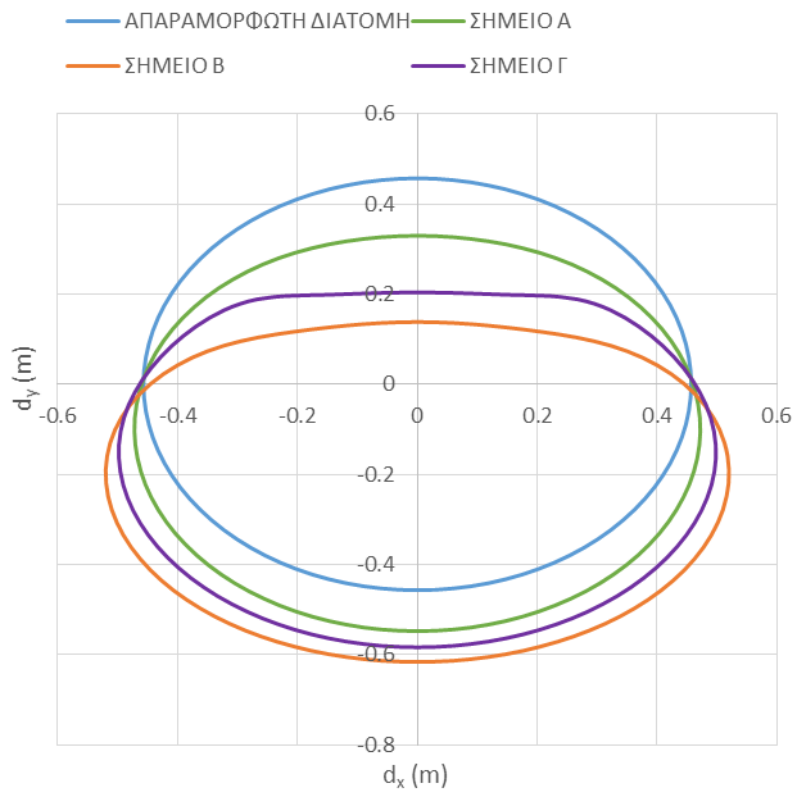
Σχήμα 3-36: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

Στο Σχήμα 3-37, το ασκούμενο φορτίο έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς τη ροπή M_{Braz} .

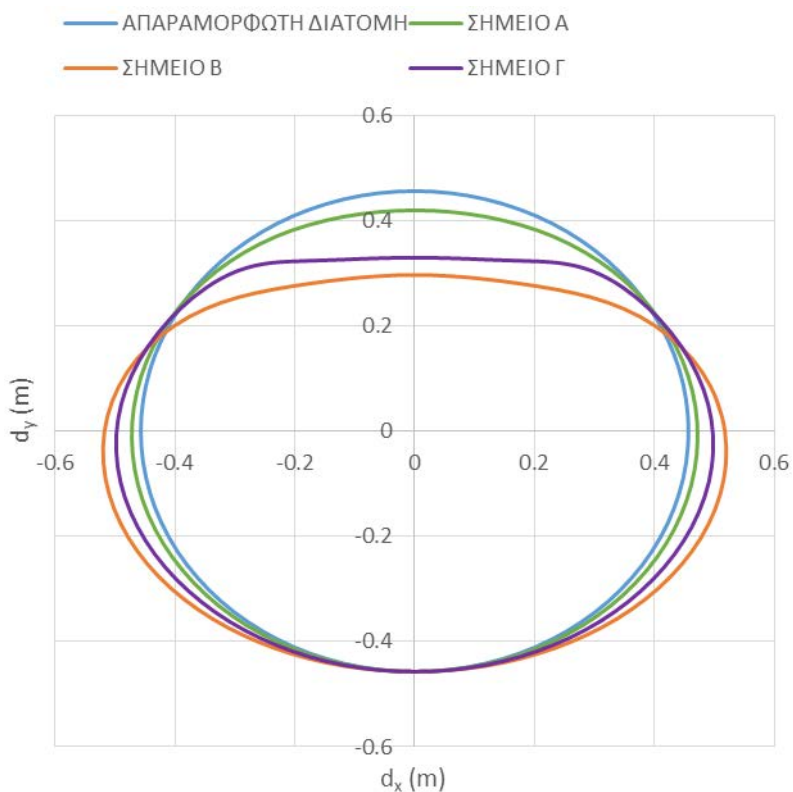


Σχήμα 3-37: Δρόμοι ισορροπίας χωρίς και με ατέλειες $\delta/t=0.2$ και $\delta/t=0.5$

Από το Σχήμα 3-37 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ είναι 18.98% μικρότερο σε σχέση με τη ροπή M_{Braz} . Η παραμορφωμένη εικόνα της διατομής του φορέα η οποία υφίσταται οβαλοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-38 και στο Σχήμα 3-39. Στο Σχήμα 3-38 παρατηρείται η παραμόρφωση της διατομής του κυλίνδρου με ταυτόχρονη μετατόπιση του κατά τον άξονα y λόγω της κάμψεως του κυλίνδρου. Για εποπτικούς λόγους στο Σχήμα 3-39 παρουσιάζεται μόνο η οβαλοποίηση της διατομής.



Σχήμα 3-38: Παραμορφωμένες διατομές φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=0.5$



Σχήμα 3-39: Παραμορφωμένες διατομές φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με στέλεια $\delta/t=0.5$

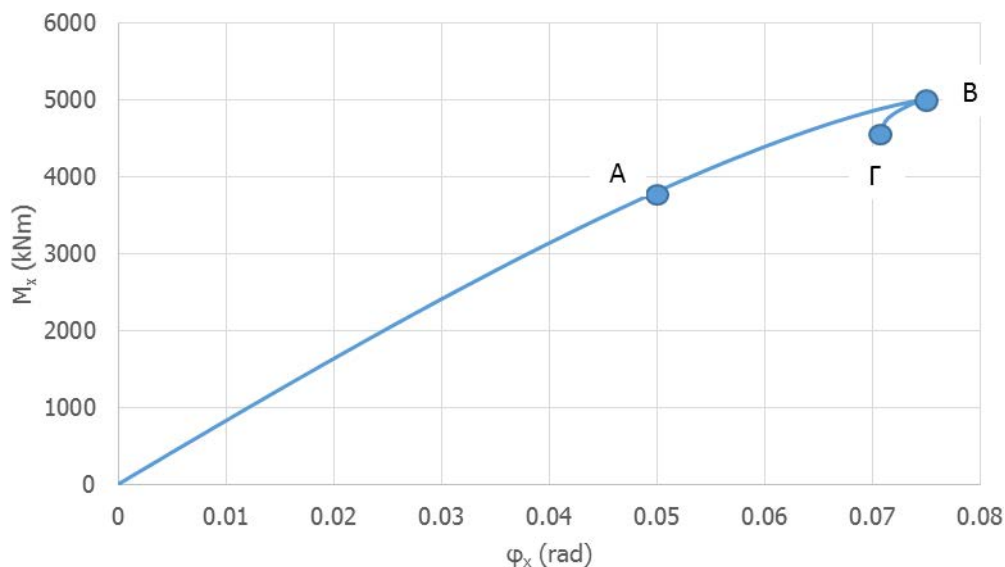
Στον Πίνακα 3-6 παρουσιάζεται το μέγεθος της οβαλοποίησης (y/D) όπως προέκυψε στα σημεία Α, Β και Γ του δρόμου ισορροπίας, όπου y είναι η μετατόπιση της ακραίας ίνας της διατομής και D η διάμετρος.

Πίνακας 3-6: Οβαλοποίηση διατομής μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$

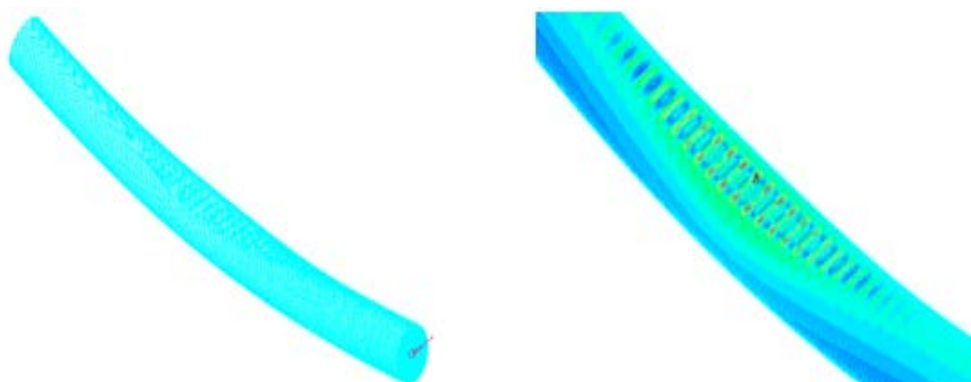
Σημείο	Οβαλοποίηση (y/D)
A	0.04
B	0.17
Γ	0.14

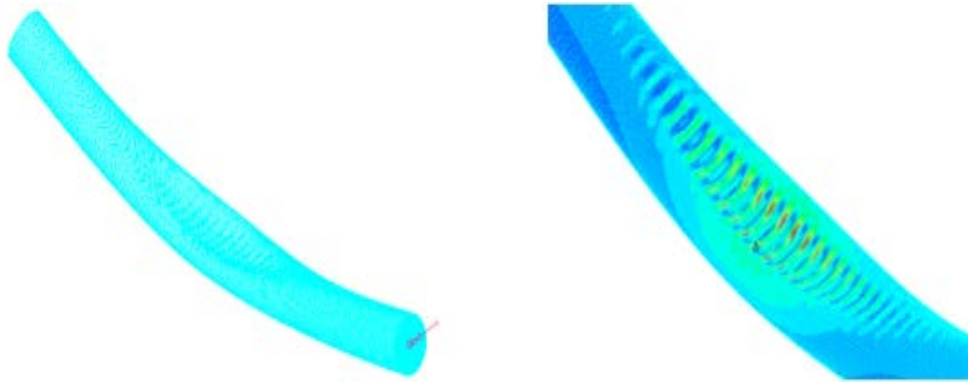
3.5.4.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ατέλεια η οποία αντιστοιχεί στο 100% του πάχους του αγωγού. Στο Σχήμα 3-40 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της εν λόγω αναλύσεως. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο (M_x) και στον οριζόντιο η στροφή του φορέα περί τον άξονα x (φ_x).

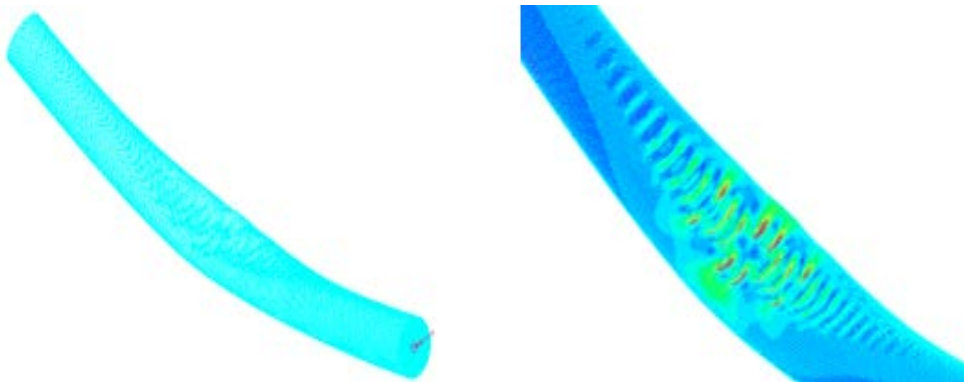
Σχήμα 3-40: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$

Από το Σχήμα 3-40 το οριακό φορτίο ισούται με $M_u=5017\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι ελαφρώς μη γραμμικός, ώσπου στο σημείο διακλάδωσης B εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού, και ο φορέας μετά δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό, επομένως πρόκειται για ασταθή συμπεριφορά. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-41, Σχήμα 3-42 και στο Σχήμα 3-43 αντίστοιχα.

Σχήμα 3-41: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο A του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

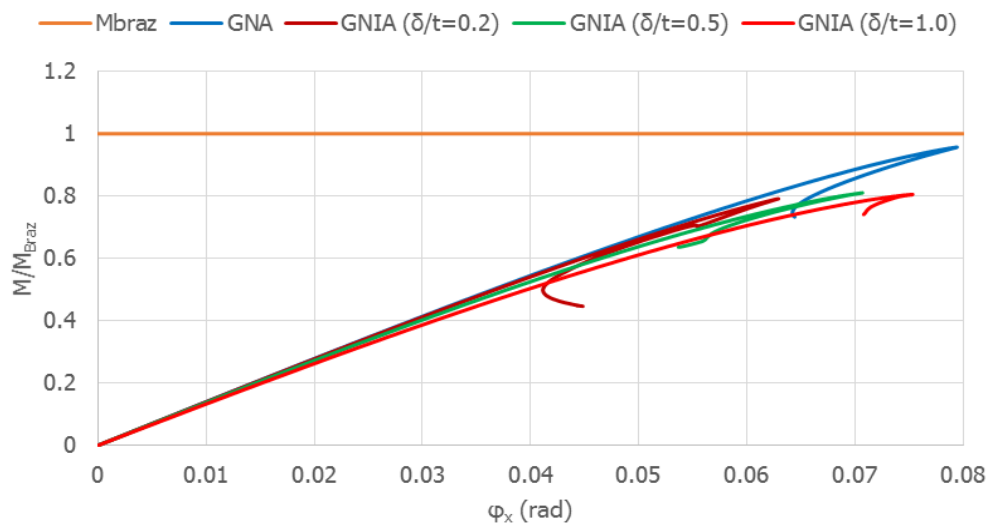


Σχήμα 3-42: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Β του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους



Σχήμα 3-43: Παραμορφωμένη εικόνα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$ και κατανομή τάσεων στο σημείο Γ του αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

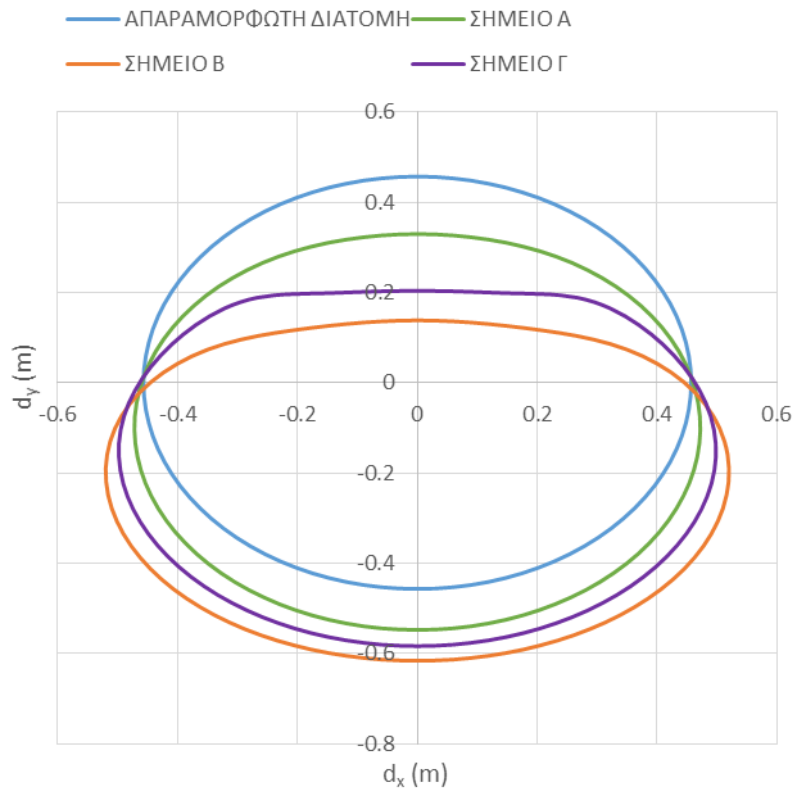
Στο Σχήμα 3-44, το ασκούμενο φορτίο έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς τη ροπή M_{Braz} .



