



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ»**



Παύλος Καλφαντής

Επιβλέποντες:

Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλης Μελισσιανός, υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2014

ΕΜΚ ΔΕ 2014/14

Πάυλος Π. Καλφαντής (2014)

Διερεύνηση καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014/14

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Pavlos P. Kalfantis (2014)

An investigation into upheaval buckling of buried steel pipelines

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2014/14

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

Copyright © Pavlos P. Kalfantis, 2014

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 2014/14

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
Παύλος Καλφαντής

Επιβλέποντες:

Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Βασίλης Μελισσιανός, Υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το φαινόμενο του καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών ως αποτέλεσμα της ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων από τα οποία διέρχονται. Στο πρώτο κεφάλαιο εισάγεται το πρόβλημα των υπόγειων μεταλλικών αγωγών διερχόμενων από σεισμικά ρήγματα και παρουσιάζεται μία συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου του καθολικού λυγισμού αγωγών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά ελαστικής δοκού επί ελαστικού εδάφους ως μία πρώτη προσέγγιση για την προσομοίωση του καθολικού λυγισμού υπόγειων αγωγών. Εξετάζεται η λυγισμική συμπεριφορά αμφιέριστων και αμφίπακτων δοκών πεπερασμένου μήκους επί εύκαμπτης θεμελίωσης υπό σταθερή αξονική θλιπτική δύναμη. Εξάγονται αναλυτικές σχέσεις περιγραφής του φαινομένου και ειδικότερα οι ιδιομορφές λυγισμού, οι τιμές των κρίσιμων φορτίων και τα όρια μετάθεσης των ιδιομορφών συναρτήσει της ελαστικής εδαφικής δυσκαμψίας. Ακολουθώντας τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίνονται με αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο ερευνάται αριθμητικά η μεταλυγισμική απόκριση της δοκού μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του αγωγού που υπόκειται σε ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος, μέσω δύο παραδειγμάτων, ενός κανονικού και ενός ανάστροφου ρήγματος. Η αλληλεπίδραση αγωγού – περιβάλλοντος εδάφους προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια σε τρεις διευθύνσεις και εξάγονται όλα τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Η αναπτυσσόμενη ένταση συναρτάται με τον τύπο του ρήγματος που ενεργοποιείται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αποτίμηση του κινδύνου εκδήλωσης καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών λόγω ενεργοποίησης ανάστροφων σεισμικών ρηγμάτων που καταπονούν κυρίως θλιπτικά τον αγωγό και θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητά του. Ο κίνδυνος του καθολικού λυγισμού αξιολογείται αριθμητικά έναντι των άλλων μορφών αστοχίας, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τη γεωμετρική μη-γραμμικότητα, όσο και τη μη-γραμμικότητα του χάλυβα και του εδάφους. Τέλος, διερευνάται παραμετρικά ο κίνδυνος εκδήλωσης καθολικού λυγισμού αρχικά σε σχέση με τη γωνία του ρήγματος, και στη συνέχεια σε σχέση με το λόγο της διαμέτρου του αγωγού προς το πάχος του τοιχώματός του.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της 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 2014/14

AN INVESTIGATION INTO UPHEAVAL BUCKLING OF BURIED STEEL PIPELINES
Pavlos Kalfantis

Supervisors:

Charis Gantes, Professor N.T.U.A.
Vasileios Melissianos, PhD Candidate N.T.U.A.

Abstract

In the present diploma thesis, upheaval buckling of buried steel pipelines due to seismic fault activation is investigated. In the first chapter, pipeline – fault crossing and a literature review on upheaval buckling are presented.

In the second chapter, the behavior of an elastic beam resting on elastic foundation is addressed, as an approach to simulate upheaval buckling of buried pipelines. The behavior of a simply supported and a fixed-fixed beam of finite length resting on elastic foundation under compression is investigated. Analytical solutions for beam linear buckling analysis, eigenmode shapes, critical buckling loads and eigenmode transition limits in relation to soil stiffness are extracted. Furthermore, the results are compared to numerical analyses' results. In the third chapter, the post-buckling behavior of the simply-supported and fixed-fixed beam is investigated via geometrically nonlinear analyses with imperfections (GNIA).

In the fourth chapter, a numerical simulation of a pipeline crossing an activated seismic fault is presented, via two examples of a normal and a reverse fault. The pipeline – soil interaction is simulated using nonlinear springs in three dimensions and the pipeline internal forces due to the fault activation are calculated. The developing pipeline forces depend on the fault type.

In the fifth chapter the risk of upheaval buckling of buried steel pipelines under acting compressive forces due to reverse fault activation is numerically investigated. The risk of upheaval buckling is assessed against other failure modes, such as pipeline local buckling, by also accounting for geometrical, pipeline steel and soil nonlinearities. Finally, parametric analyses are conducted in order to assess the risk of upheaval buckling in relation to the fault's angle and to the pipeline's diameter to thickness ratio.

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με τη διπλωματική αυτή εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησης μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την αφορμή αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους έπαιξαν σημαντικό ρόλο κατά τη διάρκεια της 5ετούς φοίτησης μου στο Ίδρυμα.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. κ. Χάρη Γαντέ που ήταν και ο επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας. Η διαρκής και υποδειγματική καθοδήγησή μαζί με την άριστη επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειας μου αυτής.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γιώργο Μπουκοβάλα, Καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής του Ε.Μ.Π και τον κ. Τάσο Αβραάμ, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Βασίλη Μελισσιανό.

Για τη βοήθειά της στη μορφοποίηση του κειμένου θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη συμπαράσταση της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πάυλος Καλφαντής

Ιούλιος 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΑΓΩΓΟΙ	1
1.2	ΔΟΚΟΣ ΕΠΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	3
1.3	ΚΑΘΟΛΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ	4
1.4	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ	5
1.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ	5
2	ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΔΟΚΟΥ ΕΠΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	7
2.1	ΑΠΕΙΡΟΜΗΚΗΣ ΔΟΚΟΣ ΕΠΙ ΕΔΑΦΟΥΣ	7
2.2	ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΔΟΚΟΣ	9
2.2.1	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αναλυτική προσέγγιση	9
2.2.2	Ιδιομορφές λυγισμού αμφιέρειστης δοκού.....	11
2.2.3	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αριθμητική προσέγγιση	12
2.2.4	Σύγκριση αναλυτικών – αριθμητικών αποτελεσμάτων	13
2.2.5	Μετάθεση ιδιομορφών	17
2.3	ΑΜΦΙΠΑΚΤΗ ΔΟΚΟΣ.....	19
2.3.1	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αναλυτική προσέγγιση	19
2.3.2	Ιδιομορφές λυγισμού αμφίπακτης δοκού.....	19
2.3.3	Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αριθμητική προσέγγιση	21
2.3.4	Σύγκριση αναλυτικών – αριθμητικών αποτελεσμάτων	22
2.3.5	Μετάθεση ιδιομορφών	23
2.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	27

2.5	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	27
3	ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΟΥ ΕΠΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	29
3.1	ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΔΟΚΟΣ.....	29
3.1.1	Δεδομένα αναλύσεων.....	29
3.1.2	Σχήματα στελειών για μη-γραμμικές αναλύσεις.....	30
3.1.3	Αποτελέσματα μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες.....	31
3.2	ΑΜΦΙΠΑΚΤΗ ΔΟΚΟΣ.....	35
3.2.1	Δεδομένα αναλύσεων.....	35
3.2.2	Σχήματα στελειών για μη-γραμμικές αναλύσεις.....	35
3.2.3	Αποτελέσματα μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες.....	39
3.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	44
4	ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΡΗΓΜΑ.....	45
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
4.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ.....	46
4.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	46
4.3.1	Αξονικά εδαφικά ελατήρια.....	47
4.3.2	Οριζόντια εδαφικά ελατήρια.....	48
4.3.3	Κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα άνω.....	49
4.3.4	Κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα κάτω.....	49
4.4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	50
4.4.1	Αγωγός.....	50
4.4.2	Έδαφος.....	51
4.4.3	Προσομοίωση ρήγματος.....	53
4.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	55
4.5.1	Κανονικό ρήγμα.....	56
4.5.2	Ανάστροφο ρήγμα.....	61
5	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ.....	67
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	67
5.2	ΚΑΘΟΛΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΑΓΩΓΟΥ.....	70
5.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	71
5.4	ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ.....	73
5.5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	76
5.5.1	Επιρροή γωνίας ρήγματος.....	76

5.5.2	Επιρροή λόγου διαμέτρου προς πάχος	84
5.6	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	94
5.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
6	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	101
6.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	101
6.2	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
6.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	103

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΑΓΩΓΟΙ

Οι αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις του σύγχρονου κόσμου επιβάλλουν την αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου σε τοποθεσίες που βρίσκονται μακριά από τους τελικούς αποδέκτες των καυσίμων. Έτσι, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη κατασκευής αγωγών καυσίμων για τη μεταφορά τους στον τελικό αποδέκτη που εκτείνονται σε μήκη εκατοντάδων χιλιομέτρων. Η ικανότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου και αερίου σε μεγάλες αποστάσεις και μέσω μεγάλων και διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών καθιστά τους αγωγούς κατασκευές με μεγάλη οικονομική και περιβαλλοντική σημασία για το σύνολο της κοινωνίας. Ταυτόχρονα, όμως, αποτελούν κατασκευές μεγάλης επικινδυνότητας, καθώς μία πιθανή αστοχία, όπως διαρροή, θραύση ή ακόμα και έκρηξη μπορεί να προκαλέσει σημαντικές οικονομικές, περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη γύρω περιοχή ακόμα και ανθρώπινες απώλειες.

Συνήθως, οι αγωγοί κατασκευάζονται από χάλυβα και θάβονται σε βάθος λίγων μέτρων προκειμένου να προστατευτούν έναντι διάβρωσης και τυχηματικών δράσεων, όπως είναι θραύση από χτύπημα γεωργικού μηχανήματος. Ένας τυπικός αγωγός μεταφοράς καυσίμων που θάβεται σε όρυγμα λίγων μέτρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-1.