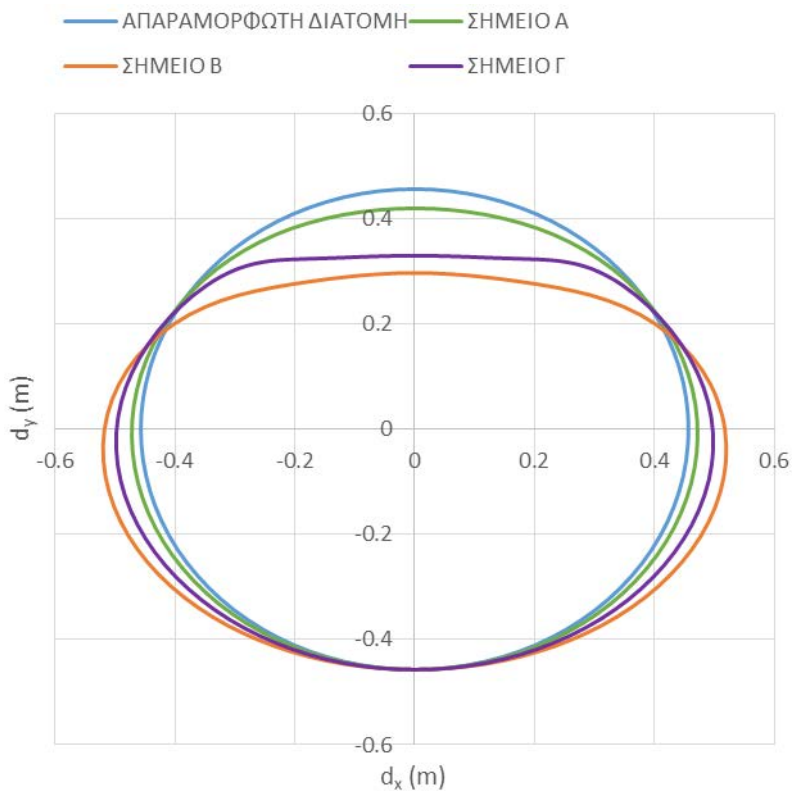
Σχήμα 3-44: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς ατέλεια και με ατέλειες $\delta/t=0.2$, $\delta/t=0.5$ και $\delta/t=1.0$

Από το Σχήμα 3-44 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για ατέλεια $\delta/t=1.0$ είναι 19.47% μικρότερο σε σχέση με τη ροπή M_{Braz} και 15.14% μικρότερο από το οριακό φορτίο λυγισμού της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας χωρίς αρχική ατέλεια. Η παραμορφωμένη εικόνα της διατομής του φορέα η οποία υφίσταται οβαλοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-45 και το Σχήμα 3-46. Στο Σχήμα 3-45 παρατηρείται η παραμόρφωση της διατομής του κυλίνδρου με ταυτόχρονη μετατόπιση του κατά τον άξονα y

λόγω της κάμψεως του κυλίνδρου. Για εποπτικούς λόγους στο Σχήμα 3-46 παρουσιάζεται μόνο η οβαλοποίηση της διατομής.



Σχήμα 3-45: Παραμορφωμένες διατομές φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$



Σχήμα 3-46: Παραμορφωμένες διατομές φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$

Στον Πίνακα 3-7 παρουσιάζεται το μέγεθος της οβαλοποίησης (y/D) όπως προέκυψε στα σημεία A, B και Γ του δρόμου ισορροπίας, όπου y είναι η μετατόπιση της ακραίας ίνας της διατομής και D η διάμετρος.

Πίνακας 3-7: Οβαλοποίηση διατομής μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=1.0$

Σημείο	Οβαλοποίηση (y/D)
A	0.08
B	0.19
Γ	0.18

3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

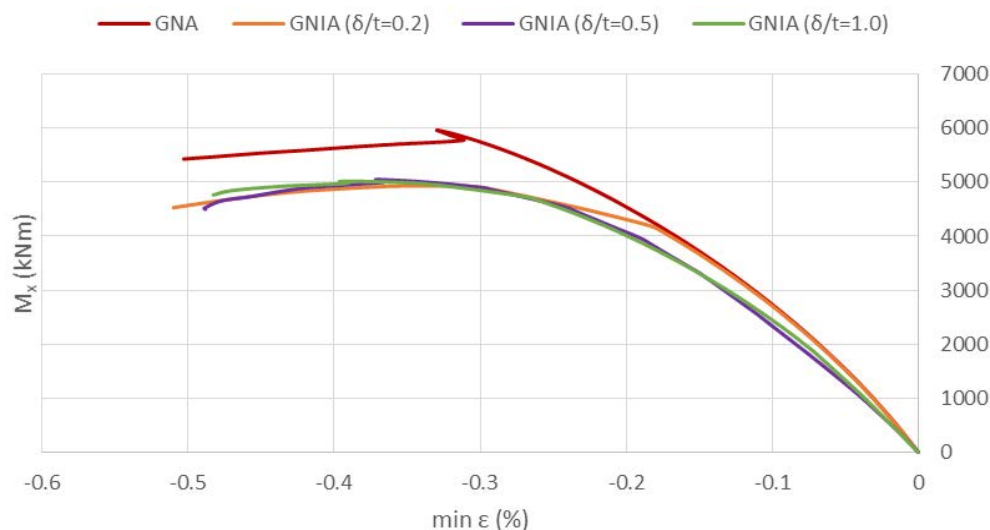
Ο κανονισμός ASCE-ALA ορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη διαμήκης θλιπτική παραμόρφωση $\epsilon_{c,c}$ του αγωγού ως εξής:

$$D' = \frac{D}{1 - \frac{3}{D}(D - D_{\min})} \quad (3.17)$$

όπου D είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού και D_{\min} είναι η εσωτερική διάμετρος του αγωγού. Η μέγιστη διαμήκης θλιπτική παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\epsilon_{c,c} = 0.50\left(\frac{t}{D'}\right) - 0.0025 + 3000\left(\frac{pD}{2Et}\right)^2 \quad (3.18)$$

όπου t είναι το πάχος του αγωγού, p είναι η πίεση, D είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού και E είναι το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού. Στο Σχήμα 3-47 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του αγωγού Γ σε όρους ροπών κάμψεως - ελάχιστων παραμορφώσεων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.



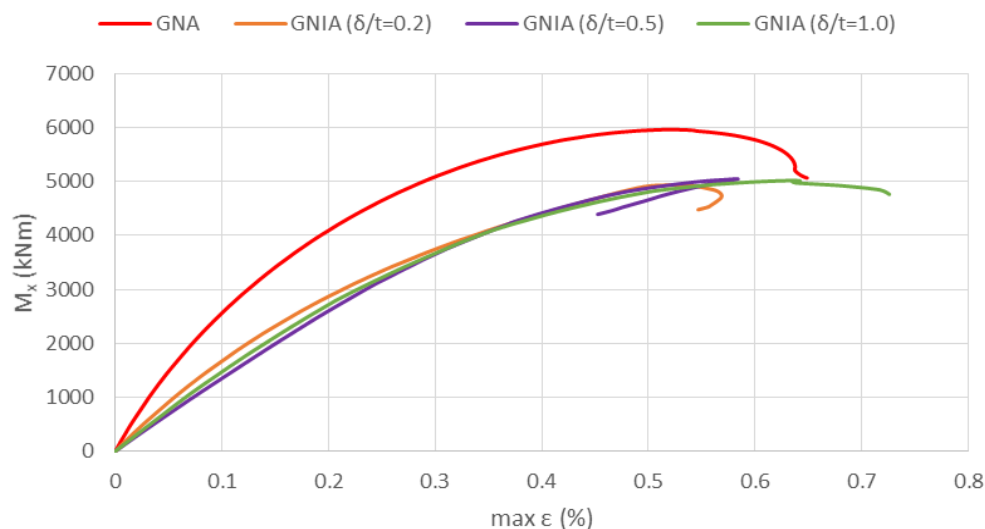
Σχήμα 3-47: Δρόμοι ισορροπίας ροπών κάμψεως - ελάχιστων παραμορφώσεων

Οι αναπτυσσόμενες διαμήκεις θλιπτικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-8.

Πίνακας 3-8: Συγκριτικός πίνακας διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

Ανάλυση	ADINA (%)	ASCE-ALA (%)	Ευρωκώδικας 3 (%)
GNA	0.330	0.157	0.091
GNIA ($\delta/t=0.2$)	0.352		0.118
GNIA ($\delta/t=0.5$)	0.371		0.092
GNIA ($\delta/t=1.0$)	0.390		0.083

Στο Σχήμα 3-47 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του αγωγού Γ σε όρους ροπών κάμψεως – μέγιστων παραμορφώσεων για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.



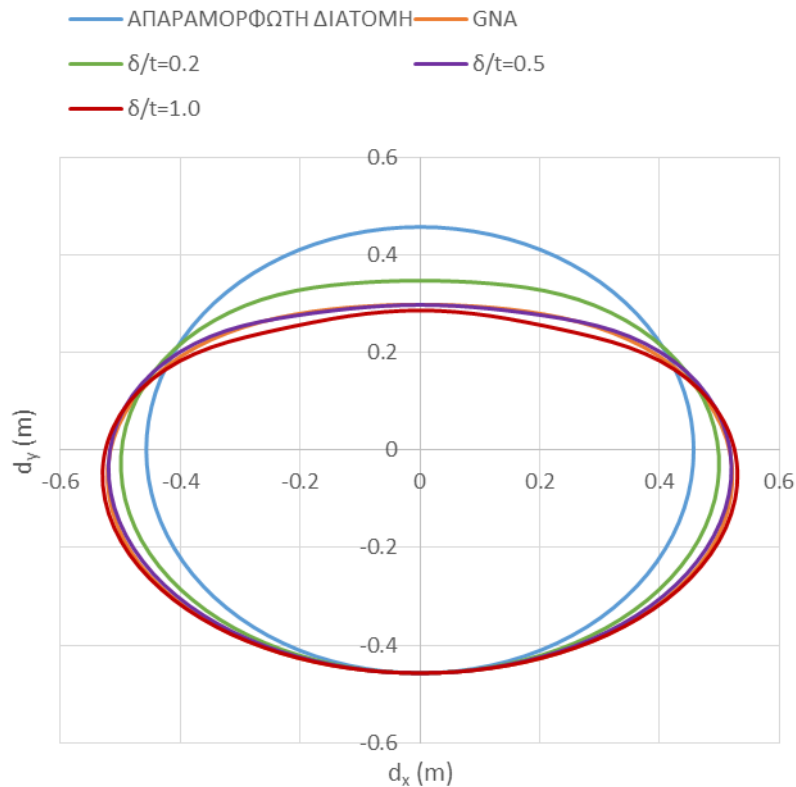
Σχήμα 3-48: Δρόμοι ισορροπίας ροπών κάμψεως - μέγιστων παραμορφώσεων

Οι αναπτυσσόμενες διαμήκεις εφελκυστικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-8.

Πίνακας 3-9: Συγκριτικός πίνακας διαμήκων εφελκυστικών παραμορφώσεων στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας αγωγού κατηγορίας μεταβατικού μήκους

Ανάλυση	ADINA (%)	ASCE-ALA (%)	Ευρωκώδικας (%)
GNA	0.513	2.00	2.00
GNIA ($\delta/t=0.2$)	0.535		
GNIA ($\delta/t=0.5$)	0.584		
GNIA ($\delta/t=1.0$)	0.635		

Από τον Πίνακα 3-8 και τον Πίνακα 3-9 προκύπτει ότι πρώτα επέρχεται τοπικός λυγισμός λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων. Στο Σχήμα 3-49 παρουσιάζεται η οβαλοποιημένη διατομή του αγωγού στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις.



Σχήμα 3-49: Παραμορφωμένες διατομές σημείων διακλάδωσης

Από το Σχήμα 3-49 προκύπτει το μέγεθος της οβαλοποίησης της διατομής του αγωγού στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-10. Η παράμετρος ωσειδούς παραμόρφωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα υπολογίζεται ως εξής:

$$a = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{4} \quad (3.19)$$

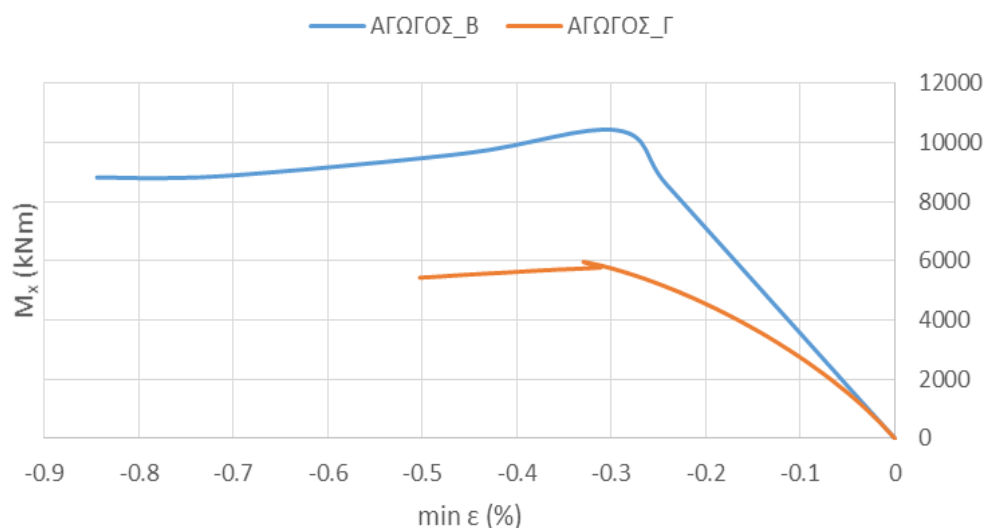
Η τιμή της σχέσης (3.19) δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή:

$$a_{\max} = 0.05D_e \quad (3.20)$$

Πίνακας 3-10: Συγκριτικός πίνακας οβαλοποίησης της διατομής του αγωγού στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

Ανάλυση	Οβαλοποίηση (y/D)		Ευρωκώδικας 3		
	ADINA	Παράμετρος ωσειδούς παραμόρφωσης (2a)	2a _{max}	2a/D	2a _{max} /D
GNA	0.17	0.144	0.091	0.158	0.10
δ/t=0.2	0.12	0.097		0.106	
δ/t=0.5	0.17	0.143		0.156	
δ/t=1.0	0.19	0.158		0.173	

Στο Σχήμα 3-50 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας σε όρους ροών κάμψης – ελάχιστων παραμορφώσεων των αγωγών Β και Γ.



Σχήμα 3-50: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας ροπών κάμψεως - ελάχιστων παραμορφώσεων αγωγών Β και Γ

Οι αναπτυσσόμενες διαμήκειες θλιπτικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-11.

Πίνακας 3-11: Διαμήκειες θλιπτικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας των αγωγών Β και Γ

Αγωγός	Min ϵ_{cr} (%)		
	ADINA	ASCE-ALA	EC3 (%)
Β	0.293	0.157	0.158
Γ	0.330		0.091

3.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν δυο κυλινδρικοί αγωγοί υπό καθαρή ροπή κάμψεως. Στην περίπτωση του βραχέως κυλίνδρου, αυτός αστοχεί σε τοπικό λυγισμό χωρίς να οβαλοποιείται η διατομή του και όπως είναι λογικό για φορτίο μεγαλύτερο από τη M_{Braz} . Όμως για αγωγούς με μεγαλύτερο μήκος, όπου και μειώνεται η επιρροή των συνοριακών συνθηκών, τότε οβαλοποιείται η διατομή του αγωγού (ωσειδής παραμόρφωση) ώσπου αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού με αποτέλεσμα τη αστοχία μέσω σημείου διακλάδωσης και ασταθή μεταλυγισμικό κλάδο. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά περίπου γραμμικός μέχρι την εκδήλωση του τοπικού λυγισμού μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης. Ο τοπικός λυγισμός αναπτύσσεται ακαριαία και ο φορέας μετά το σημείο διακλάδωσης δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό, άρα δε διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 3, είναι:

- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-13, για αγωγούς της κατηγορίας μεσαίου μήκους παρατηρείται ότι το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 13.70% συγκριτικά με κρίσιμο φορτίο λυγισμού.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-14, για αγωγούς μεσαίου μήκους παρατηρείται ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αυξημένο κατά 5% συγκριτικά με τη ροπή M_{cl} , ενώ το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 9.10%.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-21, παρατηρείται ότι τον αγωγό μεταβατικού μήκους το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 49.09% συγκριτικά με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-22 παρατηρείται η πολύ μικρή διαφορά του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και της ροπής M_{cl} για αγωγό μεταβατικού μήκους. Πιο συγκεκριμένα το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι 1.02% μεγαλύτερο από τη ροπή M_{cl} . Επίσης το οριακό φορτίο λυγισμού είναι 47.91% μικρότερο από τη M_{cl} .

- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-23 παρατηρείται ότι το οριακό φορτίο είναι μειωμένο κατά 4.33% από τη ροπή M_{braz} για τον αγωγό μεταβατικού μήκους.
- Σύμφωνα με το λόγο M_{cl}/M_{Braz} παρατηρείται η μεγάλη επιρροή λόγω της οβαλοποίησης του αγωγού.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-30 το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.2$ είναι 20.88% μικρότερο σε σχέση με τη ροπή M_{Braz} και 16.55% μικρότερο από το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για τον αγωγό μεταβατικού μήκους.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-37, το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας με ατέλεια $\delta/t=0.5$ είναι 18.98% μικρότερο σε σχέση με τη ροπή M_{Braz} για τον αγωγό μεταβατικού μήκους.
- Σύμφωνα με το Σχήμα 3-44, το οριακό φορτίο της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για $\delta/t=1.0$ είναι 19.47% μικρότερο σε σχέση με τη ροπή M_{Braz} και 15.14% μικρότερο από το οριακό φορτίο λυγισμού της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για τον αγωγό μεταβατικού μήκους.