Η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός αγωγού πραγματοποιείται εντός ενός αυστηρού πλαισίου περιορισμών και κανονισμών. Τέτοιοι περιορισμοί είναι, για παράδειγμα, η ανάγκη αποφυγής κατά τη διαδικασία επιλογής της χάραξης οικιστικών περιοχών ή περιοχών με περιβαλλοντική ευαισθησία, που τις καθιστά ακατάλληλες να αναλάβουν τον κίνδυνο μίας πιθανής αστοχίας. Λόγω αυτών των περιορισμών, καθώς και λόγω του μήκους των αγωγών που εκτείνεται σε χιλιάδες χιλιόμετρα, είναι πολλές φορές αδύνατο να αποφευχθούν κατά την όδευση σεισμικές περιοχές. Αυτές οι περιοχές συνήθως περιλαμβάνουν σεισμικά ρήγματα ή περιοχές ενδεχομένων κατολισθήσεων και ενδέχεται να επιβάλλουν μεγάλες μετατοπίσεις στον αγωγό, τις οποίες, όντας θαμμένοι, πρέπει να ακολουθήσει. Επομένως, η ακεραιότητα του αγωγού εξαρτάται άμεσα από τις επιβαλλόμενες μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, οι οποίες θα πρέπει να προβλεφθούν κατά το δυνατόν και να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του αγωγού. Προκύπτει, έτσι, η ανάγκη προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης αγωγού – περιβάλλοντος εδάφους. Από όλους τους σεισμικούς κινδύνους, όπως είναι η ενεργοποίηση σεισμικών ρηγμάτων, η ρευστοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους ή τα σεισμικά κύματα, έχει αποδειχθεί από μελέτες και αναλύσεις προηγούμενων σεισμών ότι ο κρισιμότερος κίνδυνος είναι η ενεργοποίηση ρήγματος.



Σχήμα 1-1. Τοποθέτηση μεταλλικού αγωγού σε όρυγμα [<http://www.constructionweekonline.com>]

Η ενεργοποίηση ενός ρήγματος προκαλεί μεγάλες χωρικές μόνιμες διαφορικές εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες παραμορφώνουν τον αγωγό, ο οποίος όντας αναγκασμένος να τις ακολουθήσει αναπτύσσει σύνθετη ένταση (Ο' Rourke και Liu [1-1]). Στη φύση απαντώνται τρεις τύποι ρηγμάτων, τα κανονικά, τα ανάστροφα και τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Στα μεν κανονικά ρήματα ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και εφελκυσμό, ενώ στα ανάστροφα ρήματα ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και θλίψη. Τέλος, στα ρήματα οριζόντιας ολίσθησης ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και διάτμηση.

Ως αποτέλεσμα της αναπτυσσόμενης σύνθετης έντασης, ο αγωγός αναπτύσσει μεγάλες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις. Παρόλο που ο χάλυβας χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα, οι αναπτυσσόμενες τάσεις και μετελαστικές παραμορφώσεις μπορούν να ξεπεράσουν την ικανότητα του υλικού να τις αναλάβει και επομένως αποτελούν έναν κίνδυνο για τους μελετητές τέτοιου τύπου τεχνικών έργων.

Οι ενδεχόμενες μορφές αστοχίας του αγωγού κατά την ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος είναι αφενός η αστοχία των συγκολλήσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων του αγωγού. Αφετέρου, μέσω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων, οι αγωγοί, όντας κατασκευές μεγάλου μήκους και με λεπτότοιχα τοιχώματα, είναι ευπαθείς σε πιθανή απώλεια ευστάθειας μέσω φαινομένων δευτέρας τάξεως. Τα φαινόμενα αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη περιλαμβάνεται ο τοπικός λυγισμός του μεταλλικού κελύφους του φορέα (Shell-type buckling), με απώλεια του κυκλικού σχήματος του. Τέτοιου είδους αστοχία παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-2.



Σχήμα 1-2. Τοπικός λυγισμός μεταλλικού αγωγού [Takada et al. 2001]

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνεται ο λυγισμός συνολικά του φορέα σε ένα συγκεκριμένο μήκος (Beam-type buckling), με απώλεια της αρχικής ευθύγραμμης χάραξης του και μετατροπής της σε ένα

σχήμα που προσομοιάζει το σχήμα Ω , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-3. Αυτός ο τύπος λυγισμού, που στο εξής θα καλείται καθολικός λυγισμός (Upheaval buckling – UHB), είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Ειδική μνεία γίνεται για ενεργοποίηση ανάστροφων ρηγμάτων, η οποία επιβάλλει στον αγωγό ένα σχήμα μικρότερο από το αρχικό του, και επομένως η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση σε αυτόν είναι κατά κύριο λόγο θλιπτική καθιστώντας την απώλεια ευστάθειας ως πιο πιθανή μορφή αστοχίας. Ένας επιπρόσθετος παράγοντας που αυξάνει την πιθανότητα καθολικού λυγισμού, ειδικά σε υποθαλάσσιους αγωγούς, είναι οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές δυνάμεις λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του περιβάλλοντος και του μεταφερόμενου καυσίμου.



Σχήμα 1-3. Καθολικός λυγισμός υπόγειου μεταλλικού αγωγού [<http://www.advancepipeliner.com>]

Ο καθολικός λυγισμός υπόγειων μεταλλικών αγωγών έχει μελετηθεί εκτενώς από τους ερευνητές κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, μετά από τέτοιου είδους αστοχίες που συνέβησαν σε αγωγούς. Η έρευνα για τον καθολικό λυγισμό συνεχίζεται παγκοσμίως λόγω της κρισιμότητας του φαινομένου ιδιαίτερα στους υποθαλάσσιους αγωγούς.

1.2 ΔΟΚΟΣ ΕΠΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το μηχανικό μοντέλο που υιοθετείται συνήθως για την προσομοίωση του καθολικού λυγισμού υπόγειων αγωγών είναι αυτό της δοκού εδραζόμενης επί εύκαμπτης θεμελίωσης. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, μια απειρομήκης δοκός εδράζεται επί ελαστικού εδάφους Winkler, το οποίο αποτελείται από ανεξάρτητα μεταξύ τους μετακινησιακά ελαστικά ελατήρια εγκάρσια στον άξονα του αγωγού. Η προσομοίωση του καθολικού λυγισμού γίνεται με εφαρμογή θλιπτικών φορτίων επί της δοκού. Ο Hetenyí [1-2] ήταν ο πρώτος που μελέτησε το φαινόμενο του καθολικού λυγισμού της ελαστικής δοκού πεπερασμένου μήκους με διάφορες συνοριακές συνθήκες επί ελαστικού εδάφους Winkler υπό σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο, με εφαρμογή της στατικής θεωρίας δεύτερης τάξης. Στα συμπεράσματα της εργασίας του περιλαμβάνονται και τα πρώτα διαγράμματα μετάθεσης ιδιομορφών που παρατηρούνται στο πρόβλημα.

Οι διάφορες εργασίες που έχουν δημοσιευθεί ασχολούνται με διάφορες παραμέτρους του φαινομένου, όπως είναι το μήκος της υπό εξέταση δοκού, η προσομοίωση των εδαφικών ελατηρίων καθώς και η προσομοίωση της επιβαλλόμενης έντασης στη δοκό. Οι Massalas et al. [1-3] προσομοίωσαν το έδαφος με ελαστικά ελατήρια χωρίς τη δυνατότητα παραλαβής εφελκυστικών δυνάμεων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα κρίσιμα φορτία λυγισμού του ελαστικού εδάφους είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του ελαστικού εδάφους χωρίς δυνατότητα παραλαβής εφελκυστικών δυνάμεων. Οι Yun και Kyriakides [1-4] μελέτησαν τόσο τον τοπικό όσο και τον καθολικό λυγισμό απειρομήκους δοκού υπό σύνθετη αξονική και καμπτική ένταση και κατέληξαν ότι το πρώτο κρίσιμο φορτίο λυγισμού προκύπτει για σχετικά μικρές εγκάρσιες μετακινήσεις στον αγωγό. Τέλος, οι Song και Li [1-5] αλλά και οι Li και Batra [1-6] στις εργασίες τους ασχολήθηκαν με τις ιδιομορφές λυγισμού της ελαστικής δοκού πεπερασμένου μήκους επί ελαστικού εδάφους με διάφορες συνοριακές συνθήκες και μελέτησαν το

φαινόμενο της αύξησης του κρίσιμου φορτίου λυγισμού καθώς και της μετάθεσης των κρίσιμων ιδιομορφών με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας. Στις εργασίες εξήγαγαν αναλυτικές λύσεις για τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και διαγράμματα που παρουσιάζεται η μετάθεση των κρίσιμων ιδιομορφών λυγισμού για αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας σε δοκούς με συνοριακές συνθήκες αμφιέριστης, αμφίπακτης αλλά και μονόπακτης δοκού.

1.3 ΚΑΘΟΛΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

Τα φαινόμενα καθολικού λυγισμού μεταλλικών αγωγών είναι εξόχως επικίνδυνα σε αγωγούς σχετικώς μικρών διαμέτρων όπου ο λόγος διαμέτρου του αγωγού D προς το πάχος του κελύφους t είναι αρκετά μικρός και επομένως η λυγηρότητα του φορέα αρκετά μεγάλη, σύμφωνα με τους Yun και Kyriakides [1-4]. Σύμφωνα με την εργασία τους, καθολικός λυγισμός συμβαίνει σε μήκος δοκού ίσο με περίπου 50-100 διαμέτρους του αγωγού. Το γεγονός δε ότι οι αγωγοί στις περισσότερες περιπτώσεις είναι θαμμένοι σε σχετικά ρηχά ορύγματα, ειδικά στους υποθαλάσσιους αγωγούς που η εκσκαφή ορύγματος ικανού βάθους είναι πολλές φορές αδύνατη, καθιστούν τον καθολικό λυγισμό πολλές φορές την κρίσιμη μορφή αστοχίας.

Ο καθολικός λυγισμός μπορεί επίσης να αποτελέσει την κρίσιμη μορφή αστοχίας σε αγωγούς μεγάλης πίεσης και μεγάλης εσωτερικής θερμοκρασίας λόγω επιβολής σε αυτόν δυνάμεων που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι περισσότερο επιρρεπείς σε αυτό το φαινόμενο καθώς σε μεγάλα βάθη η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του περιβάλλοντος και του καυσίμου στο εσωτερικό είναι μεγάλη και η οποία σε συνδυασμό με την εσωτερική πίεση επιβάλλει θλιπτικές δυνάμεις στον αγωγό, οι οποίες οδηγούν στον καθολικό λυγισμό.

Η εκτεταμένη μελέτη του καθολικού λυγισμού αγωγών ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Αρχικά μελετήθηκε ο λυγισμός λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής υποθαλάσσιων αγωγών με χρήση του προσομοιώματος δοκού εδραζόμενης επί άκαμπτης θεμελίωσης και προτάθηκαν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των καμπτικών ροπών και των αξονικών δυνάμεων. Τέτοιες εργασίες δημοσίευσαν οι Hobs [1-7], Yun και Kyriakides [1-8] και Taylor και Gan [1-9]. Αργότερα, στα μέσα της δεκαετίας του 1990, παρουσιάστηκε η πιο εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση του καθολικού λυγισμού αγωγών επί ελαστικού εδάφους, από τους Maltby και Calladine [1-10], [1-11]. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από πολλές αναλύσεις αγωγών υπό αξονική, εγκάρσια αλλά και ανακυκλιζόμενη αξονική ένταση.

Η μελέτη της δοκού επί ελαστικού εδάφους ή επί άκαμπτης θεμελίωσης με αναλυτικές μεθόδους μπορεί να θεωρηθεί μία πρώτη προσέγγιση προσομοίωσης του φαινομένου του καθολικού λυγισμού. Για την πληρέστερη έως τώρα αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε από τους Andreuzzi και Perrone [1-12] το προσομοίωμα αμφιέριστης ελαστικής δοκού μεγάλου μήκους υπό σταθερή θερμοκρασιακή μεταβολή με συνυπολογισμό των τριβών μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Στην εργασία τους εξήγαγαν αναλυτικές λύσεις περιγραφής του φαινομένου. Όμως, οι πραγματικές χερσαίες και υποθαλάσσιες εδαφικές συνθήκες απέχουν από τις υποθέσεις του ελαστικού εδάφους ή της άκαμπτης θεμελίωσης. Έτσι, υιοθετήθηκε ερευνητικά το προσομοίωμα του αγωγού επί ελαστοπλαστικής θεμελίωσης για τη μελέτη του λυγισμού λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής υποθαλάσσιων αγωγών [1-13], [1-14]. Στη συνέχεια, η ευαισθησία του λυγισμού λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής στις αρχικές ατέλειες αναδείχθηκε με υιοθέτηση του προσομοιώματος της δοκού μεγάλου βάρους επί άκαμπτης θεμελίωσης από τους Karampour et al. [1-15]. Τα πρώτα συμπεράσματα της εργασίας τους αφορούν την ευαισθησία του φαινομένου στις αρχικές ατέλειες και όχι τόσο στην εδαφική δυσκαμψία. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία, όμως, περί καθολικού λυγισμού χερσαίων αγωγών παραμένει περιορισμένη. Ενδεικτικά, έμφαση στον καθολικό λυγισμό χερσαίων αγωγών δόθηκε από τους Matheson et al. [1-16] κατά τη μελέτη της ειδικής περίπτωσης αγωγών διερχόμενων πάνω από χαμηλό ύψωμα κατασκευασμένων με τμήματα ψυχρής έλασης, όπου

προτάθηκε μία συνάρτηση οριακής κατάστασης. Στην εργασία τους περιλαμβάνονται παραμετρικές αναλύσεις για τη διάμετρο του αγωγού D , το λόγο διαμέτρου προς τοίχωμα D/t καθώς και το υλικό του αγωγού. Πρόσφατα, επίσης, παρουσιάστηκε μία μέθοδος για την εκτίμηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού χερσαίων αγωγών υπό θλιπτική εδαφική παραμόρφωση βασιζόμενη σε συνδυασμό αριθμητικών αναλύσεων [1-17].

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η παρούσα εργασία αφορά μία πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης του καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών λόγω ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων. Αρχικά μελετάται αναλυτικά και αριθμητικά το πρόβλημα της λυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς ελαστικής δοκού επί ελαστικού εδάφους υπό σταθερή θλιπτική δύναμη. Εξάγονται αναλυτικές σχέσεις περιγραφής του φαινομένου οι οποίες συγκρίνονται με αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων. Ακολούθως, μελετάται αριθμητικά μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων η μεταλυγισμική συμπεριφορά της δοκού επί εδάφους Winkler. Στη συνέχεια γίνεται μια προσομοίωση της ενεργοποίησης ρήγματος ώστε να αποτιμηθεί ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού υπόγειου μεταλλικού αγωγού λόγω της ενεργοποίησης αυτής, σε συνάρτηση με τις υπόλοιπες πιθανές μορφές αστοχίας. Για την προσομοίωση του εδάφους επιλέγονται μη-γραμμικά ελατήρια, σύμφωνα με τις αμερικανικές οδηγίες ASCE-ALA [1-18]. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στον αγωγό λόγω πιθανής ενεργοποίησης τόσο κανονικού όσο και ανάστροφου ρήγματος. Η περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος αναλύεται πιο διεξοδικά καθώς οι επιβαλλόμενες θλιπτικές δυνάμεις καθιστούν την αστοχία από καθολικό λυγισμό περισσότερο κρίσιμη. Τέλος, παρουσιάζεται μια παραμετρική διερεύνηση του κινδύνου του καθολικού λυγισμού αγωγών σε σχέση με το λόγο της διαμέτρου του αγωγού D προς το πάχος του τοιχώματος t , καθώς και μια παραμετρική διερεύνηση σε σχέση με τη γωνία βύθισης του ανάστροφου ρήγματος.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

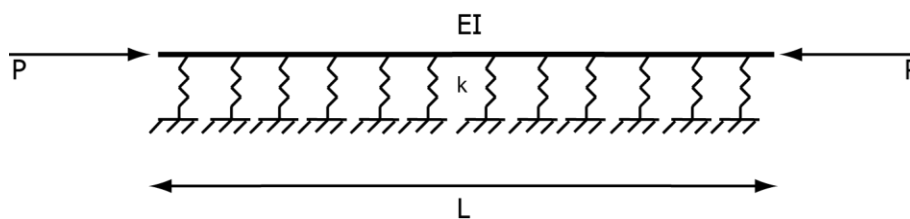
- [1-1] O' Rourke M.J. και Liu X. "Response of buried pipelines subjected to earthquake effects. Monograph No. 3", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999.
- [1-2] Hetenyi Z. "Beams on elastic foundation", Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1946.
- [1-3] Massalas Ch., Tzivanidis G. και Katsikadelis J. "Buckling of a continuous beam resting on a tensionless elastic foundation", The Franklin Institute, 1978.
- [1-4] Yun H.D. και Kyriakides S. "On the beam and shell modes of buckling of buried steel pipelines", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1990.
- [1-5] Song Xi και Li S-R. "Thermal buckling and post-buckling of pinned-fixed Euler Bernoulli beams on an elastic foundation", Elsevier, 2007.
- [1-6] Li S-R και Batra R.C. "Thermal buckling and postbuckling of Euler-Bernoulli Beams supported on nonlinear elastic foundations", AIAA Journal, 2007.
- [1-7] Hobs R.E. "In-service buckling of heated pipelines", Journal of Transportation Engineering, 1984.
- [1-8] Yun H.D. και Kyriakides S. "A model of beam-mode buckling of buried pipelines" ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol 111, 1990.
- [1-9] Taylor N. και Gan A.B. "Submarine pipeline buckling – imperfection studies", Thin-Walled Structures, 1986.

- [1-10] Maltby T.C. και Calladine C.R. "An investigation into upheaval buckling of buried pipelines – I. Experimental apparatus and some observations", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, 1995.
- [1-11] Maltby T.C. και Calladine C.R. "An investigation into upheaval buckling of buried pipelines – II. Theory and analysis of experimental observations", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, 1995.
- [1-12] Andreuzzi F. και Perrone A. "Analytical solution for upheaval buckling of buried pipelines", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, 2001.
- [1-13] Wang L., Shi R., Yuan F, Guo Z. και Yu L. "Global buckling of pipeline in the vertical plane with soft seabed", *Applied Ocean Research*, Vol. 33, 2011.
- [1-14] Shi R., Wang L., Guo Z., και Yuan F. "Upheaval buckling of a pipeline with prop imperfection on a plastic seabed", *Thin-Walled Structures*, Vol. 65, 2013.
- [1-15] Karampour H., Albermani F. και Gross J. "On the lateral and upheaval buckling of subsea pipelines", *Engineering Structures*, Vol. 52, 2013
- [1-16] Matheson I., Zhou J., Zhou W. και Gailing R. "An upheaval buckling limit state function for onshore natural gas pipelines", *IPC2008. 7th International Pipeline Conference*, ASME (ed.), 2008.
- [1-17] Mitsuya M., Sanakoue T. και Motohashi H. "Beam-mode buckling of buried pipeline subjected to seismic ground motion", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 135, 2013, pp. (021801) 1-10.
- [1-18] ALA AMERICAN LIFELINES ALLIANCE, *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe – July 2001 (with addenda through February 2005)*, 2005.

2 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΔΟΚΟΥ ΕΠΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

2.1 ΑΠΕΙΡΟΜΗΚΗΣ ΔΟΚΟΣ ΕΠΙ ΕΔΑΦΟΥΣ

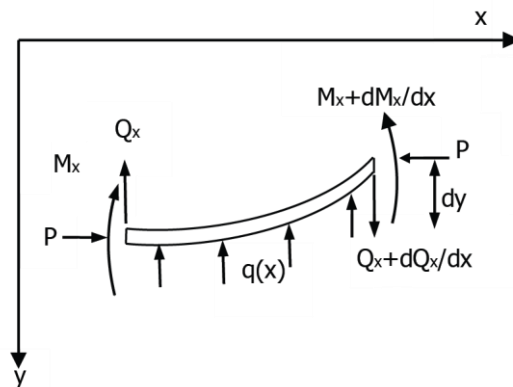
Το μηχανικό μοντέλο που υιοθετείται συνήθως για τη μελέτη του καθολικού λυγισμού υπόγειων αγωγών είναι αυτό της δοκού εδραζόμενης επί εύκαμπτης θεμελίωσης. Αρχικά θα μελετηθεί η περίπτωση της ελαστικής θεμελίωσης με χρήση του προσομοιώματος Winkler για το έδαφος. Το μοντέλο Winkler προσομοιώνει το έδαφος με ανεξάρτητα μετακινησιακά εγκάρσια ελατήρια που στηρίζουν τη δοκό. Η μετακίνηση του ελατηρίου είναι ανάλογη της δυσκαμψίας του. Η υπό μελέτη δοκός Euler-Bernoulli επί ελαστικού εδάφους σταθεράς k υπό σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο P παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1, όπου L είναι το μήκος της δοκού, E το μέτρο ελαστικότητας και I η ροπή αδράνειας της διατομής.



Σχήμα 2-1. Δοκός επί ελαστικού εδάφους

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπολογίζεται διατυπώνοντας τις εξισώσεις ισορροπίας στην παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού αμέσως μετά το λυγισμό. Σύμφωνα με τη γραμμική ανάλυση λυγισμού οι μετατοπίσεις θεωρούνται αρκούντως μικρές ώστε η παραμορφωμένη κατάσταση να μη διαφέρει πολύ από την απαραμόρφωτη, το οποίο ισχύει ικανοποιητικά τη στιγμή αμέσως μετά το λυγισμό. Ένα τμήμα της δοκού στην παραμορφωμένη κατάσταση μαζί με τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2.

Στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2, M_x είναι η καμπτική ροπή στη διατομή x , Q_x η τέμνουσα στη διατομή x , dy η διαφορική βύθιση του φορέα μεταξύ των διατομών x και $x+dx$ και P το θλιπτικό φορτίο που ασκείται στη δοκό. Επίσης, $q(x)$ είναι η δύναμη που ασκούν τα εδαφικά ελατήρια ανά μονάδα μήκους κατά μήκος του αγωγού σύμφωνα με τη σχέση (2-1), όπου $y(x)$ είναι η εγκάρσια μετακίνηση και k η σταθερά που χαρακτηρίζει το έδαφος ως ελαστικό μέσο



Σχήμα 2-2. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος παραμορφωμένου τμήματος δοκού

$$q(x) = ky(x) \quad (2-1)$$

Από το διάγραμμα ελευθέρου σώματος προκύπτουν οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα. Από την εξίσωση ισορροπίας των κατακόρυφων δυνάμεων προκύπτει η σχέση:

$$Q_x - \left(Q_x + \frac{dQ_x}{dx} dx \right) + q(x)dx = 0 \quad (2-2)$$

$$\text{με } \frac{dQ_x}{dx} = q(x) = ky(x) \quad (2-3)$$

Αντίστοιχα η εξίσωση ισορροπίας των καμπτικών ροπών δίνεται από τη σχέση:

$$M_x + p(x)dy + Q_x dx - \left(M_x + \frac{dM_x}{dx} dx \right) + \frac{1}{2} q(x) (dx)^2 = 0 \quad (2-4)$$

Αγνοώντας τους όρους ανωτέρα τάξεως, η εξίσωση (2-4) απλοποιείται ως εξής:

$$Q_x \frac{dM_x}{dx} = -P(x) \frac{dy}{dx} = ky(x) \quad (2-5)$$

Από τις εξισώσεις (2-2) έως (2-5) προκύπτει η διαφορική εξίσωση ισορροπίας της δοκού:

$$\frac{dQ_x}{dx} = \frac{d^2 M_x}{dx^2} - P(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = ky(x) \quad (2-6)$$

Ταυτόχρονα, σύμφωνα με την τεχνική θεωρία της κάμψης και για παραδοχή μικρών μετατοπίσεων, γνωρίζουμε ότι:

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} = -EI \frac{d^4 y}{dx^4} \quad (2-7)$$

και επομένως προκύπτει η διαφορική εξίσωση ισορροπίας της δοκού (2-8):

$$EIy(x)'''' + Py(x)'' + ky(x) = 0 \quad (2-8)$$

Η πολυπλοκότητα της διαφορικής εξίσωσης (2-8) απαιτεί τη χρήση μαθηματικού προγραμματισμού για την εύρεση της γενικής λύσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το εμπορικό λογισμικό MAPLE [2-1]

για την εξαγωγή της γενικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης (2-8), η οποία δίνεται από την εξίσωση (2-9):

$$y(x) = C_1 e^{-\frac{1}{2}\sqrt{-2\alpha^2 - 2\sqrt{\alpha^4 - 16\beta^4}}x} + C_2 e^{\frac{1}{2}\sqrt{-2\alpha^2 - 2\sqrt{\alpha^4 - 16\beta^4}}x} + C_3 e^{-\frac{1}{2}\sqrt{-2\alpha^2 + 2\sqrt{\alpha^4 - 16\beta^4}}x} + C_4 e^{\frac{1}{2}\sqrt{-2\alpha^2 + 2\sqrt{\alpha^4 - 16\beta^4}}x} \quad (2-9)$$

Οι παράμετροι α , β , A και B εισάγονται για την απλοποίηση της παράστασης και παρουσιάζονται στις εξισώσεις (2-10) και (2-11):

$$\alpha^2 = \frac{P}{EI}, \beta^4 = \frac{k}{4EI} \quad (2-10)$$

$$A = \sqrt{\frac{\alpha^2 - \sqrt{\alpha^4 - 16\beta^4}}{2}}, B = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \sqrt{\alpha^4 - 16\beta^4}}{2}} \quad (2-11)$$

Εισάγοντας τις παραμέτρους των εξισώσεων (2-10) και (2-11) στη σχέση (2-9) προκύπτει η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης (2-8) ως ακολούθως:

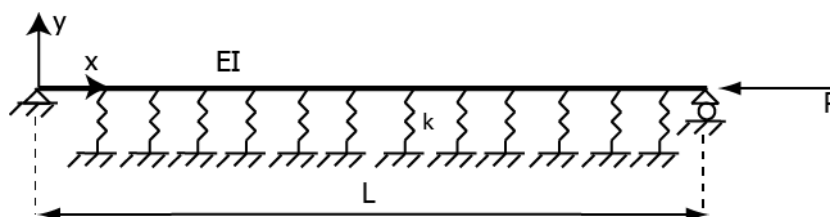
$$y(x) = C_1 \cos Ax + C_2 \sin Ax + C_3 \cos Bx + C_4 \sin Bx \quad (2-12)$$

Οι σταθερές ολοκλήρωσης C_1 , C_2 , C_3 και C_4 υπολογίζονται με εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος. Στις παραγράφους 2.2 και 2.3 μελετώνται οι περιπτώσεις δοκών με συνοριακές συνθήκες αμφιέρειστης και αμφίπακτης δοκού αντίστοιχα.

2.2 ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΔΟΚΟΣ

2.2.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αναλυτική προσέγγιση

Αρχικά μελετάται η περίπτωση της αμφιέρειστης ελαστικής δοκού επί ελαστικού εδάφους υπό σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο P . Η υπό μελέτη δοκός παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3, όπου EI είναι η δυσκαμψία της δοκού, k η εδαφική δυσκαμψία και L το μήκος της δοκού.



Σχήμα 2-3. Αμφιέρειστη δοκός επί ελαστικού εδάφους υπό θλιπτικό φορτίο P

Οι συνοριακές συνθήκες της αμφιέρειστης δοκού περιγράφονται από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$y(0) = y(L) = y''(0) = y''(L) = 0 \quad (2-13)$$

Το σύστημα των εξισώσεων (2-13) με χρήση της εξίσωσης (2-12) λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ \cos AL & \sin AL & \cos BL & \sin BL \\ -A^2 & 0 & -B^2 & 0 \\ -A^2 \cos AL & -A^2 \sin AL & -B^2 \cos BL & -B^2 \sin BL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

Ο μηδενισμός της οριζουσας της σχέσης (2-14) σύμφωνα με τη σχέση (2-15) οδηγεί στην εξίσωση λυγισμού του προβλήματος (2-16), από όπου προκύπτει ο υπολογισμός των φορτίων λυγισμού της δοκού.

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ \cos AL & \sin AL & \cos BL & \sin BL \\ -A^2 & 0 & -B^2 & 0 \\ -A^2 \cos AL & -A^2 \sin AL & -B^2 \cos BL & -B^2 \sin BL \end{bmatrix} = 0 \quad (2-15)$$

$$\text{ή } (A^2 - B^2) \sin AL \sin BL = 0 \quad (2-16)$$

Η εξίσωση (2-16) έχει αναλυτική λύση και από αυτή διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- $A^2 - B^2 = 0$, ενώ με χρήση των εξισώσεων (2-10) προκύπτει $a^4 - 16\beta^4 = 0$, δηλαδή $(P / EI)^2 - 16k / 4EI = 0$, από όπου προκύπτει η λύση:

$$P_{\min} = 2\sqrt{kEI} \quad (2-17)$$

- $\sin AL = 0$ και άρα $AL = n\pi$, για $n=1,2,\dots$. Ο όρος n υποδηλώνει την αντίστοιχη ιδιομορφή του προβλήματος. Υψώνοντας τη σχέση στο τετράγωνο προκύπτει η έκφραση $A^2L^2 = n^2\pi^2$, ενώ χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2-10) και (2-11) προκύπτει η λύση της εξίσωσης (2-16).

$$P_n = \frac{n^2\pi^2EI}{L^2} + \frac{kL^2}{n^2\pi^2}, \text{ ή } P_n = n^2P_{\text{Euler}} + \frac{kL^2}{n^2\pi^2} \quad (2-18)$$

- $\sin BL = 0$ και άρα $BL = n\pi$, για $n=1,2,\dots$. Υψώνοντας στο τετράγωνο προκύπτει $B^2L^2 = n^2\pi^2$, ενώ χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2-10) προκύπτει η λύση (2-18).

Από τη γενική λύση (2-18) της εξίσωσης (2-16) και για τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές, δηλαδή για τιμές της παραμέτρου $n=1, 2, 3, 4$ προκύπτουν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού συναρτήσεως της εδαφικής δυσκαμψίας k , της δυσκαμψίας της δοκού EI και του μήκους της δοκού L . Τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού παρουσιάζονται στις εξισώσεις (2-19) ως (2-22). Η λύση (2-17) δίνει σε κάθε περίπτωση την ελάχιστη από τις λύσεις που προκύπτουν από την γενική λύση (2-18), όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια στο Σχήμα 2-14. Για το λόγο αυτό, τα τέσσερα πρώτα φορτία λυγισμού προκύπτουν από την εξίσωση (2-18), θεωρώντας πως η λύση (2-17) περιλαμβάνεται σε αυτά.

$$P_1 = \frac{\pi^2EI}{L^2} + \frac{kL^2}{\pi^2}, \text{ ή } P_1 = P_{\text{Euler}} + \frac{kL^2}{\pi^2} \quad (2-19)$$

$$P_2 = \frac{4\pi^2EI}{L^2} + \frac{kL^2}{4\pi^2}, \text{ ή } P_2 = 4P_{\text{Euler}} + \frac{kL^2}{4\pi^2} \quad (2-20)$$

$$P_3 = \frac{9\pi^2EI}{L^2} + \frac{kL^2}{9\pi^2}, \text{ ή } P_3 = 9P_{\text{Euler}} + \frac{kL^2}{9\pi^2} \quad (2-21)$$

$$P_4 = \frac{16\pi^2EI}{L^2} + \frac{kL^2}{16\pi^2}, \text{ ή } P_4 = 16P_{\text{Euler}} + \frac{kL^2}{16\pi^2} \quad (2-22)$$

2.2.2 Ιδιομορφές λυγισμού αμφιέριστης δοκού

Για την εύρεση του σχήματος των ιδιομορφών αμφιέριστης δοκού, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2-12). Από την πρώτη και τη δεύτερη συνοριακή συνθήκη της εξίσωσης (2-13), προκύπτει:

$$C_1 + C_3 = 0 \text{ ή } C_1 = -C_3 \quad (2-23)$$

$$-A^2 C_1 - B^2 C_3 = 0 \text{ ή } C_1(B^2 - A^2) = 0 \text{ και άρα } C_1 = C_3 = 0 \text{ ή } B^2 = A^2 \quad (2-24)$$

Στην περίπτωση που $B^2 = A^2$, έχουμε $B=A$ και επομένως, χρησιμοποιώντας τη σχέση (2-23) προκύπτει:

$$y(x) = C_2 \sin Ax + C_4 \sin Ax = (C_2 + C_4) \sin Ax \text{ ή} \quad (2-25)$$

$$y(x) = \sin Ax, \text{ για } B=A$$

εφόσον η ιδιομορφή δεν έχει μέγεθος και ο όρος (C_2+C_4) μπορεί να απαλειφθεί.