3.8 Βιβλιογραφία

- ADINA R & D Inc., Theory and Modeling guide Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, Watertown, USA, 2008
- ALA American Lifelines Alliance, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe – July 2001 (with addenda through February 2005), 2005
- EN 1993-4-3, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 4-3 Pipelines. CEN, Brussels, 2007
- Gantes, C.J. and Gerogianni, D.S., "Infinitely Long Buried Pipelines under Bending and Internal Pressure", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS, Vol. 43, No. 2, pp. 101-114, 2002
- Houliara, S. and Karamanos, S.A., "Buckling and post-buckling of long pressurized elastic thin-walled tubes under in-plane bending", International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, pp. 491-511, 2006
- Karamanos, S.A., "Bending Instabilities of Elastic Tubes", International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, pp. 2059-2085, 2002
- Rotter, J.M., Sadowski, A.J. and Chen, L., "Nonlinear Stability of Thin Elastic Cylinders of Different Length Under Global Bending", International Journal of Solid and Structures, Vol. 51, pp. 2826-2839, 2014

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΔΑΦΟΣ

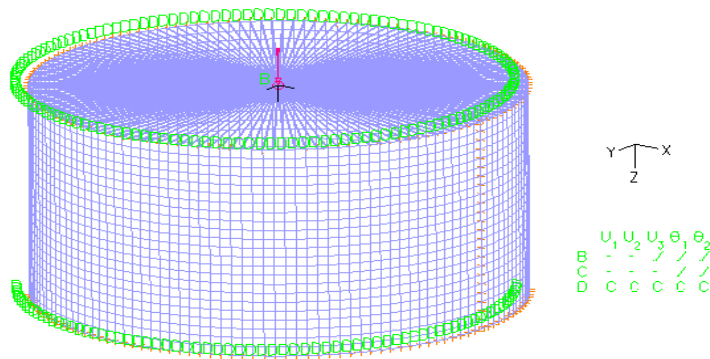
4.1 Γενικά

Οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων συνήθως θάβονται στο έδαφος λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η ταφή τους γίνεται για την προστασία τους έναντι διάβρωσης, τυχρηματικών δράσεων και την εξισορρόπηση της εσωτερικής πίεσης. Εξαιτίας του μεγάλου μήκους τους οι αγωγοί καλούνται να ακολουθήσουν τις εδαφικές μετακινήσεις σε περίπτωση κατολίσθησης ή ενεργοποίησης σεισμικού ρήγματος. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των κυλινδρικών αγωγών που αναλύθηκαν στα κεφαλαία 2 και 3 υπό την επιρροή περιβάλλοντος ελαστικού μέσου που προσομοιώνει το έδαφος.

4.2 Κύλινδρος υπό αξονική φόρτιση

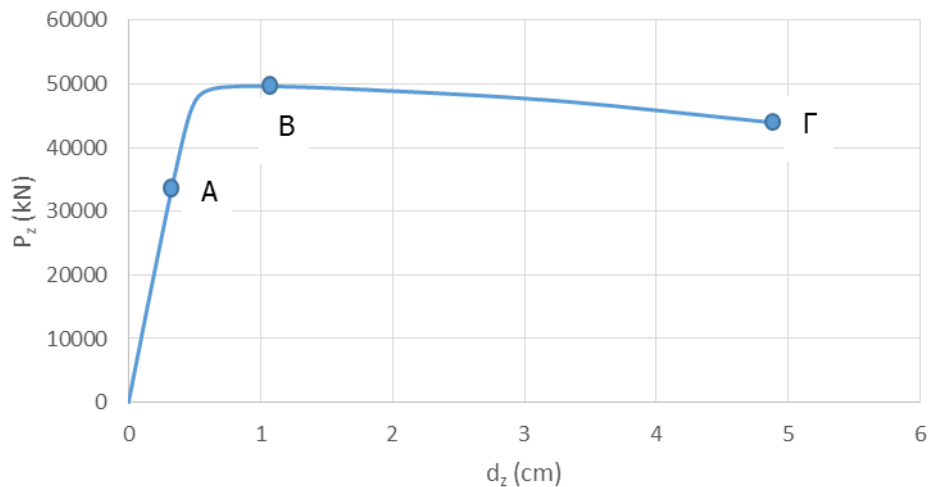
4.2.1 Σκέτος κύλινδρος

Στην παρούσα ενότητα αναλύθηκε ο αγωγός Β του κεφαλαίου 2 με αραιότερο όμως πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για λόγους υπολογιστικού κόστους. Το προσομοίωμα του αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-1. Οι συνοριακές συνθήκες αμφιέριστης δοκού έχουν εφαρμοστεί σε σημεία που συνδέονται με τις ακραίες διατομές του κυλίνδρου μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links).



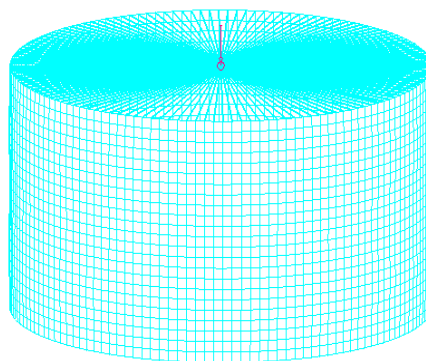
Σχήμα 4-1: Σκέτος κύλινδρος

Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο (P_z) και στον οριζόντιο κατακόρυφη μετακίνηση του φορέα (d_z).

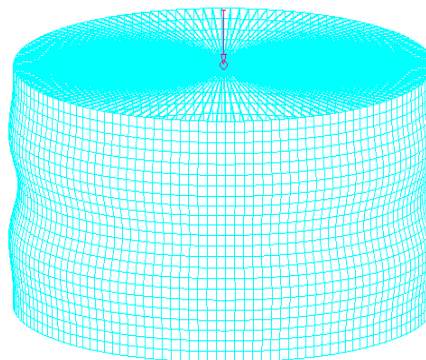


Σχήμα 4-2: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

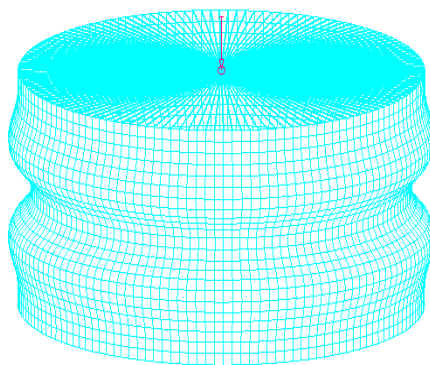
Από το Σχήμα 4-2 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $P_u=49635.50\text{kN}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός και ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο αφού το κρίσιμο φορτίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα ο φορέας να μη διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-3, Σχήμα 4-4 και το Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-3: Παραμορφωμένη εικόνα στο σημείο A



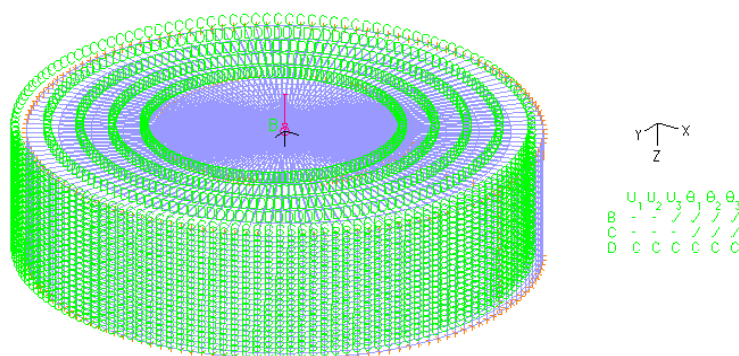
Σχήμα 4-4: Παραμορφωμένη εικόνα στο σημείο B



Σχήμα 4-5: Παραμορφωμένη εικόνα στο σημείο Γ

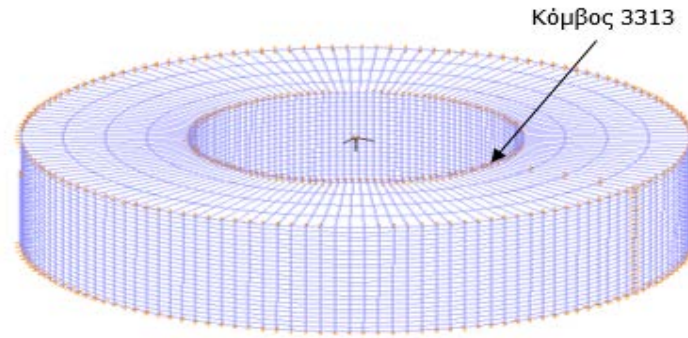
4.2.2 Κύλινδρος με έδαφος

Στο κυλινδρικό μοντέλο υπό αξονική φόρτιση προσομοιώθηκε και το περιβάλλον έδαφος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-6.

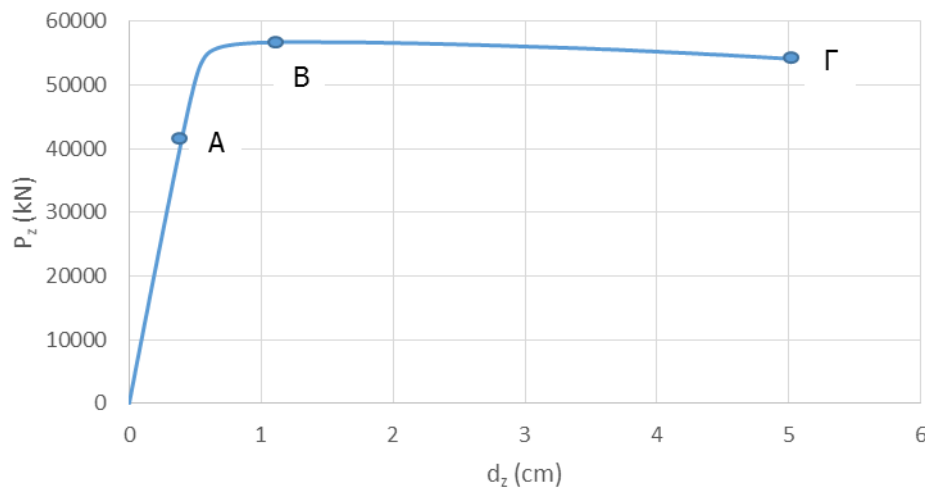


Σχήμα 4-6: Μοντέλο με έδαφος υπό θλίψη

Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία. Θεωρήθηκε αμμώδες έδαφος με μέτρο ελαστικότητας $E_{\text{εδαφ}} = 15000 \text{ kPa}$. Το πάχος του εδάφους ισούται με τη μισή διάμετρο του κυλίνδρου, ήτοι 0.457 m και επιλέχθηκε να είναι κυκλικό ως μια πρώτη προσέγγιση του πραγματικού προβλήματος. Τα στοιχεία του εδάφους συνδέονται με τα στοιχεία του κυλίνδρου με κοινούς κόμβους. Το είδος της προσομοίωσης αυτής τροποποιεί ελαφρώς το φυσικό πρόβλημα στο γεγονός ότι δεν αναπτύσσεται τριβή στην διεπιφάνεια κυλίνδρου – έδαφος με αποτέλεσμα την κοινή μετατόπιση των κόμβων στις θέσεις όπου ενώνονται τα επιφανειακά με τα τρισδιάστατα χωρικά στοιχεία. Στην εξωτερική επιφάνεια του εδάφους όπως και στη βάση του έχουν δεσμευτεί όλοι οι μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας ενώ στην διατομή που ασκείται το φορτίο είναι ελεύθερος ο μετακινησιακός βαθμός ελευθερίας που αντιστοιχεί στη διαμήκη μετακίνηση του φορέα καθώς και όλοι οι στρωφικοί βαθμοί ελευθερίας. Ο δρόμος ισορροπίας απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 4-8, όπου στον κατακόρυφο άξονα του σχήματος παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο ενώ στον οριζόντιο η διαμήκης μετακίνηση του κόμβου 3313 του κυλίνδρου, ο οποίος αναπτύσσει τη μεγαλύτερη διαμήκη μετακίνηση στο τέλος της ανάλυσης και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-7.

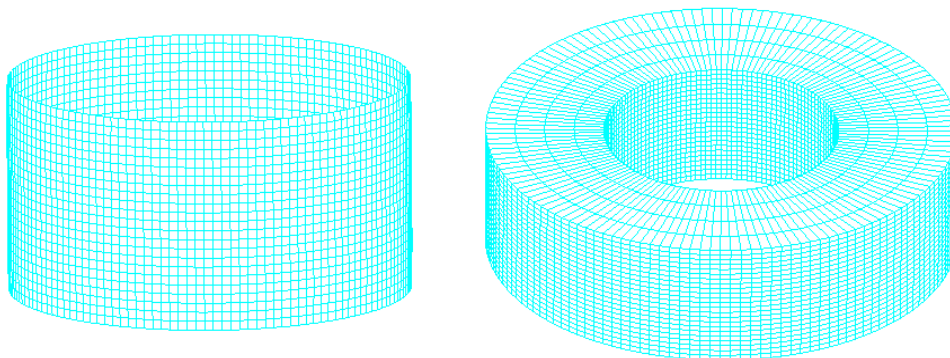


Σχήμα 4-7: Θέση κόμβου 3313 με τη μεγαλύτερη διαμήκη μετατόπιση

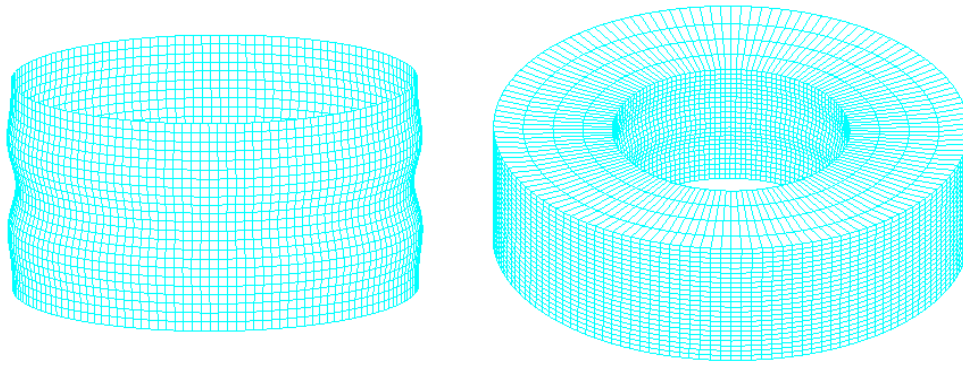


Σχήμα 4-8: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και $E_{εδαφ.} = 15000 \text{ kPa}$

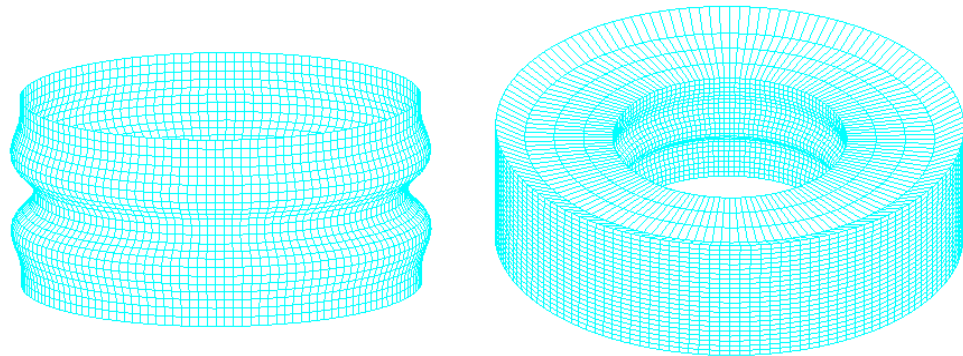
Από το Σχήμα 4-8 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $P_u = 56751.90 \text{ kN}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι μη γραμμικός και ασταθής λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο αφού το κρίσιμο φορτίο μειώνεται όσο αυξάνονται οι μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα ο φορέας να μη διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-9, Σχήμα 4-10 και το Σχήμα 4-11 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-9: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα για $E_{εδαφ.} = 15000 \text{ kPa}$ στο σημείο A

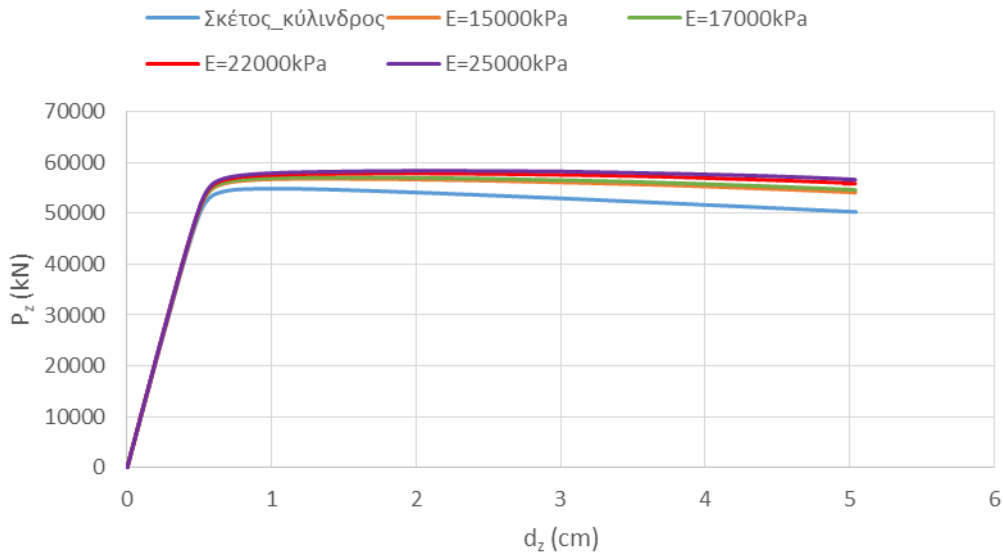


Σχήμα 4-10: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα για $E_{\text{εδaf}} = 15000\text{kPa}$ στο σημείο Β



Σχήμα 4-11: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα για $E_{\text{εδaf}} = 15000\text{kPa}$ στο σημείο Γ

Για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους οι δρόμοι ισορροπίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-12.