Αν $B^2 \neq A^2$, έχουμε $C_1 = C_3 = 0$. Επίσης εφόσον $B^2 \neq A^2$, έχουμε $B \neq A$ και άρα $\sin BL \neq \sin AL$. Από τη δεύτερη συνοριακή συνθήκη προκύπτει:

$$C_2 \sin AL + C_4 \sin BL = 0 \text{ και επομένως } C_2 = -C_4 \frac{\sin BL}{\sin AL} \text{ για } \sin AL \neq 0 \quad (2-26)$$

$$\text{ή } C_4 = -C_2 \frac{\sin AL}{\sin BL} \text{ για } \sin BL \neq 0$$

Επομένως έχουμε την γενική έκφραση που δίνει το σχήμα της ιδιομορφής από την εξίσωση (2-12):

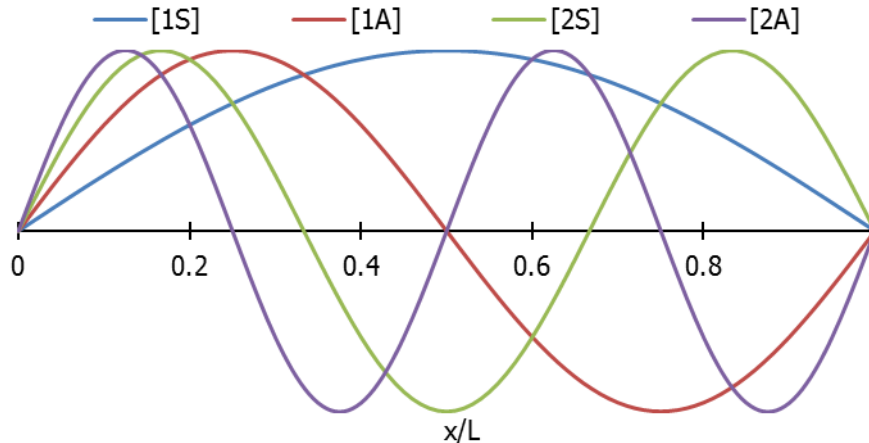
$$y(x) = C_4 \left(\sin Bx - \frac{\sin BL}{\sin AL} \sin Ax \right) \text{ ή } y(x) = C_2 \left(\sin Ax - \frac{\sin AL}{\sin BL} \sin Bx \right)$$

και εφόσον η ιδιομορφή δεν έχει μέγεθος, ο όρος C_4 και αντίστοιχα ο όρος C_2 μπορούν να απαλειφθούν και επομένως προκύπτει:

$$y(x) = \sin Bx - \frac{\sin BL}{\sin AL} \sin Ax \text{ για } \sin AL \neq 0 \quad (2-27)$$

$$y(x) = \sin Ax - \frac{\sin AL}{\sin BL} \sin Bx \text{ για } \sin BL \neq 0 \quad (2-28)$$

Από τη σχέση (2-18) προκύπτουν τα κρίσιμα φορτία της αμφιέριστης δοκού επί ελαστικού εδάφους, συναρτήσει της παραμέτρου n . Αντικαθιστώντας τα φορτία αυτά στην αντίστοιχη παράσταση (2-25), (2-27) ή (2-28), προκύπτουν τα σχήματα της ιδιομορφής που αντιστοιχούν στο κάθε κρίσιμο φορτίο. Για τον προσδιορισμό των σχημάτων προγραμματίζονται οι εξισώσεις (2-18), (2-25), (2-27) και (2-28) στο MATLAB [2-3]. Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται τα σχήματα των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών για $n=1, 2, 3, 4$ καθώς και η αντίστοιχη ονοματολογία που υιοθετείται. Η ονοματολογία βασίζεται στη συμμετρία του σχήματος της ιδιομορφής, δηλαδή εάν αυτό είναι συμμετρικό ή αντισυμμετρικό ως προς το κέντρο της δοκού, καθώς και από την τάξη της ιδιομορφής, ανάλογα την τιμή του αριθμού n . Έτσι, για $n=1$ προκύπτει συμμετρικό σχήμα και άρα υιοθετείται το όνομα [1S], για $n=2$ προκύπτει αντισυμμετρικό σχήμα και υιοθετείται το όνομα [1A], για $n=3$ προκύπτει συμμετρικό σχήμα και υιοθετείται το όνομα [2S] και, τέλος, για $n=4$ έχουμε αντισυμμετρικό σχήμα το οποίο ονομάζεται [2A].



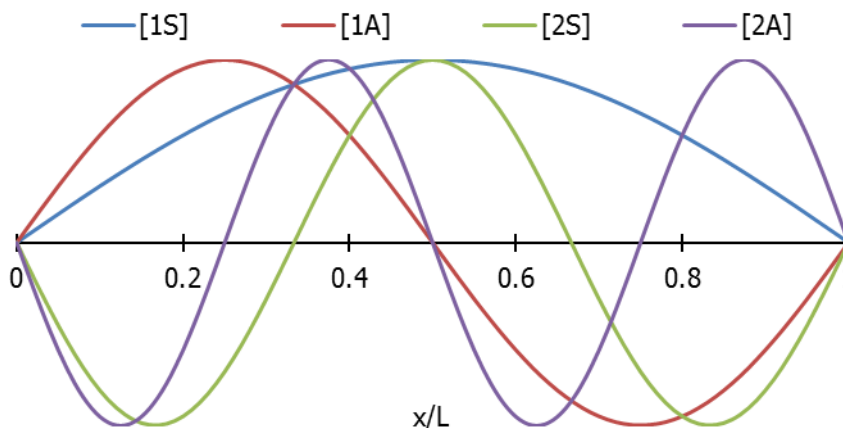
Σχήμα 2-4. Ιδιομορφές λυγισμού αμφιέρειστης δοκού επί ελαστικού εδάφους

2.2.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αριθμητική προσέγγιση

Η περίπτωση της αμφιέρειστης δοκού επί ελαστικού εδάφους μελετάται αριθμητικά με χρήση του εμπορικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA [2-2]. Για το σκοπό αυτό προσομοιώνεται μία συνεχής αμφιέρειστη δοκός, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3. Η δοκός που μελετάται είναι διατομής CHS 33.7x2 και μήκους $L=5\text{m}$, κατασκευασμένη από ελαστικό χάλυβα με μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.30$. Ο φορέας προσομοιώνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements), ενώ το ελαστικό έδαφος Winkler προσομοιώνεται με εγκάρσια μονοαξονικά ελατήρια (spring elements) που συνδέουν τη δοκό με το έδαφος, το οποίο θεωρείται ακλόνητο. Η εδαφική δυσκαμψία λαμβάνεται ίση με 1kN/m . Ο φορέας διακριτοποιείται ανά 0.05m , κατόπιν της ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης. Για τη δοκό που προσομοιώνεται στο ADINA εκτελείται γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (Linearized buckling analysis – LBA), όπου υπολογίζονται οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού και τα αντίστοιχα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Τα κρίσιμα φορτία λυγισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1 ενώ οι ιδιομορφές λυγισμού στο Σχήμα 2-5.

Πίνακας 2-1. Τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού αριθμητικής προσέγγισης

$P_1(\text{kN})$	$P_2(\text{kN})$	$P_3(\text{kN})$	$P_4(\text{kN})$
4.616	8.966	19.04	33.52



Σχήμα 2-5. Ιδιομορφές λυγισμού αμφιέρειστης δοκού – Αριθμητική προσέγγιση

2.2.4 Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων

Για διάφορες τυπικές διατομές του εμπορίου και για δύο διαφορετικές τιμές της εδαφικής δυσκαμψίας υπολογίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μέσω της εξίσωσης (2-18) αλλά και μέσω της γραμμικοποιημένης ανάλυσης λυγισμού (LBA) με χρήση του προγράμματος ADINA. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης των εξισώσεων (2-18) επαληθεύονται μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA [2-2].

Τα αποτελέσματα καθώς και το επί τοις εκατό σφάλμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-2. Σύμφωνα με την τελευταία στήλη του Πίνακα 2-2 που παρουσιάζει το σφάλμα προκύπτει ικανοποιητική ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων συγκριτικά με την αναλυτική λύση.

Πίνακας 2-2. Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής και αριθμητικής προσέγγισης

Διατομή	L(m)	k(kN/m)	Κρίσιμο Φορτίο - Αναλυτική Λύση (kN)	Κρίσιμο Φορτίο - Adina (kN)	ε(%)
CHS33.7x2	5.00	50.00	32.81	32.84	0.08
CHS33.7x2	5.00	500.00	102.72	102.90	0.17
CHS168.3x5	5.00	50.00	836.19	836.40	0.03
CHS168.3x5	5.00	500.00	1976.05	1976.00	0.00
CHS168.3x5	10.00	50.00	683.99	683.90	0.01
NPS12	5.00	50.00	22279.98	22330.00	0.22
NPS12	5.00	500.00	23419.84	23460.00	0.17
NPS12	20.00	50.00	3411.01	3411.00	0.00
NPS12	20.00	500.00	10604.39	10600.00	0.04
NPS20	5.00	50.00	95776.26	95900.00	0.13
NPS20	5.00	500.00	96916.12	97040.00	0.13
NPS36	5.00	50.00	302913.47	307000.00	1.35
NPS36	5.00	500.00	304053.34	308100.00	1.33

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού για δύο διαφορετικές περιπτώσεις διατομής και εδαφικής δυσκαμψίας, καθώς και τα σχήματα ιδιομορφών που προκύπτουν από επίλυση και με τις δύο μεθόδους. Οι δύο περιπτώσεις σύγκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3. Περιπτώσεις σύγκρισης αναλυτικής και αριθμητικής λύσης

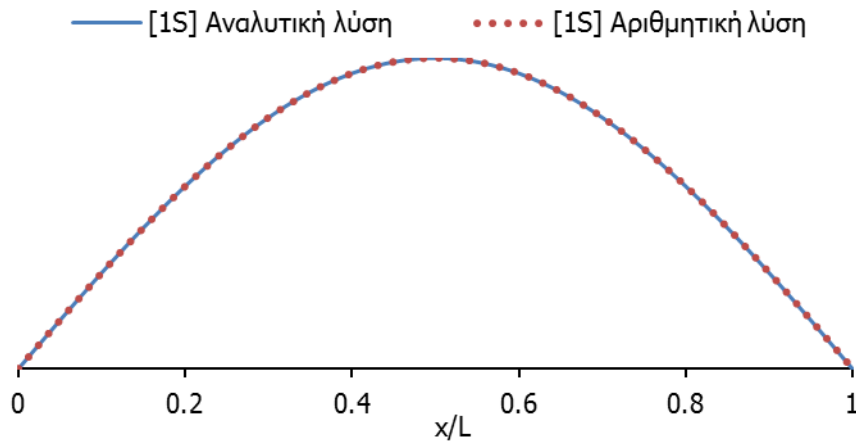
Περίπτωση	Διατομή	L(m)	R(mm)	t(mm)	E(GPa)	I(cm ⁴)	k(kN/m)
1	CHS33.7x2	5	33.7	2	210	2.5118	1
2	CHS168.3x5	5	168.3	5	210	855.85	10

Για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται αποτελέσματα σε πίνακα που δείχνει την σύγκριση των 4 πρώτων φορτίων λυγισμού καθώς και σε σχήματα που δείχνουν την σύγκριση των σχημάτων των αντίστοιχων ιδιομορφών. Παρατηρείται πλήρης ταύτιση των σχημάτων των ιδιομορφών καθώς και μικρό σφάλμα ακόμα και για μεγαλύτερης τάξης κρίσιμα φορτία.

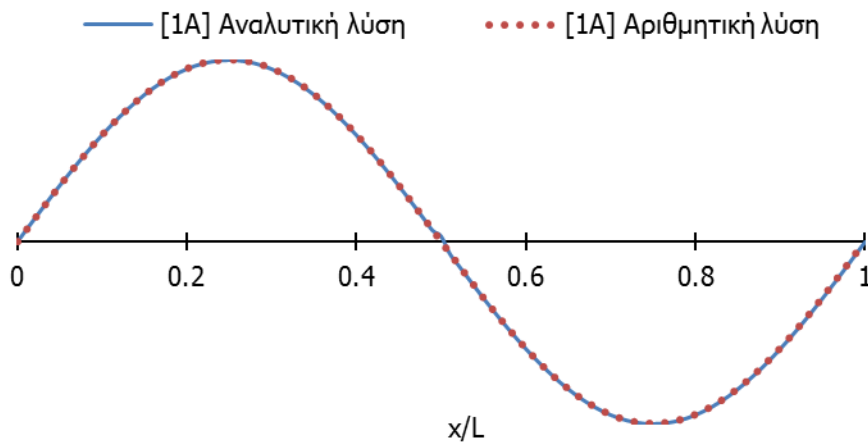
– Περίπτωση 1

Πίνακας 2-4. Σύγκριση τεσσάρων πρώτων κρίσιμων φορτίων περίπτωσης 1

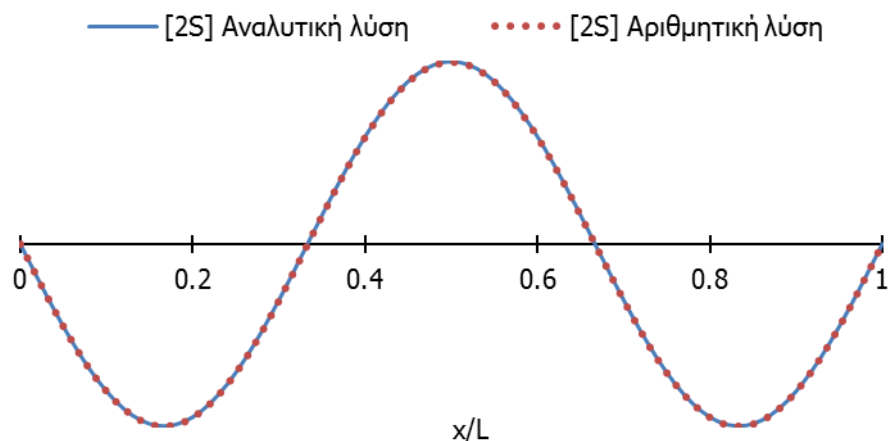
	P_1 (kN)	P_2 (kN)	P_3 (kN)	P_4 (kN)
Αναλυτική Λύση	4.615	8.963	19.023	33.477
Αριθμητική Λύση (ADINA)	4.616	8.966	19.040	33.520
ϵ (%)	-0.012	-0.035	-0.089	-0.129



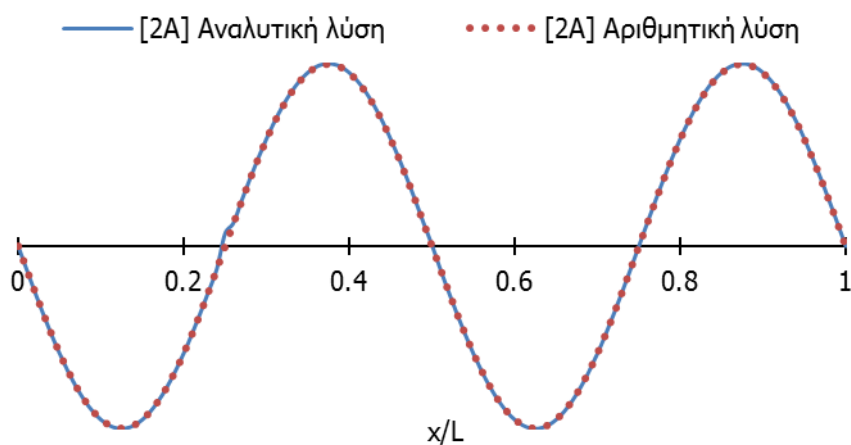
Σχήμα 2-6. Σύγκριση σχημάτων πρώτης ιδιομορφής για την περίπτωση 1



Σχήμα 2-7. Σύγκριση σχημάτων δεύτερης ιδιομορφής για την περίπτωση 1



Σχήμα 2-8. Σύγκριση σχημάτων τρίτης ιδιομορφής για την περίπτωση 1

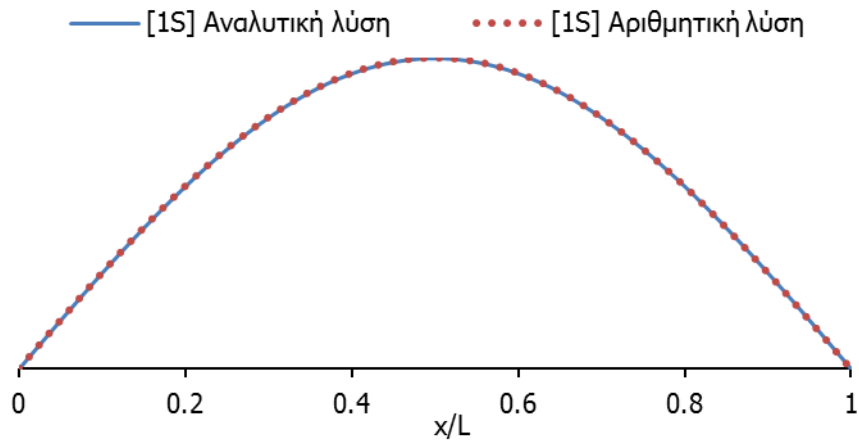


Σχήμα 2-9. Σύγκριση σχημάτων τέταρτης ιδιομορφής για την περίπτωση 1

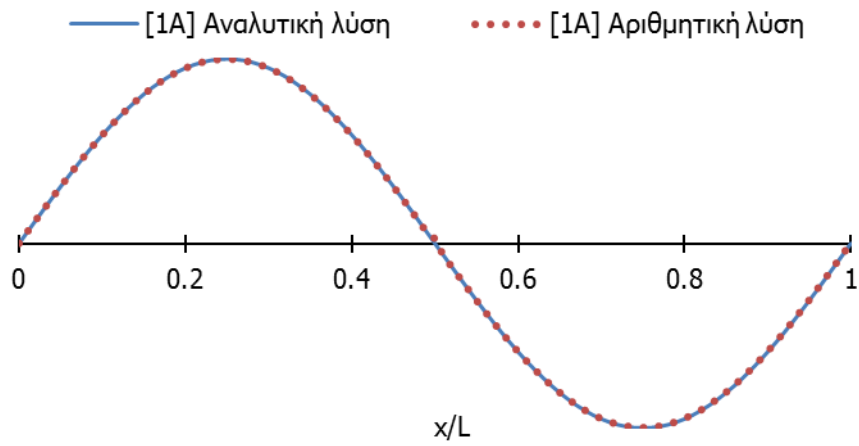
– Περίπτωση 2

Πίνακας 2-5. Σύγκριση τεσσάρων πρώτων κρίσιμων φορτίων περίπτωσης 2

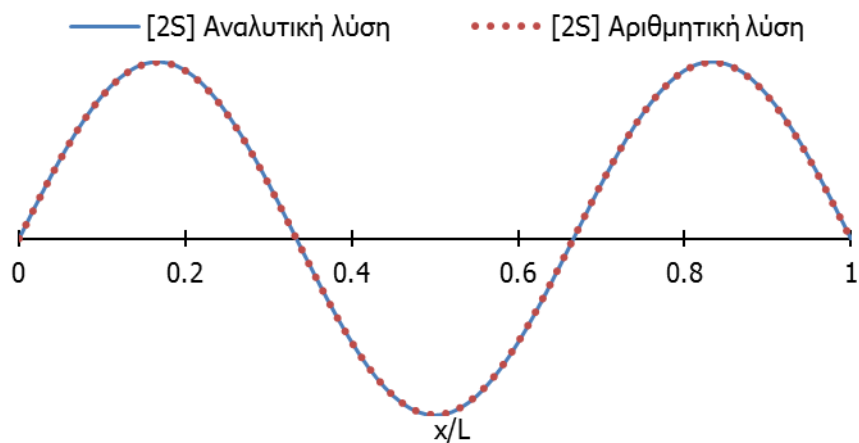
	P_1 (kN)	P_2 (kN)	P_3 (kN)	P_4 (kN)
Αναλυτική Λύση	734.87	2844.49	6388.67	11354.22
Αριθμητική Λύση (ADINA)	735.10	2846.00	6395.00	11371.00
ϵ (%)	-0.03	-0.05	-0.10	-0.15



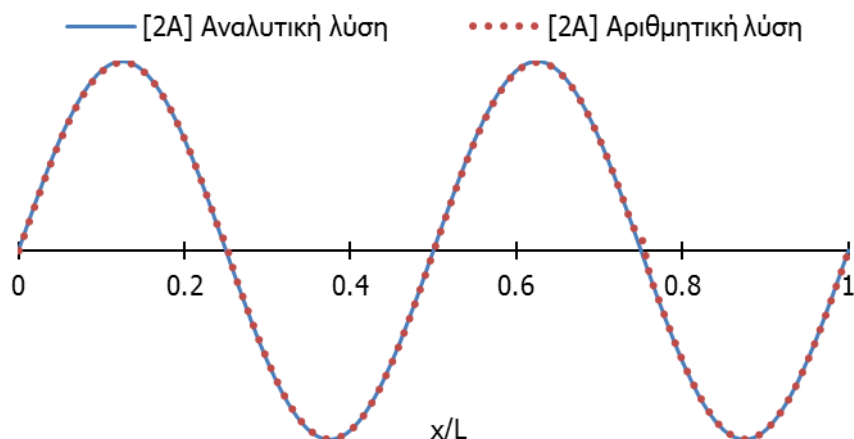
Σχήμα 2-10. Σύγκριση σχημάτων πρώτης ιδιομορφής για την περίπτωση 2