Σχήμα 4-12: Δρόμοι ισορροπίας για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας εδάφους

Από το Σχήμα 4-12 προκύπτουν τα κρίσιμα φορτία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Κρίσιμα φορτία για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας εδάφους

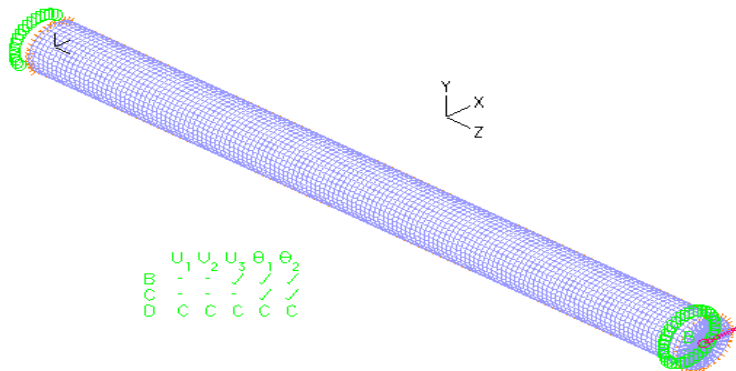
Φορέας	P_u (kN)
Σκέτος κύλινδρος	54796.7
$E_{\text{εδαφ}} = 15000 \text{ kPa}$	56751.9
$E_{\text{εδαφ}} = 17000 \text{ kPa}$	57043.4
$E_{\text{εδαφ}} = 22000 \text{ kPa}$	57831.1
$E_{\text{εδαφ}} = 25000 \text{ kPa}$	58832.2

Από το Σχήμα 4-12 προκύπτει ότι για αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους οι δρόμοι ισορροπίας είναι μη γραμμικοί και ασταθείς λόγω του καθοδικού κλάδου μετά το οριακό σημείο όπως και στην περίπτωση του σκέτου κυλίνδρου. Από τον Πίνακα 4-1 προκύπτει η επιρροή του περιβάλλοντος εδάφους στο οριακό φορτίο, όπου με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας αυξάνεται και το οριακό φορτίο καθώς το περιβάλλον ελαστικό μέσο εμποδίζει την ανάπτυξη του τοπικού λυγισμού.

4.3 Κύλινδρος υπό ροπή κάμψεως

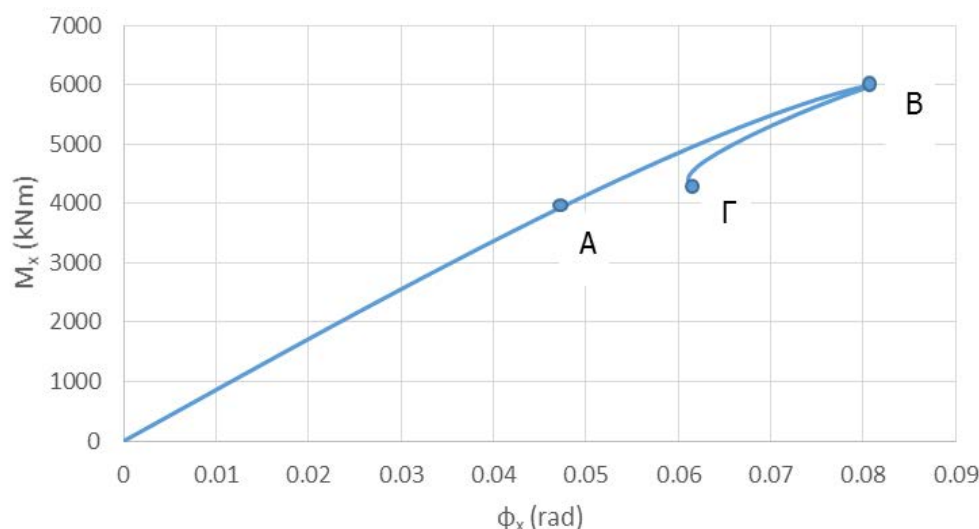
4.3.1 Σκέτος κύλινδρος

Στην παρούσα ενότητα αναλύθηκε ο αγωγός Γ του κεφαλαίου 3 με αραιότερο όμως πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Η μείωση αυτή πραγματοποιήθηκε για λόγους υπολογιστικού κόστους αφού θα προστεθούν τα στοιχεία του εδάφους. Το προσομοίωμα του αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-13. Οι συνοριακές συνθήκες αμφιέριστης δοκού έχουν εφαρμοστεί σε σημεία που συνδέονται με τις ακραίες διατομές του κυλίνδρου μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links). Επίσης έχει δεσμευτεί ο στρωφικός βαθμός ελευθερίας.



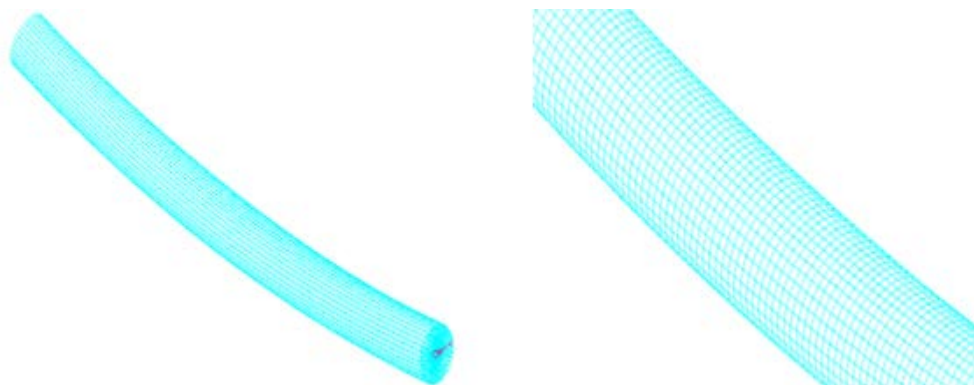
Σχήμα 4-13: Προσομοίωμα αγωγού υπό ροπή κάμψεως

Στο Σχήμα 4-14 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας όπου στον κατακόρυφο άξονα περιγράφεται το ασκούμενο φορτίο (M_x) και στον οριζόντιο η στρόφιξη του φορέα περί τον άξονα x (φ_x).

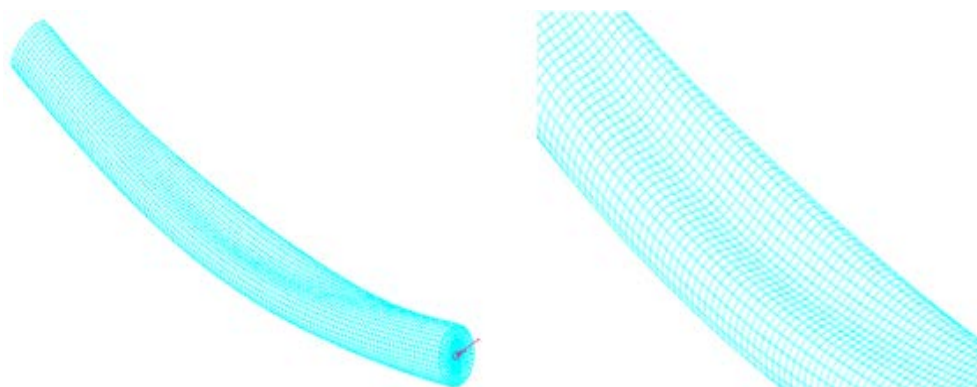


Σχήμα 4-14: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

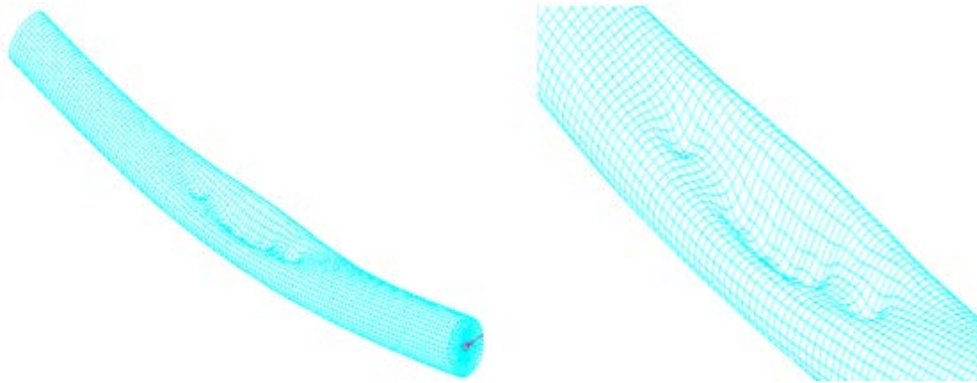
Από το Σχήμα 4-14 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι ίσο με $M_u=5989.78\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικός έως το σημείο διακλάδωσης B, όπου εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Το φορτίο το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο B αποτελεί το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο φορέας. Λόγω του τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού που εκδηλώνεται στο σημείο B μειώνεται δραστικά το φορτίο το οποίο μπορεί να παραληφθεί από το φορέα και για το λόγο αυτό παρουσιάζεται η αιχμή του δρόμου ισορροπίας, χωρίς να διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-15, Σχήμα 4-16 και το Σχήμα 4-17 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-15: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας στο σημείο A

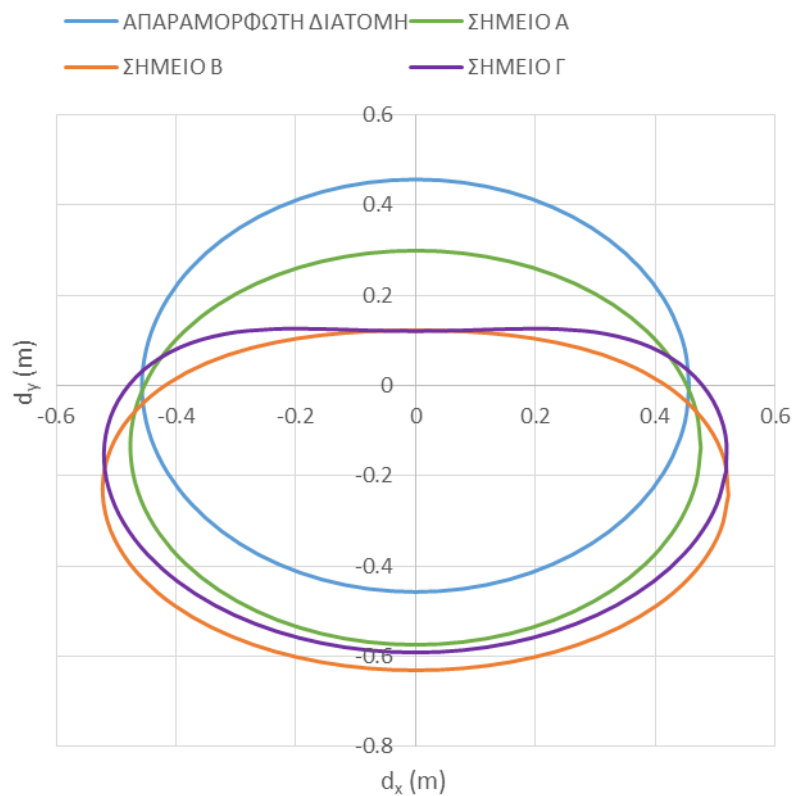


Σχήμα 4-16: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας στο σημείο B

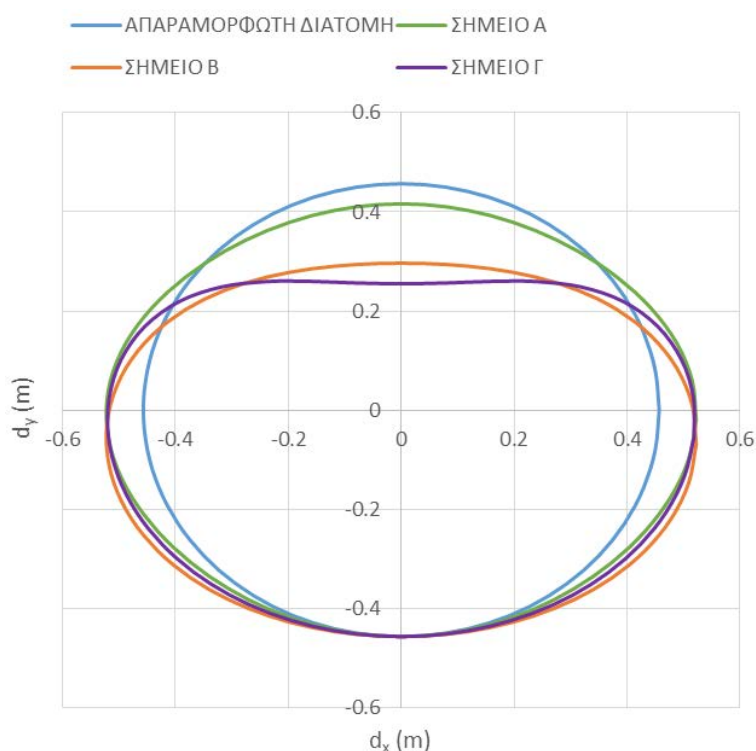


Σχήμα 4-17: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας στο σημείο Γ

Η παραμορφωμένη εικόνα της διατομής του φορέα η οποία υφίσταται οβαλοποίηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-18 και το Σχήμα 4-19. Στο Σχήμα 4-18 παρουσιάζεται η παραμόρφωση της διατομής του κυλίνδρου με ταυτόχρονη μετατόπιση του κατά τον άξονα y λόγω της κάμψης του κυλίνδρου. Για εποπτικούς λόγους στο Σχήμα 4-19 παρουσιάζεται μόνο η οβαλοποίηση της διατομής.



Σχήμα 4-18: Παραμορφωμένη εικόνα διατομής αγωγού μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας



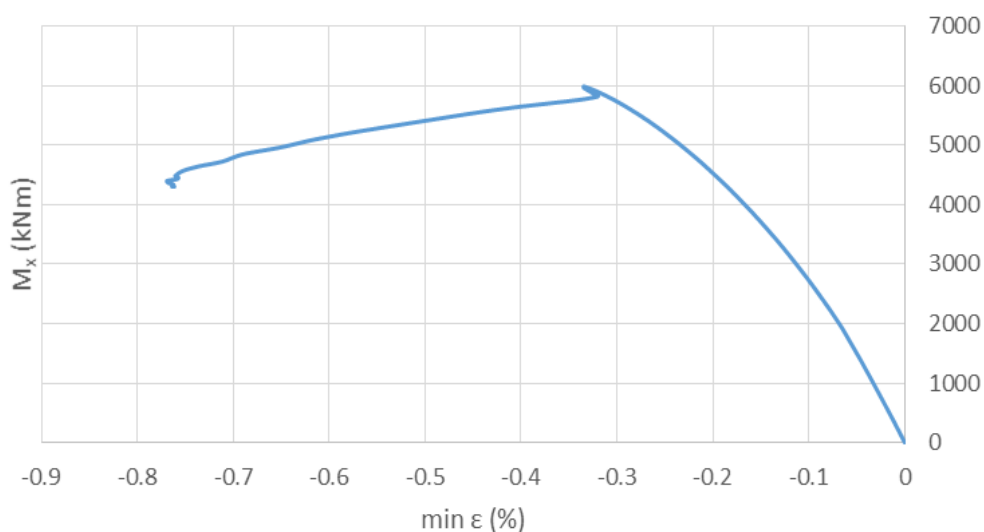
Σχήμα 4-19: Παραμορφωμένη εικόνα διατομή αγωγού μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζεται το μέγεθος της οβαλοποίησης (y/D) όπως προέκυψε στα σημεία Α, Β και Γ του δρόμου ισορροπίας, όπου y είναι η μετατόπιση της ακραίας ίνας της διατομής και D η διάμετρος.