Σχήμα 2-11. Σύγκριση σχημάτων δεύτερης ιδιομορφής για την περίπτωση 2



Σχήμα 2-12. Σύγκριση σχημάτων τρίτης ιδιομορφής για την περίπτωση 2



Σχήμα 2-13. Σύγκριση σχημάτων τέταρτης ιδιομορφής για την περίπτωση 2

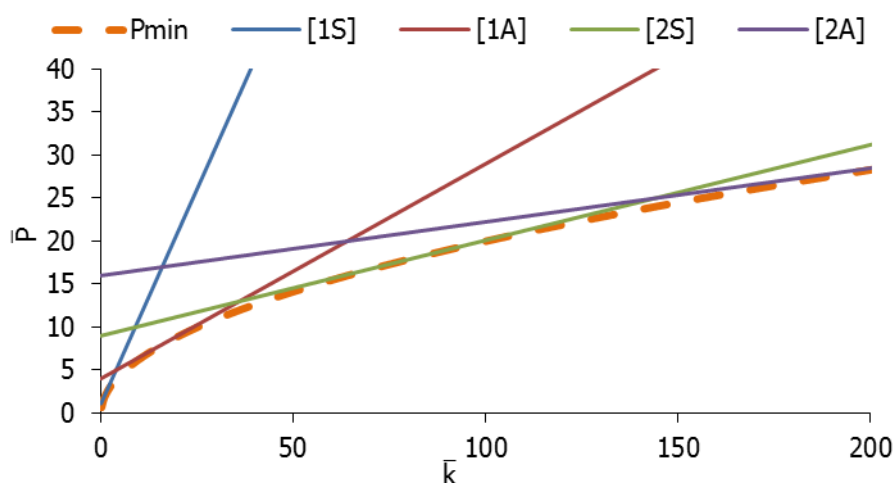
2.2.5 Μετάθεση ιδιομορφών

Η γραφική παράσταση των εξισώσεων (2-17) και (2-19) έως (2-22) στο Σχήμα 2-14 παρουσιάζει τη σχέση της εδαφικής δυσκαμψίας σε σχέση με τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού, όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το αδιαστατοποιημένο φορτίο \bar{P} σύμφωνα με τις σχέσεις (2-29) και (2-30) ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη εδαφική δυσκαμψία \bar{k} , σύμφωνα με τη σχέση (2-31).

$$\bar{P} = \frac{P}{P_{\text{Euler}}} \quad (2-29)$$

$$P_{\text{Euler}} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2-30)$$

$$\bar{k} = \frac{kL^4}{EI\pi^4} \quad (2-31)$$



Σχήμα 2-14. Σχέση αδιαστατοποιημένης εδαφικής δυσκαμψίας και αδιαστατοποιημένων κρίσιμων φορτίων

Από το Σχήμα 2-14 προκύπτει μετάθεση της κρίσιμης ιδιομορφής λυγισμού με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας. Εξισώνοντας τις σχέσεις (2-19) και (2-20), προκύπτει η πρώτη μετάθεση της κρίσιμης ιδιομορφής, από το σχήμα [1S] στο σχήμα [1A].

$$P_1 = P_2 \quad \text{ή} \quad \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{\pi^2} = 4 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{4\pi^2} \quad \text{ή} \quad \frac{kL^4}{EI\pi^4} = \bar{k} = 4 \quad (2-32)$$

Με αντίστοιχη διαδικασία εξίσωσης των φορτίων, προκύπτουν οι τιμές της αδιαστατοποιημένης εδαφικής δυσκαμψίας στις οποίες συμβαίνει μετάθεση της κρίσιμης ιδιομορφής λυγισμού.

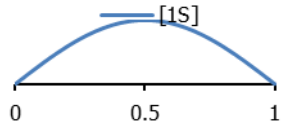
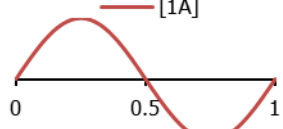
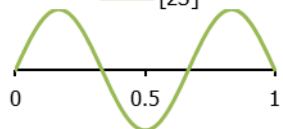
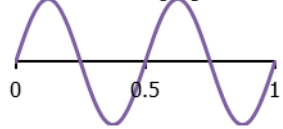
$$P_2 = P_3 \quad \text{ή} \quad 4 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{4\pi^2} = 9 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{9\pi^2} \quad \text{ή} \quad \frac{kL^4}{EI\pi^4} = \bar{k} = 36 \quad (2-33)$$

$$P_3 = P_4 \quad \text{ή} \quad 9 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{9\pi^2} = 16 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{16\pi^2} \quad \text{ή} \quad \frac{kL^4}{EI\pi^4} = \bar{k} = 144 \quad (2-34)$$

$$P_4 = P_5 \quad \text{ή} \quad 16 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{16\pi^2} = 25 \frac{\pi^2 EI}{L^2} + \frac{kL^2}{25\pi^2} \quad \text{ή} \quad \frac{kL^4}{EI\pi^4} = \bar{k} = 400 \quad (2-35)$$

Βάσει των ανωτέρω ορίζονται οι ακόλουθες περιοχές, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-6

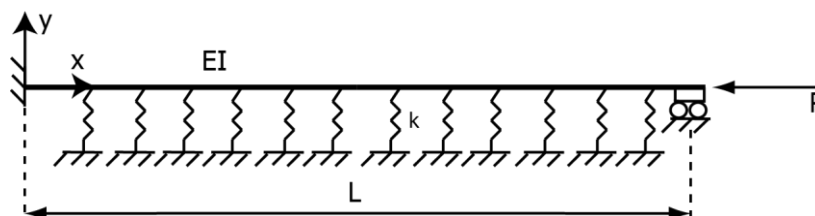
Πίνακας 2-6. Περιοχές κρίσιμων ιδιομορφών αμφιέριστης δοκού

Περιοχή	Εύρος τιμών εδαφικής δυσκαμψίας \bar{k}	Κρίσιμη ιδιομορφή
A	(0,4)	
B	(4,36)	
Γ	(36,144)	
Δ	(144,400)	

2.3 ΑΜΦΙΠΑΚΤΗ ΔΟΚΟΣ

2.3.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αναλυτική προσέγγιση

Στη συνέχεια μελετάται η περίπτωση της αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους Winkler υπό σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο P . Η υπό μελέτη δοκός παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-15 όπου EI είναι η δυσκαμψία της δοκού, k η ελαστική εδαφική δυσκαμψία και L το μήκος της δοκού.



Σχήμα 2-15. Αμφίπακτη δοκός επί εδάφους Winkler

Οι συνοριακές συνθήκες της αμφίπακτης δοκού περιγράφονται από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$y(0) = y(L) = y'(0) = y'(L) = 0 \quad (2-36)$$

Το σύστημα των εξισώσεων (2-36) λαμβάνει την μορφή:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ \cos AL & \sin AL & \cos BL & \sin BL \\ 0 & A & 0 & B \\ -A \sin AL & A \cos AL & -B \sin BL & B \cos BL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

Ο μηδενισμός της οριζουσας σύμφωνα με τη σχέση (2-38) οδηγεί στην εξίσωση λυγισμού του προβλήματος (2-39), από όπου προκύπτει ο υπολογισμός των φορτίων λυγισμού.

$$\det \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ \cos AL & \sin AL & \cos BL & \sin BL \\ 0 & A & 0 & B \\ -A \sin AL & A \cos AL & -B \sin BL & B \cos BL \end{vmatrix} = 0 \quad (2-38)$$

$$(A^2 + B^2) \sin AL \sin BL + 2AB(\cos AL \cos BL - 1) = 0 \quad (2-39)$$

2.3.2 Ιδιομορφές λυγισμού αμφίπακτης δοκού

Για την εύρεση του σχήματος των ιδιομορφών αμφίπακτης δοκού, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2-12). Από την πρώτη, την τρίτη και την τέταρτη συνοριακή συνθήκη του συστήματος (2-36), προκύπτει:

$$C_1 + C_3 = 0 \quad \text{ή} \quad C_1 = -C_3 \quad (2-40)$$

$$AC_2 + BC_4 = 0 \quad \text{ή} \quad C_2 = -\frac{B}{A}C_4 \quad (2-41)$$

$$-AC_1 \sin AL + AC_2 \cos AL - BC_3 \sin BL + BC_4 \cos BL = 0 \quad \text{ή}$$

$$C_3 = -\frac{B \cos BL - B \cos AL}{A \sin AL - B \sin BL} C_4 = -WC_4 \quad \text{για} \quad A \sin AL \neq B \sin BL \quad (2-42)$$

Αν $A \sin AL = B \sin BL$ τότε διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- $C_4 = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \Rightarrow y(x) = C_1 \cos Ax + C_3 \cos Bx \Rightarrow y(x) = C_1 (\cos Ax - \cos Bx)$.
- $\cos BL = \cos AL$, και με χρήση της δεύτερης συνοριακής συνθήκης προκύπτει $\sin AL = 0$ που αντικατοπτρίζει τα φορτία λυγισμού της αμφιέριστης και επομένως απορρίπτεται.

Εφόσον η ιδιομορφή δεν έχει μέγεθος, ο όρος C_1 στην παράσταση $y(x) = C_1 (\cos Ax - \cos Bx)$ μπορεί να απαλειφθεί και προκύπτει:

$$y(x) = \cos Ax - \cos Bx \quad (2-43)$$

Αν $A \sin AL \neq B \sin BL$, με αντικατάσταση των σχέσεων (2-40), (2-41) και (2-42) στην εξίσωση (2-12), προκύπτει η παράσταση που δίνει το σχήμα ιδιομορφής της αμφίπακτης δοκού:

$$y(x) = C_4 \left(W \cos Ax - \frac{B}{A} \sin Ax - W \cos Bx + \sin Bx \right)$$

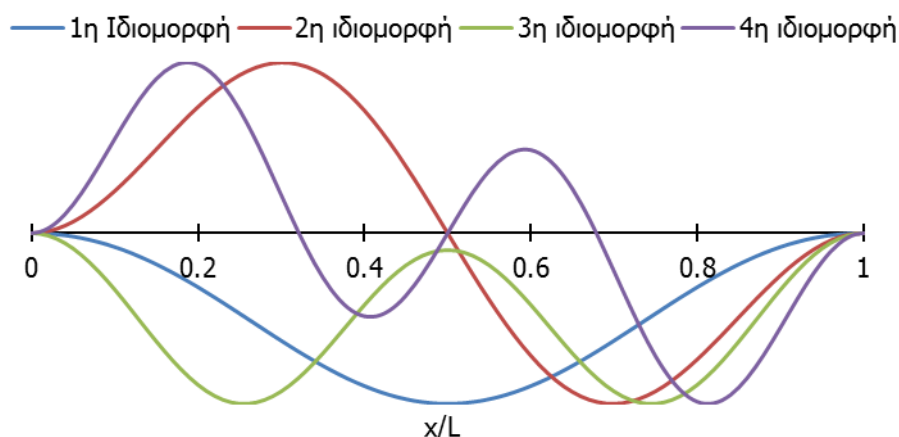
Εφόσον η ιδιομορφή δεν έχει μέγεθος, ο όρος C_4 μπορεί να απαλειφθεί. Έτσι, η παράσταση που δίνει το σχήμα της ιδιομορφής συναρτήσει της εδαφικής δυσκαμψίας και του επιβαλλόμενου φορτίου δίνεται από την σχέση (2-44):

$$y(x) = W \cos Ax - \frac{B}{A} \sin Ax - W \cos Bx + \sin Bx, \quad W = \frac{B \cos BL - B \cos AL}{A \sin AL - B \sin BL} \quad (2-44)$$

Η εξίσωση μηδενισμού τις ορίζουσας των συνοριακών συνθηκών (2-39) δεν έχει κλειστή αναλυτική λύση καθώς είναι έντονα μη-γραμμική και επομένως προκειμένου να αποφευχθούν πολύπλοκες μαθηματικές μέθοδοι επίλυσης εφαρμόζεται η επίλυση μέσω δοκιμών με προγραμματισμό στο MATLAB [2-3]. Έτσι, δημιουργείται αλγόριθμος ο οποίος για διάφορες τιμές τις εδαφικής δυσκαμψίας υπολογίζει τα 4 πρώτα φορτία λυγισμού με εύρεση των τεσσάρων πρώτων θετικών λύσεων ως προς P της εξίσωσης (2-39) καθώς και το σχήμα τις ιδιομορφής που αντιστοιχεί στο καθένα, σύμφωνα με τις σχέσεις (2-43) και (2-44). Έτσι, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για τις ιδιομορφές λυγισμού και τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία για μία περίπτωση αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους. Η δοκός που μελετάται είναι διατομής CHS 33.7x2 και μήκους $L=5m$. Η δοκός είναι κατασκευασμένη από ελαστικό χάλυβα με μέτρο ελαστικότητας $E=210GPa$ και λόγο Poisson $\nu=0.30$, ενώ η εδαφική δυσκαμψία λαμβάνεται ίση με $2kN/m$.