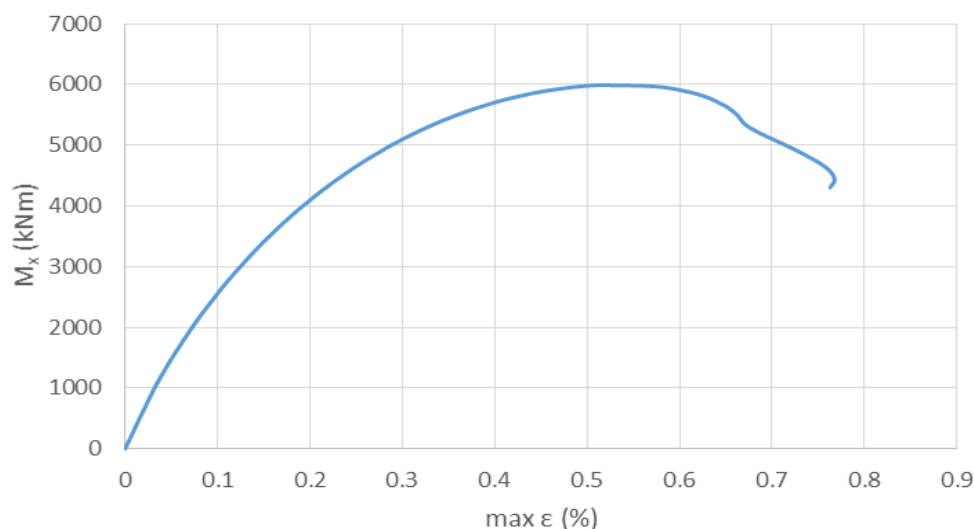
Πίνακας 4-2: Οβαλοποίηση διατομής αγωγού μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

Σημείο	Οβαλοποίηση (y/D)
Α	0.044
Β	0.175
Γ	0.221

Ο δρόμος ισορροπίας του φορέα σε όρους ροπών κάμψεως – ελάχιστων παραμορφώσεων και ροπών κάμψεως – μέγιστων παραμορφώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-20 και το Σχήμα 4-21 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-20: Δρόμος ισορροπίας ροπών κάμψεως - ελάχιστων παραμορφώσεων



Σχήμα 4-21: Δρόμος ισορροπίας ροών κάμψεως - μεγίστων παραμορφώσεων

Στον Πίνακα 4-3 παρουσιάζεται η ελάχιστη παραμόρφωση του φορέα στο σημείο διακλάδωσης του δρόμου ισορροπίας και η μέγιστη παραμόρφωση του φορέα στο οριακό σημείο του δρόμου ισορροπίας.

Πίνακας 4-3: Μέγιστες παραμορφώσεις φορέα

Παραμόρφωση	ADINA (%)	ASCE-ALA (%)	Ευρωκώδικας (%)
min ϵ_{cr}	0.335	0.157	0.172
max ϵ_{cr}	0.513	2.00	2.00

Από τον Πίνακα 4-3 προκύπτει ότι πρώτα επέρχεται τοπικός λυγισμός λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων.

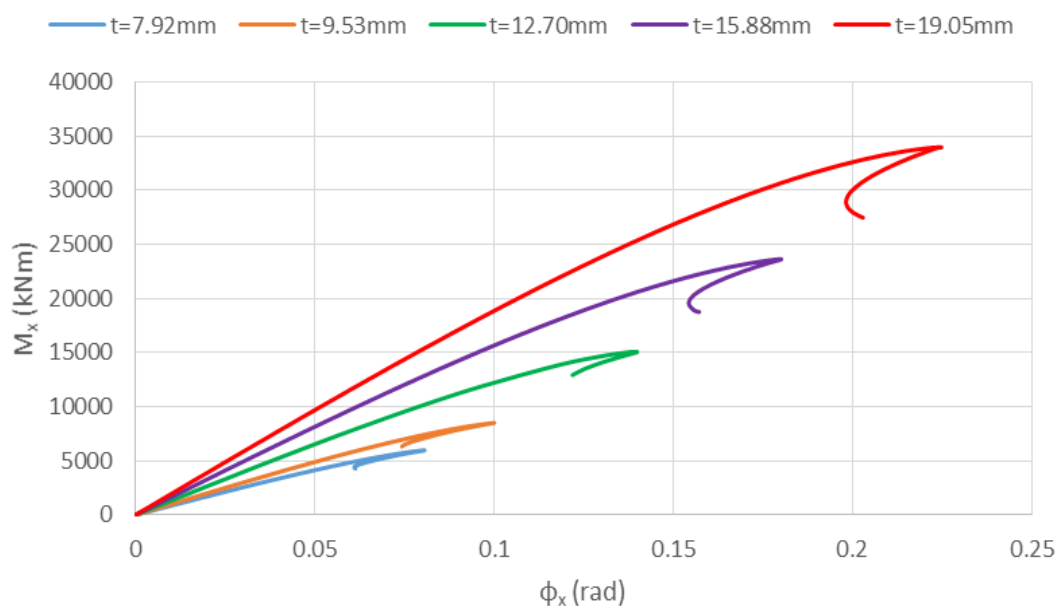
4.3.1.1 Παραμετρική ανάλυση πάχους κυλίνδρου

Στην παρούσα ενότητα υλοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση βάσει του πάχους του αγωγού. Οι αγωγοί που αναλύθηκαν χρησιμοποιούνται στο εμπόριο, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4, ενώ το μήκος τους είναι $L=11.425m$.

Πίνακας 4-4: Στοιχεία αγωγών εμπορίου

$D_{εξ}$ (mm)	t (mm)	r/t
914	7.92	57.70
	9.53	47.45
	12.70	35.48
	15.88	28.29
	19.05	23.49

Σύμφωνα με τις κατηγορίες των αγωγών που προτείνουν οι Rotter et al. (2014) παρατηρείται ότι μόνο ο αγωγός με πάχος $t=7.92mm$ εμπίπτει στο πεδίο ισχύος των κατηγοριών αυτών. Τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας των αγωγών σε όρους δρόμων ισορροπίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-22.

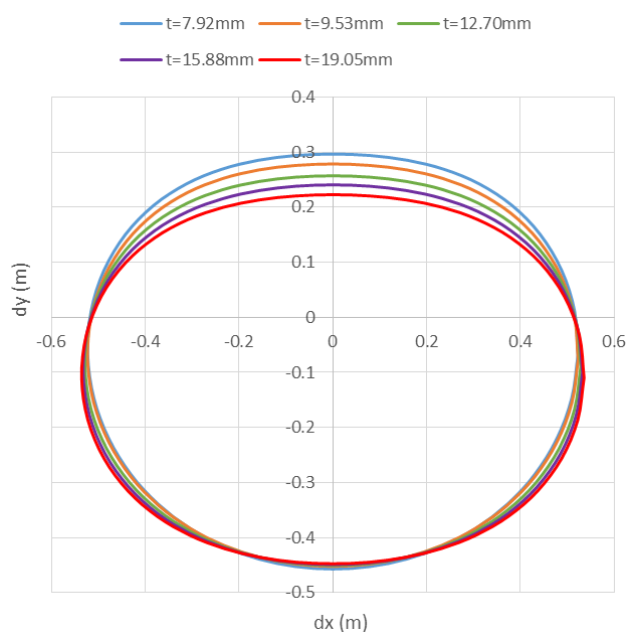


Σχήμα 4-22: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικών αναλύσεων για διάφορες τιμές του πάχους τοιχώματος. Από το Σχήμα 4-22 προκύπτει ότι για αλλαγή του πάχους του τοιχώματος του κυλίνδρου οι δρόμοι ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικοί έως το σημείο διακλάδωσης, όπου εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Από τον Πίνακα 4-5 προκύπτει η επιρροή του πάχους του τοιχώματος του κυλίνδρου στο οριακό φορτίο, καθώς με την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του κυλίνδρου αυξάνεται και το οριακό φορτίο.

Πίνακας 4-5: Οριακά φορτία δρόμων ισορροπίας

t (mm)	M_u (kNm)
7.92	5989.79
9.53	8512.98
12.70	15071.50
15.88	23648.30
19.05	33981.30

Στο Σχήμα 4-23 παρουσιάζεται η οβαλοποίηση των αγωγών στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας.



Σχήμα 4-23: Οβαλοποίηση διατομής για διάφορες τιμές του πάχους τοιχώματος

Το μέγεθος της οβαλοποίησης στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6: Οβαλοποίηση διατομών για διάφορες τιμές του πάχους τοιχώματος

t (mm)	y/D (adina)	EC 3	
		a	a _{max}
7.92	0.175	0.00396	0.045
9.53	0.192	0.00476	0.045
12.70	0.215	0.00635	0.045
15.88	0.232	0.00794	0.045
19.05	0.251	0.00952	0.045

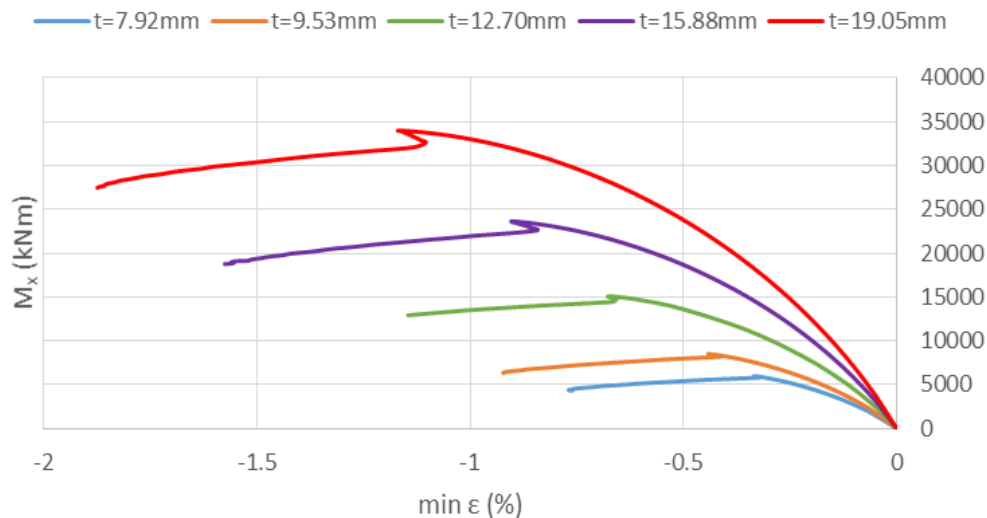
Οι τιμές της οβαλοποίησης του Πίνακα 4-6 έχουν προκύψει από τις σχέσεις του Ευρωκώδικα 3 και του ASCE-ALA, όπως παρουσιάζονται στις σχέσεις (4.1) και (4.2) αντίστοιχα.

$$a = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{4} \quad (4.1)$$

όπου D_{\max} είναι η εξωτερική διάμετρος και D_{\min} είναι η εσωτερική διάμετρος του αγωγού.

$$\frac{\Delta_y}{D} = \frac{D_1 K_P}{\left(\frac{EI}{R^3}\right)_{\text{eq}} + 0.061 E'} \quad (4.2)$$

Οι δρόμοι ισορροπίας των αγωγών σε όρους ροών κάμψεως – ελάχιστων παραμορφώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-24.



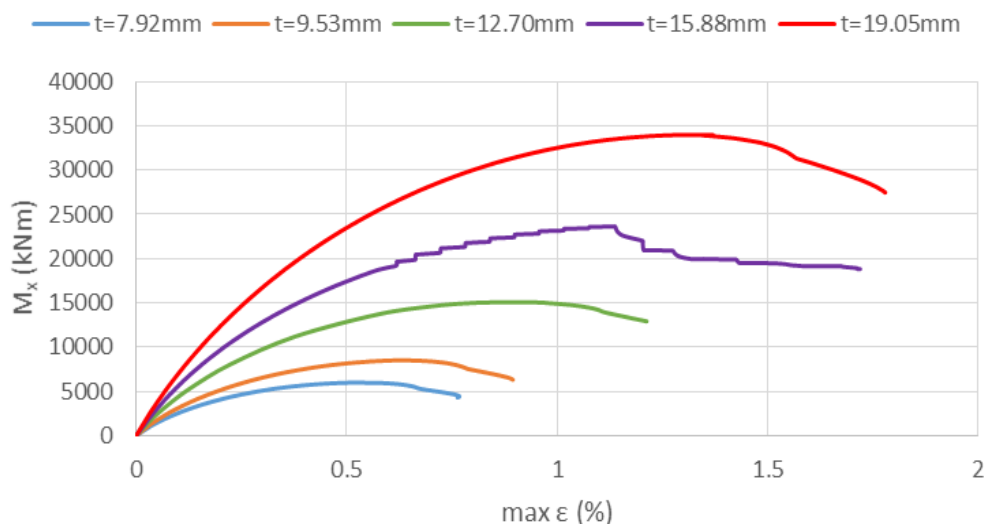
Σχήμα 4-24: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για διάφορες τιμές του πάχους τοιχώματος

Οι ελάχιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης (Σχήμα 4-24) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-7: Ελάχιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας για διάφορες τιμές του πάχους τοιχώματος

t (mm)	min ε (%)		
	ADINA	ASCE-ALA	EC3
7.92	0.335	0.157	0.090
9.53	0.442	0.239	0.101
12.70	0.676	0.389	0.119
15.88	0.902	0.528	0.134
19.05	1.157	0.662	0.142

Οι δρόμοι ισορροπίας των αγωγών σε όρους ροπών κάμψεως – μέγιστων παραμορφώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-25.



Σχήμα 4-25: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας ροπών κάμψεως - μέγιστων παραμορφώσεων

Οι μέγιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας (Σχήμα 4-25) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-8.

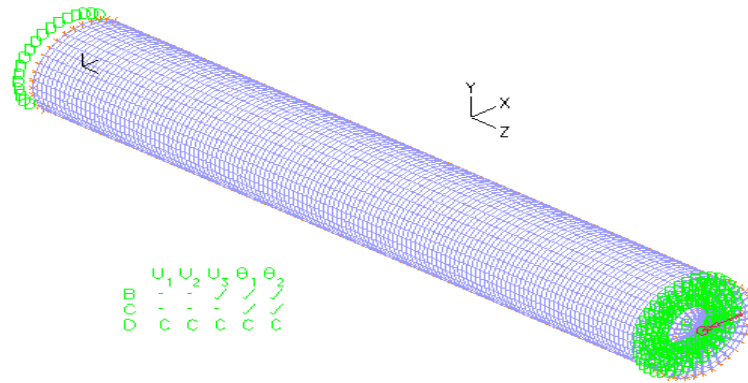
Πίνακας 4-8: Μέγιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας για διάφορες τιμές του πάχους τοιχώματος

t (mm)	max ε (%)		
	ADINA	ASCE-ALA (%)	EC 3 (%)
7.92	0.513	2.00	2.00
9.53	0.652		
12.70	0.933		
15.88	1.137		
19.05	1.324		

4.3.2 Κύλινδρος με έδαφος

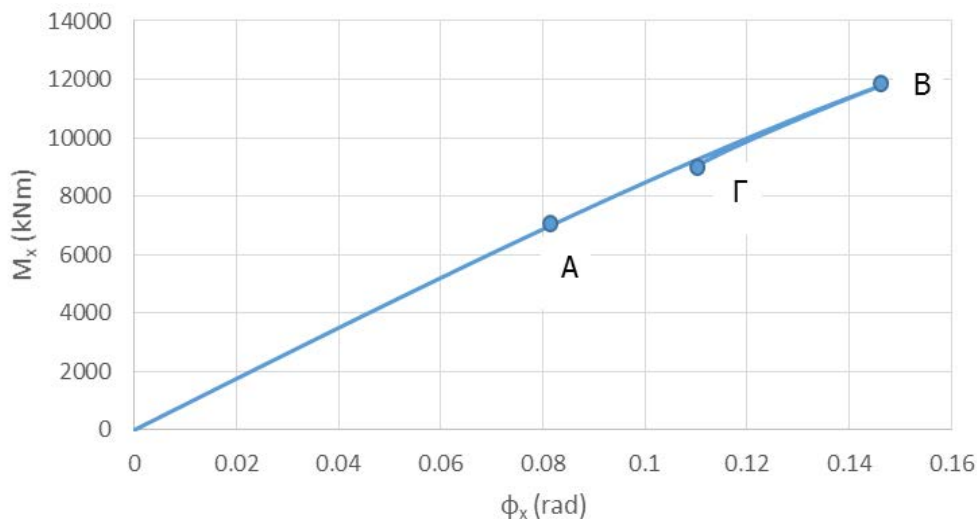
4.3.2.1 Παραμετρική ανάλυση μέτρου ελαστικότητας εδάφους

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της ενότητας 4.3.2 στο οποίο προσομοιώθηκε και το έδαφος. Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, το οποίο έχει πάχος ίσο με τη μισή διάμετρο του αγωγού, ήτοι 0.457m και επιλέχθηκε να είναι κυκλικό ως μια πρώτη προσέγγιση του πραγματικού προβλήματος. Θεωρήθηκε αμμώδες έδαφος με μέτρο ελαστικότητας $E_{\text{εδάφ}}=15000\text{kPa}$. Το μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-26 όπου οι συνοριακές συνθήκες αμφίεριστης δοκού έχουν εφαρμοστεί σε σημεία που συνδέονται με τις ακραίες διατομές του κυλίνδρου μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links). Επίσης έχει δεσμευτεί ο στρωφικός βαθμός ελευθερίας.



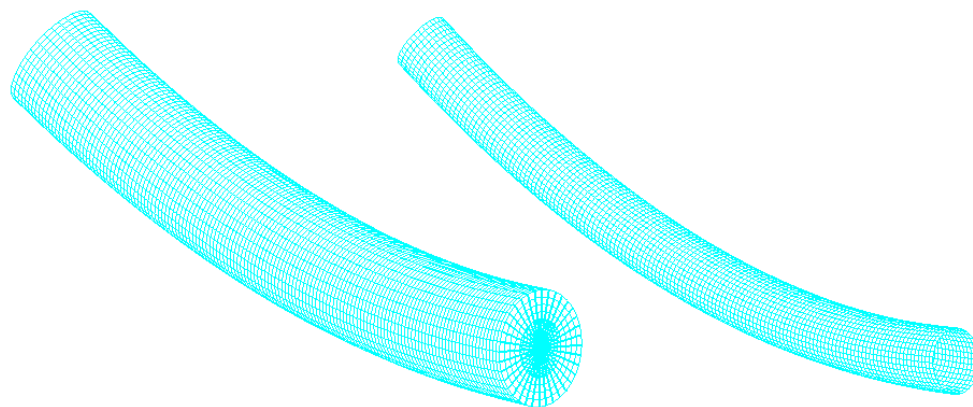
Σχήμα 4-26: Αγωγός με έδαφος υπό ροπή κάμψεως

Τα στοιχεία του εδάφους συνδέονται με τα στοιχεία του κυλίνδρου με κοινούς κόμβους. Το είδος της προσομοίωσης αυτής επηρεάζει το φυσικό πρόβλημα στο γεγονός ότι δεν αναπτύσσεται τριβή στην διεπιφάνεια κυλίνδρου – εδάφους με αποτέλεσμα την κοινή μετατόπιση των κόμβων στις θέσεις όπου ενώνονται τα επιφανειακά με τα τρισδιάστατα χωρικά στοιχεία. Στην εξωτερική επιφάνεια του εδάφους όπως και στη βάση του έχουν δεσμευτεί όλοι οι μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας ενώ στην διατομή που ασκείται το φορτίο είναι ελεύθερος ο μετακινησιακός βαθμός ελευθερίας που αντιστοιχεί στη διαμήκη μετακίνηση του φορέα καθώς και όλοι οι στρωφικοί βαθμοί ελευθερίας. Ο δρόμος ισορροπίας απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 4-27 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας του αγωγού και εδάφους όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το ασκούμενο φορτίο (M_x) ενώ στον οριζόντιο η στρόφη του φορέα περί τον άξονα x (ϕ_x). Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους είναι $E_{\text{εδάφ}}=15000\text{kPa}$.

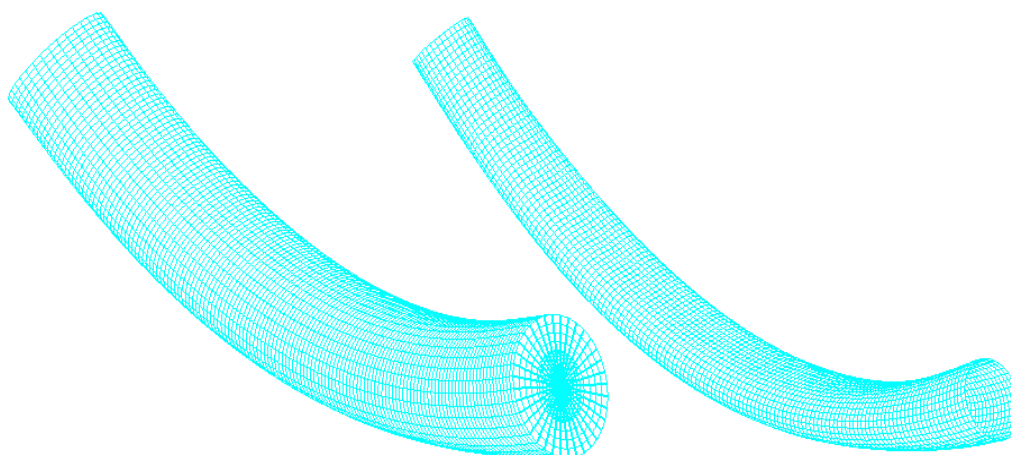


Σχήμα 4-27: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας

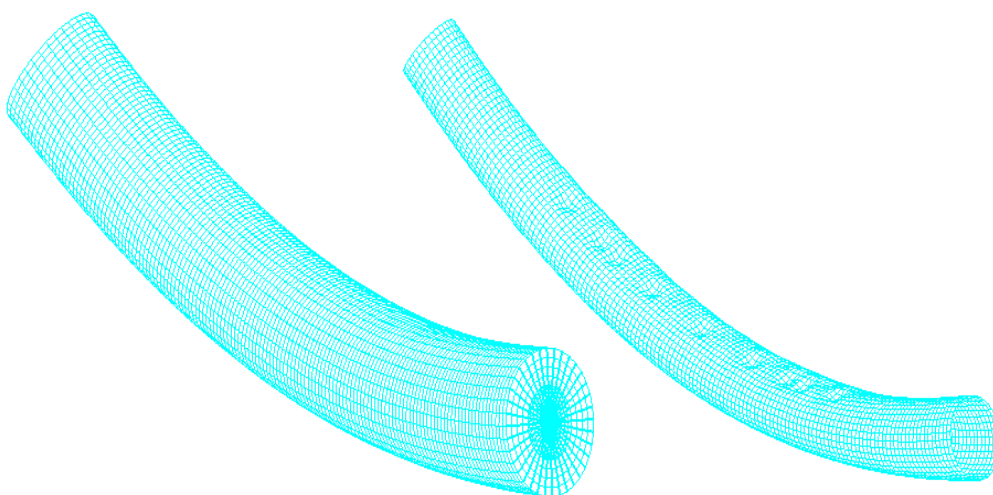
Από το Σχήμα 4-27 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο ισούται με $M_u=11805.00\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικός όπως περιγράφεται από το ενδεικτικό σημείο A, έως το σημείο διακλάδωσης (σημείο B), όπου εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Το φορτίο το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο B αποτελεί το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο φορέας. Λόγω του τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού που εκδηλώνεται στο σημείο B μειώνεται δραστικά το φορτίο το οποίο μπορεί να παραληφθεί από το φορέα και για το λόγο αυτό παρουσιάζεται η αιχμή του δρόμου ισορροπίας, χωρίς να διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία A, B και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-28, Σχήμα 4-29 και Σχήμα 4-30 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-28: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα στο σημείο Α

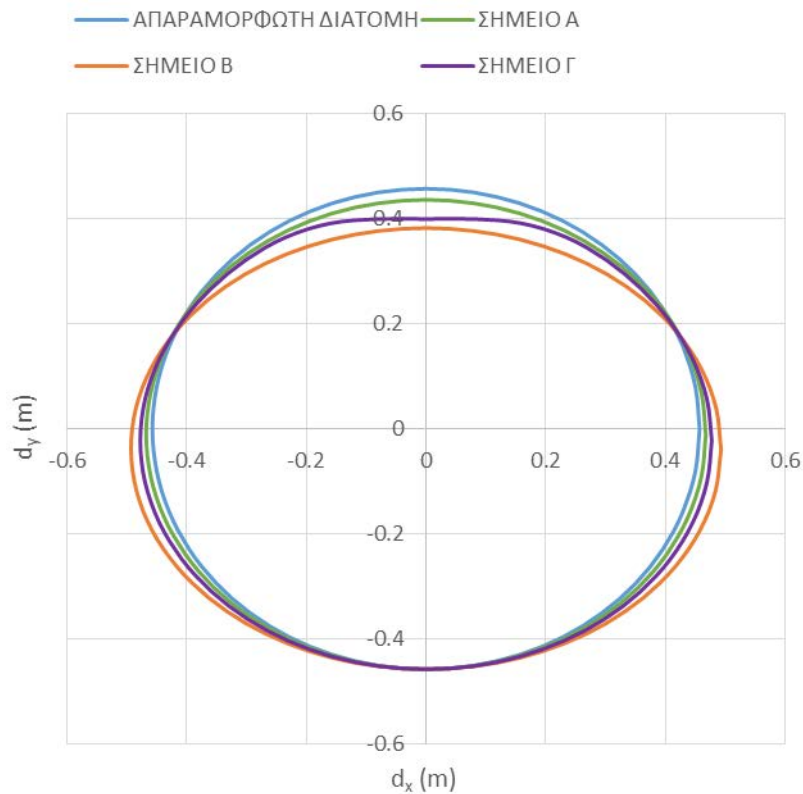


Σχήμα 4-29: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα στο σημείο Β



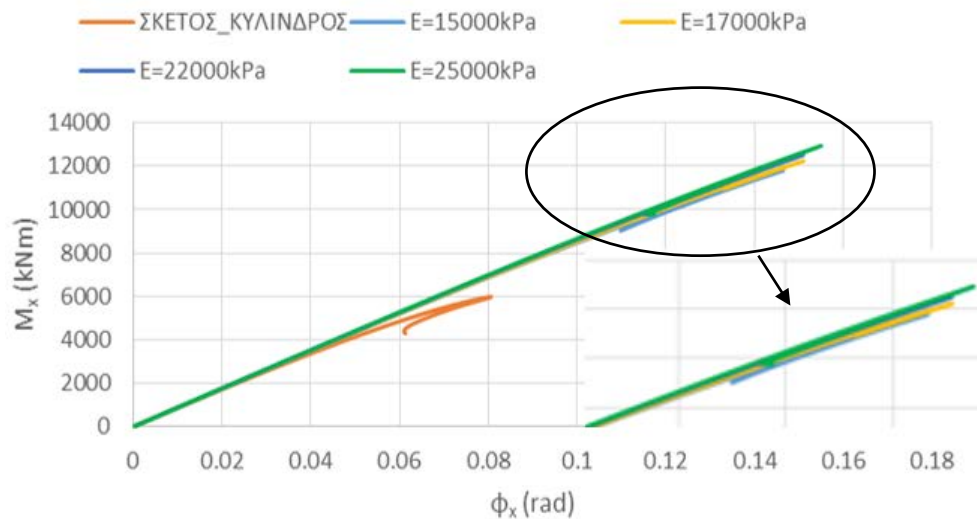
Σχήμα 4-30: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα στο σημείο Γ

Η παραμορφωμένη διατομή του αγωγού η οποία υφίσταται οβαλοποίηση στα σημεία Α, Β και Γ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-31.



Σχήμα 4-31: Παραμορφωμένη διατομή του αγωγού στα σημεία Α, Β και Γ

Στο Σχήμα 4-32 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του σκέτου κυλίνδρου αλλά και του μοντέλου με έδαφος της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους και πάχους αγωγού $t=7.92\text{mm}$.



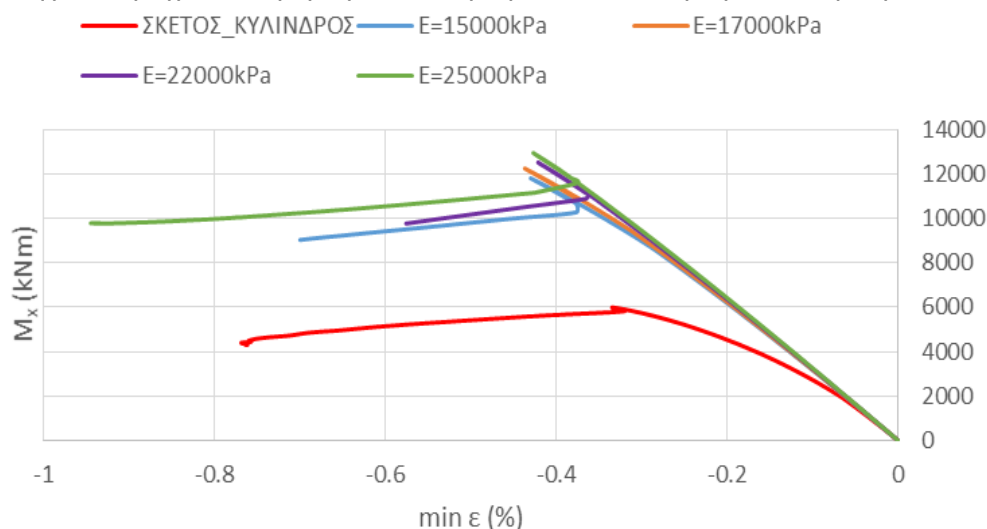
Σχήμα 4-32: Δρόμοι ισορροπίας για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας εδάφους

Από το Σχήμα 4-32 προκύπτει ότι για μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας εδάφους οι δρόμοι ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικοί έως το σημείο διακλάδωσης, όπου εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Από τον Πίνακα 4-9 προκύπτει η επιρροή του περιβάλλοντος εδάφους στο οριακό φορτίο, όπου με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας αυξάνεται και το οριακό φορτίο.

Πίνακας 4-9: Οριακά φορτία κυλίνδρου υπό ροπή κάμψεως παραμετρικής ανάλυσης βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους

Ε _{εδαφ} (kPa)	M _υ (kNm)
Σκέτος κύλινδρος	5989.78
15000	11805.00
17000	12243.40
22000	12517.50
25000	12942.80

Στο Σχήμα 4-33 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψεως – ελάχιστων παραμορφώσεων του σκέτου κυλίνδρου αλλά και του μοντέλου με έδαφος της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.



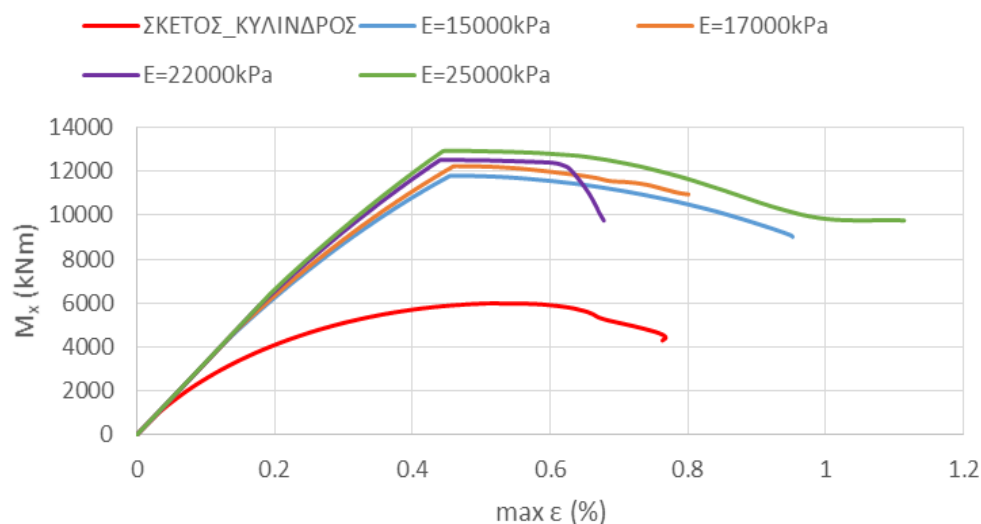
Σχήμα 4-33: Δρόμοι ισορροπίας ροπών κάμψεως - ελάχιστων παραμορφώσεων για διάφορες τιμές του μέτρου ελαστικότητας εδάφους

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-33, στον Πίνακα 4-10 παρουσιάζονται οι διαμήκεις θλιπτικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας.

Πίνακας 4-10: Ελάχιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

Μοντέλο	min ε (%)
Σκέτος κύλινδρος	0.335
E _{εδαφ} = 15000kPa	0.430
E _{εδαφ} = 17000kPa	0.437
E _{εδαφ} = 22000kPa	0.421
E _{εδαφ} = 25000kPa	0.427
ASCE-ALA	0.157
Ευρωκώδικας	0.172

Στο Σχήμα 4-34 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψεως – μέγιστων παραμορφώσεων του σκέτου κυλίνδρου αλλά και του μοντέλου με έδαφος της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.



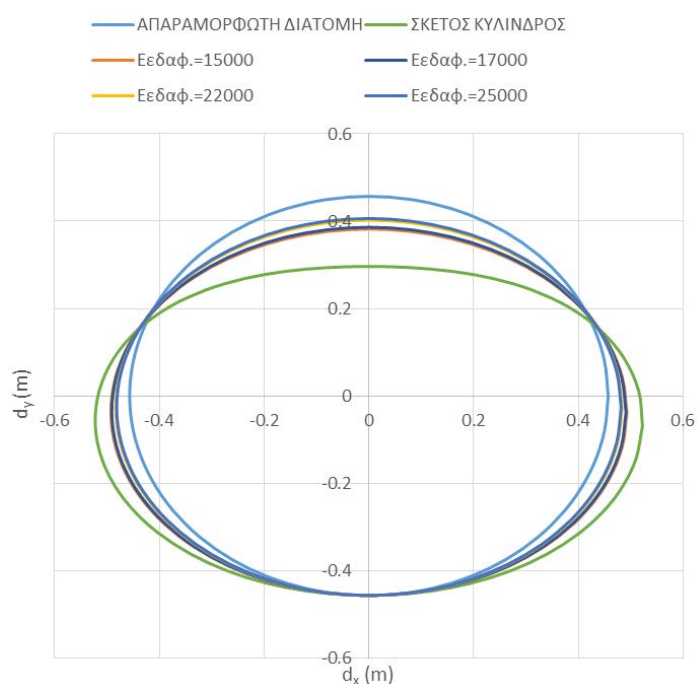
Σχήμα 4-34: Δρόμοι ισορροπίας ροπών κάμψης - μέγιστων παραμορφώσεων για μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας εδάφους

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-34, στον Πίνακα 4-11 παρουσιάζονται οι διαμήκεις εφελκυστικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας.

Πίνακας 4-11: Μέγιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

Μοντέλο	max ε (%)
Σκέτος κύλινδρος	0.513
$E_{\text{δαφ}} = 15000 \text{ kPa}$	0.455
$E_{\text{δαφ}} = 17000 \text{ kPa}$	0.463
$E_{\text{δαφ}} = 22000 \text{ kPa}$	0.448
$E_{\text{δαφ}} = 25000 \text{ kPa}$	0.448
ASCE-ALA	2.00
Ευρωκώδικας	2.00

Οι παραμορφωμένες εικόνες της διατομής του φορέα με το έδαφος η οποία υφίσταται οβαλοποίηση της παραμετρικής ανάλυσης βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-35.



Σχήμα 4-35: Παραμορφωμένη διατομή αγωγού στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-35 στον Πίνακα 4-12 παρουσιάζεται η επιρροή της οβαλοποίησης του αγωγού στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας για τον σκέτο κύλινδρο και για μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.

Πίνακας 4-12: Οβαλοποίηση αγωγού στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

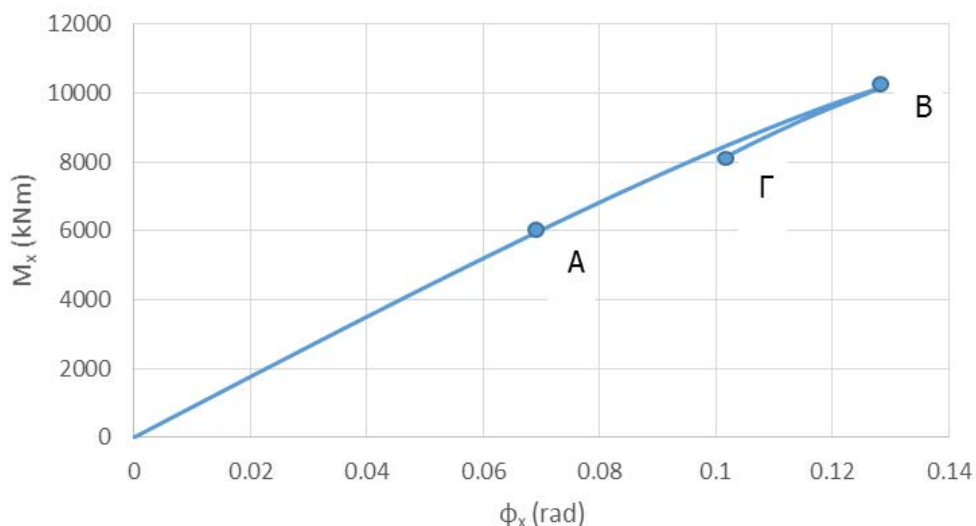
Φορέας	ADINA (y/D)	Ευρωκώδικας			
		a	a/D	a _{max}	a _{max} /D
Σκέτος κύλινδρος	0.175	0.073	0.080	0.045	0.050
E _{εδαφ} =15000kPa	0.082	0.037	0.040		
E _{εδαφ} =17000kPa	0.077	0.035	0.038		
E _{εδαφ} =22000kPa	0.059	0.027	0.029		
E _{εδαφ} =25000kPa	0.055	0.025	0.027		

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παράμετρος ωσειδούς παραμόρφωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$a = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{4} \quad (4.3)$$

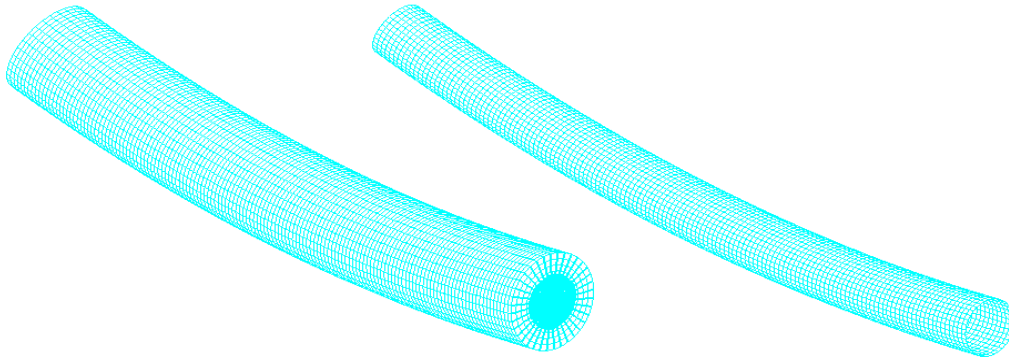
4.3.2.2 Παραμετρική ανάλυση συντελεστή τριβής εδάφους

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση του μοντέλου σύμφωνα με το συντελεστή τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού. Ως έδαφος χρησιμοποιείται αμμώδες έδαφος με συντελεστή τριβής $\phi=36^\circ$ και μέτρο ελαστικότητας $E_{\text{εδαφ}}=20000\text{kPa}$. Ο δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-36.

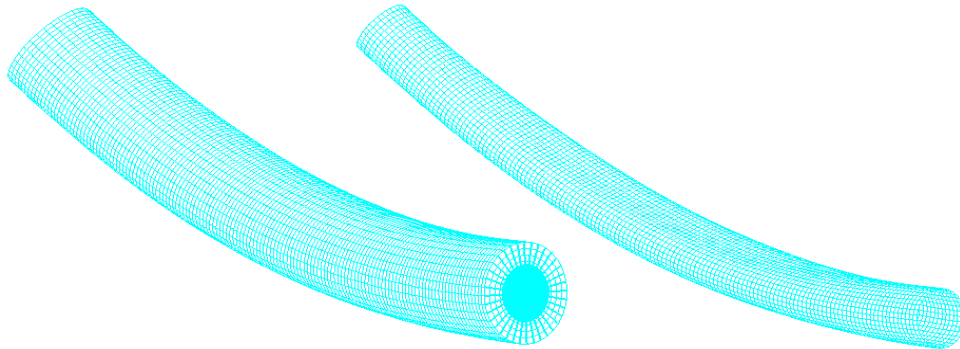


Σχήμα 4-36: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για γωνία τριβής $\phi=36^\circ$ και συντελεστή τριβής $\mu=0.63$

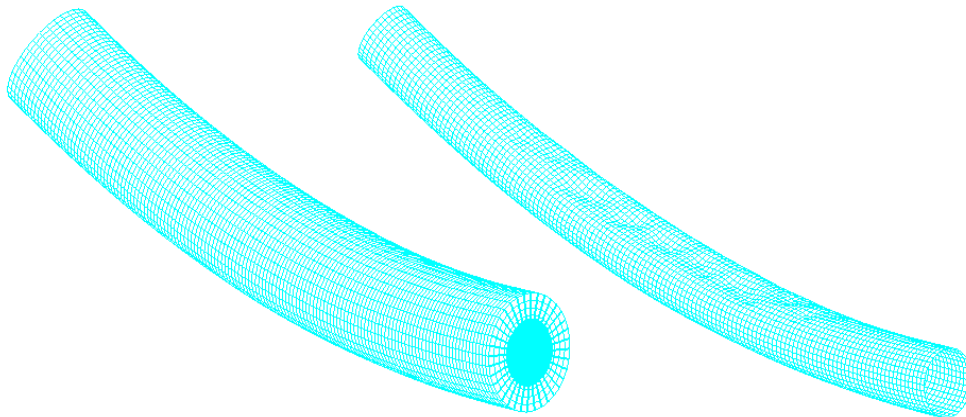
Από το Σχήμα 4-36 προκύπτει ότι το οριακό φορτίο ισούται με $M_u=10139.30\text{kNm}$. Ο δρόμος ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικός όπως περιγράφεται από το ενδεικτικό σημείο Α, έως το σημείο διακλάδωσης (σημείο Β), όπου εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Το φορτίο το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο Β αποτελεί το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο φορέας. Λόγω του τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού που εκδηλώνεται στο σημείο Β μειώνεται δραστικά το φορτίο το οποίο μπορεί να παραληφθεί από το φορέα και για το λόγο αυτό παρουσιάζεται η αιχμή του δρόμου ισορροπίας, χωρίς να διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα στα χαρακτηριστικά σημεία Α, Β και Γ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-37, Σχήμα 4-38 και Σχήμα 4-39 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-37: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα για γωνία τριβής $\varphi=36^\circ$ στο σημείο A

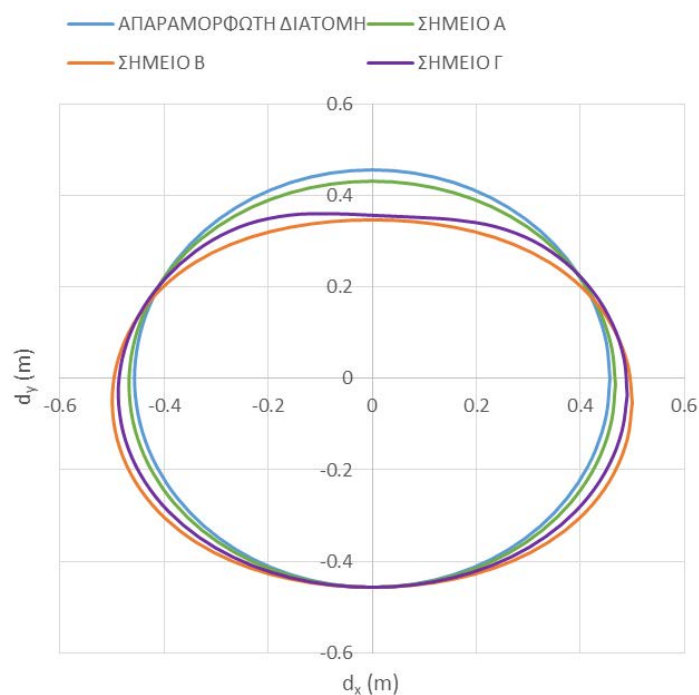


Σχήμα 4-38: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα για γωνία τριβής $\varphi=36^\circ$ στο σημείο B



Σχήμα 4-39: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα για γωνία τριβής $\varphi=36^\circ$ στο σημείο Γ

Η παραμορφωμένη διατομή του αγωγού η οποία υφίσταται οβαλοποίηση στα σημεία A, B και Γ παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-40.



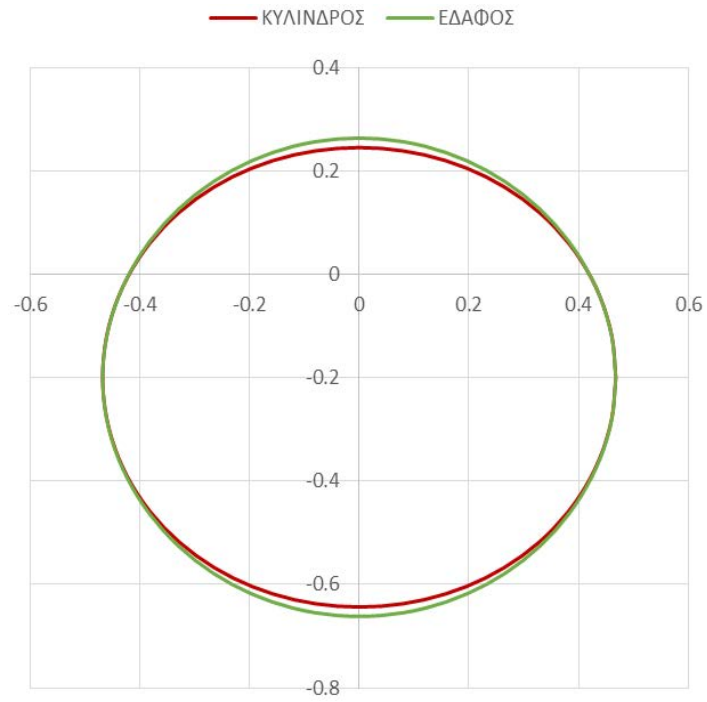
Σχήμα 4-40: Παραμορφωμένη διατομή του αγωγού στα σημεία A, B και Γ

Στον Πίνακα 4-13 παρουσιάζεται το μέγεθος της οβαλοποίησης για συντελεστή τριβής $\mu=0.63$ όπως προέκυψε στα σημεία A, B και Γ του δρόμου ισορροπίας.

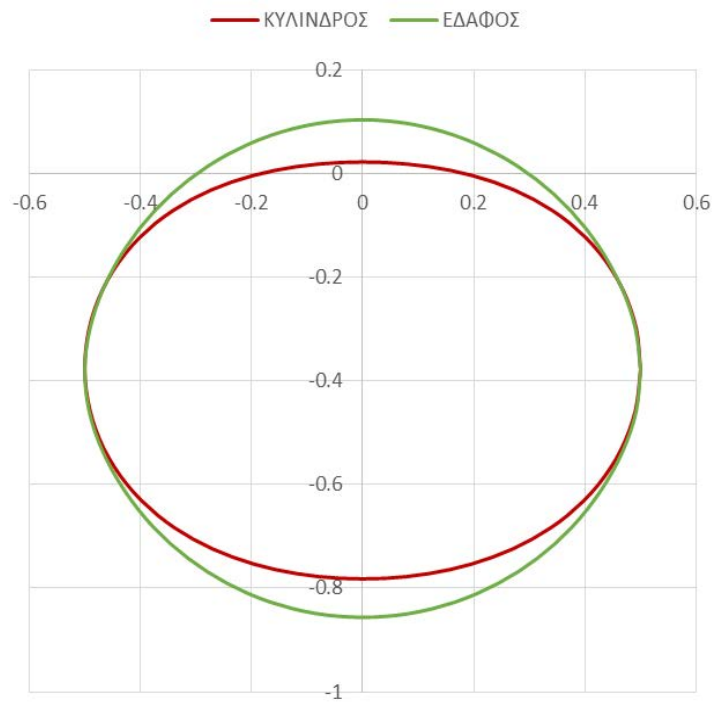
Πίνακας 4-13: Οβαλοποίηση διατομής αγωγού μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για συντελεστή τριβής $\mu=0.63$

ΣΗΜΕΙΟ	(y/D) ADINA
A	0.027
B	0.120
Γ	0.109

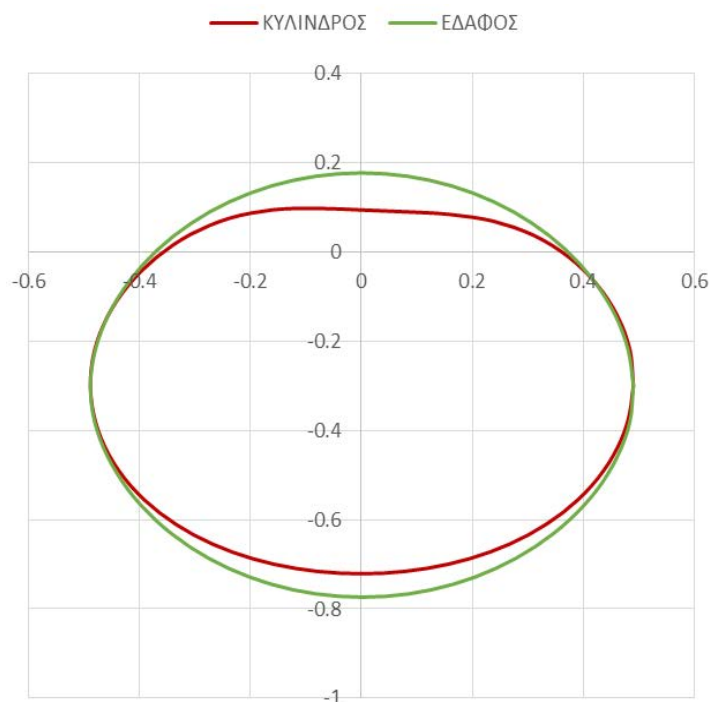
Οι παραμορφωμένες διατομές του κυλίνδρου και του εδάφους στα σημεία A, B και Γ του δρόμου ισορροπίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-41, το Σχήμα 4-42 και το Σχήμα 4-43 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-41: Παραμορφωμένη εικόνα διατομής αγωγού και εδάφους στο σημείο A

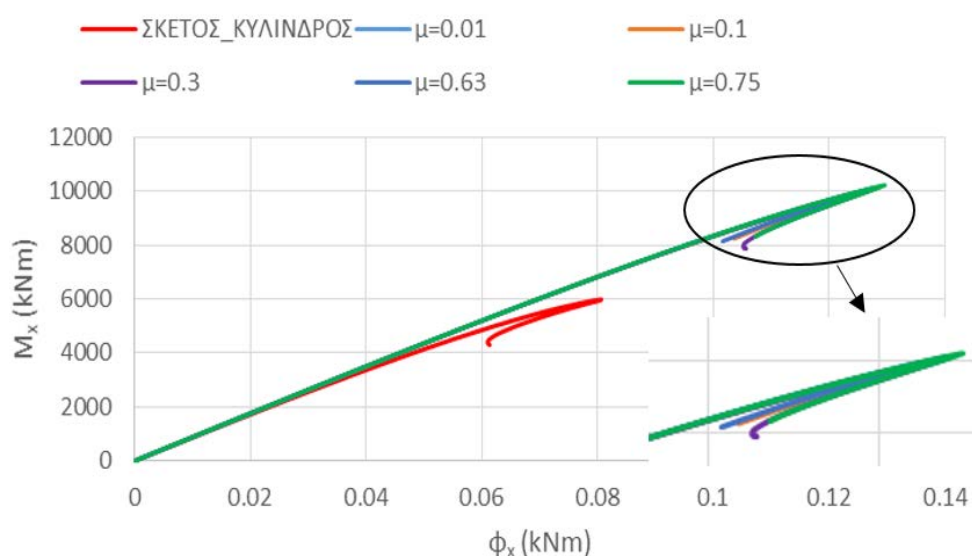


Σχήμα 4-42: Παραμορφωμένη εικόνα διατομής αγωγού και εδάφους στο σημείο B



Σχήμα 4-43: Παραμορφωμένη εικόνα διατομής αγωγού και εδάφους στο σημείο Γ

Στο Σχήμα 4-41 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του σκέτου κυλίνδρου αλλά και του μοντέλου με έδαφος της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους και πάχος αγωγού $t=7.92\text{mm}$.



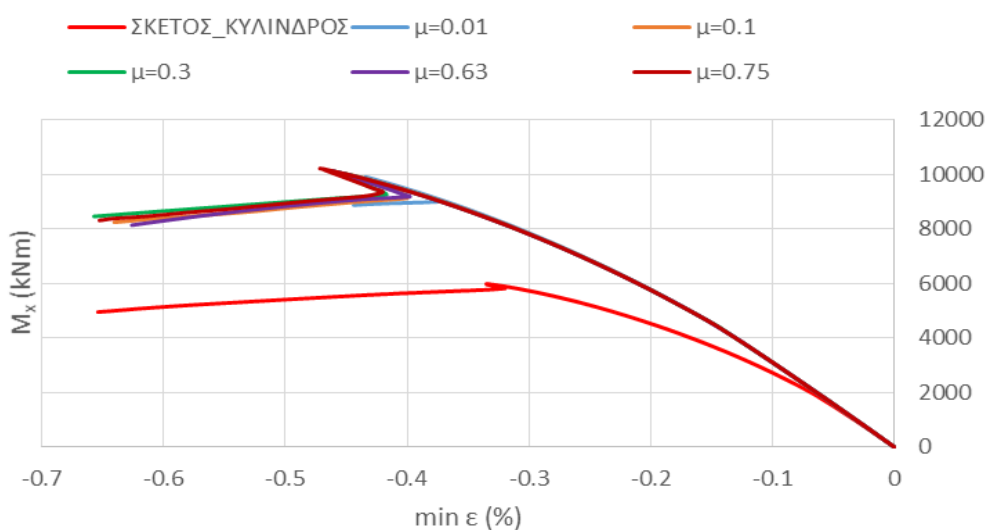
Σχήμα 4-44: Δρόμοι ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής

Από το Σχήμα 4-41 προκύπτει ότι για μεταβολή του συντελεστή τριβής οι δρόμοι ισορροπίας είναι αρχικά ελαστικοί έως το σημείο διακλάδωσης, όπου εκδηλώνεται ακαριαία τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Από τον Πίνακα 4-14 προκύπτει η επιρροή του περιβάλλοντος εδάφους στο οριακό φορτίο. Με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας αυξάνεται και το οριακό φορτίο.

Πίνακας 4-14: Οριακά φορτία για μεταβολή των δρόμων ισορροπίας

Μέτρο ελαστικότητας εδάφους (kPa)	M_u (kNm)
Σκέτος κύλινδρος	5989.78
0.01	9916.50
0.1	10035.00
0.3	10126.30
0.63	10139.30
0.75	10223.50

Στο Σχήμα 4-45 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψης – ελάχιστων παραμορφώσεων του σκέτου κυλίνδρου αλλά και του μοντέλου με έδαφος της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.



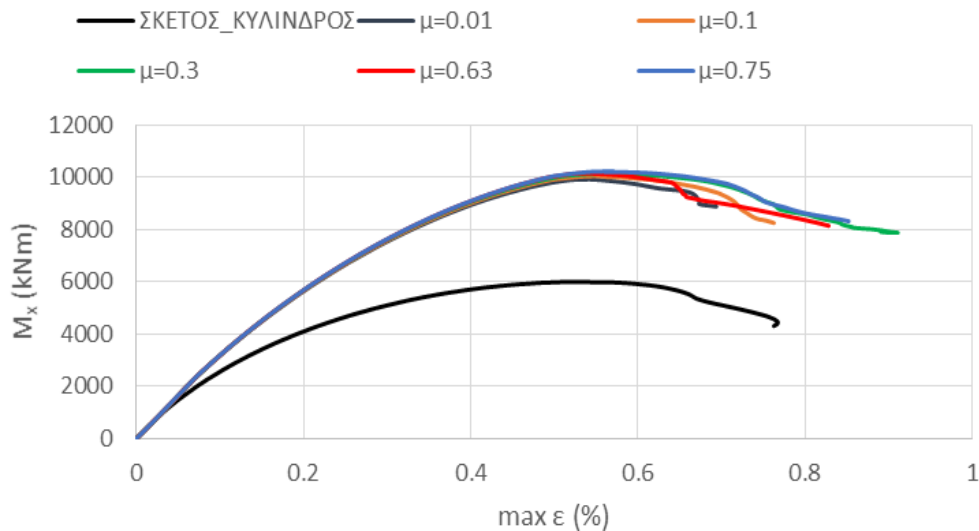
Σχήμα 4-45: Δρόμοι ισορροπίας ροπών κάμψης - ελάχιστων παραμορφώσεων για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-45, στον Πίνακα 4-15 παρουσιάζονται οι διαμήκειες θλιπτικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας.

Πίνακας 4-15: Ελάχιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

Μοντέλο	min ϵ (%)
Σκέτος κύλινδρος	0.335
$\mu=0.01$	0.434
$\mu=0.10$	0.452
$\mu=0.30$	0.462
$\mu=0.63$	0.462
$\mu=0.75$	0.472

Στο Σχήμα 4-46 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψης – μέγιστων παραμορφώσεων του σκέτου κυλίνδρου αλλά και του μοντέλου με έδαφος της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε βάσει του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.



Σχήμα 4-46: Δρόμοι ισορροπίας ρομών κάμψης - μέγιστων παραμορφώσεων για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής

Σύμφωνα με το Σχήμα 4-46, στον Πίνακα 4-16 παρουσιάζονται οι διαμήκεις εφελκυστικές παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας.

Πίνακας 4-16: Μέγιστες παραμορφώσεις στα σημεία διακλάδωσης των δρόμων ισορροπίας

Μοντέλο	min ε (%)
Σκέτος κύλινδρος	0.513
μ=0.01	0.540
μ=0.10	0.561
μ=0.30	0.568
μ=0.63	0.527
μ=0.75	0.571
Ευρωκώδικας	2.000

4.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν ο κυλινδρικός αγωγός υπό καθαρή ροπή κάμψης. Ο αγωγός αυτός υφίσταται οβαλοποίηση της διατομής του και αναπτύσσεται τοπικός λυγισμός στο τοίχωμα του αγωγού. Επίσης η επιρροή του εδάφους αυξάνει το οριακό φορτίο και την παραμόρφωση του. Ο δρόμος ισορροπίας για τις περιπτώσεις αυτές είναι αρχικά γραμμικός μέχρι την εκδήλωση του τοπικού λυγισμού μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης, ο οποίος αναπτύσσεται ακαριαία και ο φορέας δεν έχει την ικανότητα να παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από αυτό που προκαλεί το λυγισμό και επομένως δεν διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4, είναι:

- Από το Σχήμα 4-12 και το Σχήμα 4-32 προκύπτει ότι με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας εδάφους αυξάνεται και το οριακό φορτίο λυγισμού του κυλινδρικού αγωγού.
- Από το Σχήμα 4-22, το Σχήμα 4-23 και το Σχήμα 4-24 προκύπτει ότι με την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του αγωγού αυξάνεται το οριακό φορτίο, το μέγεθος της οβαλοποίησης και της αναπτυσσόμενης θλιπτικής παραμόρφωσης του αγωγού στο σημείο διακλάδωσης του δρόμου ισορροπίας.
- Από το Σχήμα 4-33 και τον Πίνακα 4-10 προκύπτει ότι η εδαφική μάζα συμβάλλει στην αύξηση της αναπτυσσόμενης θλιπτικής παραμόρφωσης συγκριτικά με το σκέτο κύλινδρο.
- Από το Σχήμα 4-35 και τον Πίνακα 4-12 προκύπτει η μείωση του μεγέθους της οβαλοποίησης της διατομής του κυλινδρικού αγωγού με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους.

4.5 Βιβλιογραφία

ADINA R & D Inc., Theory and Modeling guide Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, Watertown, USA, 2008

ALA American Lifelines Alliance, Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe – July 2001 (with addenda through February 2005), 2005

EN 1993-4-3 (2007). Eurocode 3: Design of steel structures. Part 4-3 Pipelines. CEN, Brussels
Gantes, C.J. and Gerogianni, D.S., "Infinitely Long Buried Pipelines under Bending and Internal Pressure", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS, Vol. 43, No. 2, pp. 101-114, 2002

Houliara, S. and Karamanos, S.A., "Buckling and post-buckling of long pressurized elastic thin-walled tubes under in-plane bending", International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, pp. 491-511, 2006

Karamanos, S.A., "Bending Instabilities of Elastic Tubes", International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, pp. 2059-2085, 2002

Rotter, J.M., Sadowski, A.J. and Chen, L., "Nonlinear Stability of Thin Elastic Cylinders of Different Length under Global Bending", International Journal of Solid and Structures, Vol. 51, pp. 2826-2839, 2014

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς κυλινδρικών κελυφών και μεταλλικών αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και πετρελαιϊκών προϊόντων. Οι αγωγοί λόγω του μεγάλου τους μήκους είναι υποχρεωμένοι να ακολουθήσουν την κίνηση του εδάφους η οποία οφείλεται κυρίως σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις του εδάφους. Αποτέλεσμα των δράσεων αυτών είναι η αστοχία του αγωγού λόγω της εκδήλωσης τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού, οπότε απαιτείται να προσομοιωθεί ο φορέας με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Σε όλες τις αναλύσεις το υλικό ήταν ελαστικός χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.3$. Επιπλέον διερευνήθηκε η επιρροή περιβάλλοντος ελαστικού μέσου που προσομοιώνει το έδαφος με σκοπό την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των κυλινδρικών αγωγών υπό κεντρική αξονική θλίψη και ροπή κάμψεως. Θεωρήθηκε αμώδες έδαφος με μέτρο ελαστικότητας από 15000kPa έως 25000kPa το οποίο προσομοιώθηκε με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Μελετήθηκαν κυλινδρικά κελύφη υπό κεντρική αξονική θλιπτική φόρτιση όπου προέκυψε σφάλμα μικρότερο από 1% συγκριτικά με αναλυτικές σχέσεις για τα φορτία λυγισμού. Επίσης, όσο ποιο λεπτότοιχος είναι ο κυλινδρικός αγωγός, δηλαδή όσο αυξάνεται ο αδιάστατος λόγος της διαμέτρου προς το πάχος του αγωγού (D/t), τόσο μειώνεται το φορτίο λυγισμού της αξονοσυμμετρικής ιδιομορφής λυγισμού, ενώ αντίθετα με την υιοθέτηση αρχικών ατελειών και καθώς αυξάνεται το μέγεθος τους μειώνεται το οριακό φορτίο λυγισμού. Ο δρόμος ισορροπίας για τους φορείς αυτούς είναι έντονα μη γραμμικός και ασταθής, οπότε ο φορέας δε διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή. Όμως, στην περίπτωση μοντελοποίησης του κυλινδρικού αγωγού με κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων προκύπτει μεγαλύτερο σφάλμα συγκριτικά με τις αναλυτικές σχέσεις το οποίο ίσως οφείλεται στα ημιτονοειδή κύματα τα οποία δεν διατηρούν σταθερό πλάτος. Επίσης μελετήθηκαν κυλινδρικά κελύφη υπό καθαρή ροπή κάμψεως, όπου κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι η ανάπτυξη τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού με αποτέλεσμα την αστοχία τους μέσω σημείου διακλάδωσης και ασταθούς μεταλυγισμικού κλάδου. Για βραχείς κυλίνδρους προκύπτει ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι 5% μεγαλύτερο και το οριακό φορτίο λυγισμού είναι 9.10% μικρότερο από τη ροπή M_{cl} . Όμως στην περίπτωση αγωγών με μεγαλύτερο μήκος το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι 2% μεγαλύτερο από τη ροπή M_{cl} ενώ το οριακό φορτίο λυγισμού της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας είναι 4.33% από τη ροπή M_{Braz} και οφείλεται στην οβαλοποίηση της διατομής του. Με την υιοθέτηση αρχικών ατελειών το οριακό φορτίο λυγισμού μειώνεται, αλλά αυξάνεται η κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση. Η κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση είτε για τον βραχύ είτε για τον κύλινδρο μεταβατικού μήκους

όπως προέκυψε από τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας είναι μεγαλύτερη πάνω από 0.10% σε σχέση με τα αποτελέσματα των κανονισμών ASCE-ALA και Ευρωκώδικα 3. Με την αύξηση του πάχους του αγωγού αυξάνεται το οριακό φορτίο λυγισμού, το μέγεθος της οβαλοποίησης της διατομής του και η κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση. Το περιβάλλον έδαφος με μέτρο ελαστικότητας από 15000kPa έως 25000kPa συμβάλλει στην αύξηση του οριακού φορτίου λυγισμού και στις δυο περιπτώσεις φορτίσεων, αλλά και την κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση συγκριτικά με το σκέτο κύλινδρο, καθώς επίσης μειώνεται και το μέγεθος της οβαλοποίησης της διατομής του αγωγού.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η συμπεριφορά κυλινδρικών κελυφών και υπόγειων αγωγών υπό κεντρική αξονική θλίψη και καθαρή ροπή κάμψεως αλλά και με τη συνεισφορά του εδάφους. Επόμενα βήματα της διερεύνησης είναι η μελέτη της επιρροής της έκκεντρης αξονικής θλίψης, της εσωτερικής πίεσης του αγωγού καθώς και η μελέτη των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για την επίλυση του μισού προσομοιώματος με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Κρίσιμης επίσης σημασίας αποτελεί η διεξαγωγή πειραμάτων με σκοπό τη σύγκριση των αναλυτικών, αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.