Πίνακας 2-7. Φορτία λυγισμού από αναλυτική επίλυση

$P_1(kN)$	$P_2(kN)$	$P_3(kN)$	$P_4(kN)$
12.04	18.07	34.33	50.72



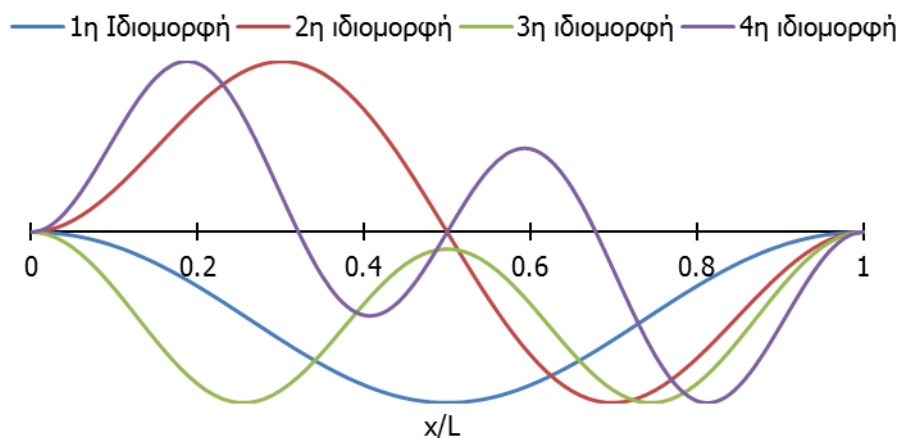
Σχήμα 2-16. Ιδιομορφές λυγισμού από επίλυση εξίσωσης λυγισμού

2.3.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού – Αριθμητική προσέγγιση

Η περίπτωση της αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους μελετάται αριθμητικά μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για το σκοπό αυτό προσομοιώνεται μία συνεχής αμφίπακτη δοκός, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-15. Η δοκός που μελετάται είναι ίδιων χαρακτηριστικών με την δοκό που μελετήθηκε στην παράγραφο 2.3.2. Ο φορέας προσομοιώνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements), ενώ το ελαστικό έδαφος Winkler προσομοιώνεται με εγκάρσια μονοαξονικά ελατήρια (spring elements) που συνδέουν τη δοκό με το έδαφος, το οποίο θεωρείται ακλόνητο. Ο φορέας διακριτοποιείται ανά 0.05m, κατόπιν της ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης. Για τη δοκό που προσομοιάζεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων εκτελείται γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (Linearized buckling analysis – LBA), όπου ζητούνται τα 4 πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού καθώς και τα αντίστοιχα σχήματα των ιδιομορφών. Τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-8 ενώ οι ιδιομορφές λυγισμού στο Σχήμα 2-17.

Πίνακας 2-8. Φορτία λυγισμού από αριθμητική επίλυση

P_1 (kN)	P_2 (kN)	P_3 (kN)	P_4 (kN)
12.05	18.09	34.39	50.83



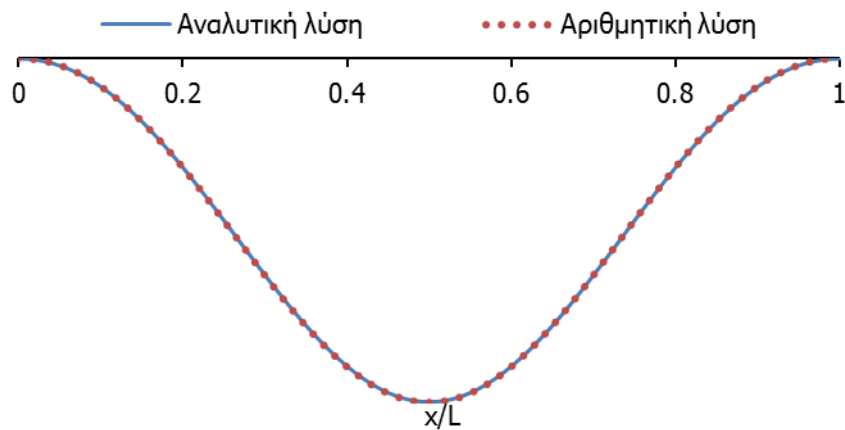
Σχήμα 2-17. Ιδιομορφές λυγισμού από αριθμητική επίλυση

2.3.4 Σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων

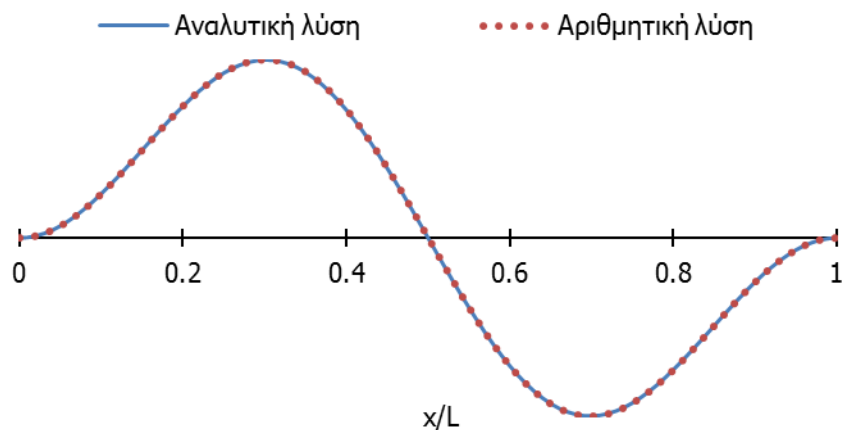
Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων τόσο της αναλυτικής προσέγγισης όσο και της αριθμητικής προσέγγισης, όπως παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 2.3.2 και 2.3.3, γίνεται η σύγκριση των τεσσάρων πρώτων κρίσιμων φορτίων καθώς και των αντίστοιχων σχημάτων των ιδιομορφών όπως προκύπτουν από τις δύο αυτές εναλλακτικές προσεγγίσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο Πίνακας 2-9 που δείχνει την απόκλιση των κρίσιμων φορτίων της κάθε μεθόδου καθώς και τα σχήματα των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών των δύο προσεγγίσεων σε κοινά διαγράμματα. Παρατηρείται πλήρης ταύτιση των σχημάτων των ιδιομορφών καθώς και μικρό σφάλμα ακόμα και για τα μεγαλύτερης τάξης κρίσιμα φορτία.

Πίνακας 2-9. Σύγκριση τεσσάρων πρώτων κρίσιμων φορτίων

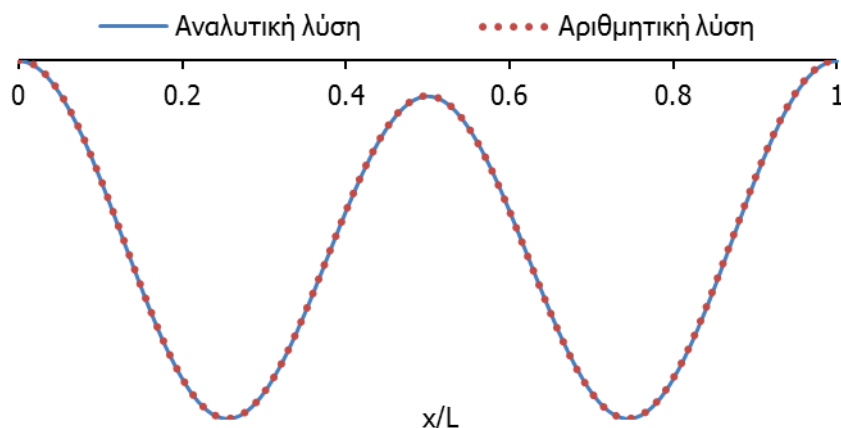
	P_1 (kN)	P_2 (kN)	P_3 (kN)	P_4 (kN)
Αναλυτική Λύση	12.04	18.07	34.33	50.72
Λύση Adina	12.05	18.09	34.39	50.83
ϵ (%)	-0.079	-0.111	-0.165	-0.219



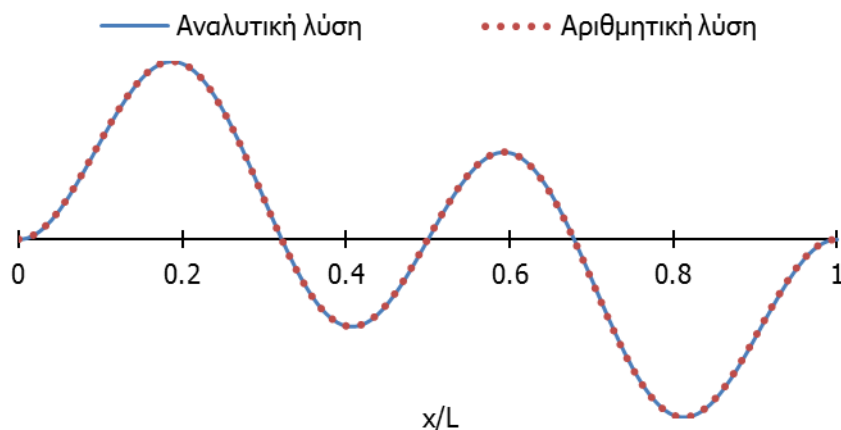
Σχήμα 2-18. Σύγκριση σχημάτων πρώτης ιδιομορφής



Σχήμα 2-19. Σύγκριση σχημάτων δεύτερης ιδιομορφής



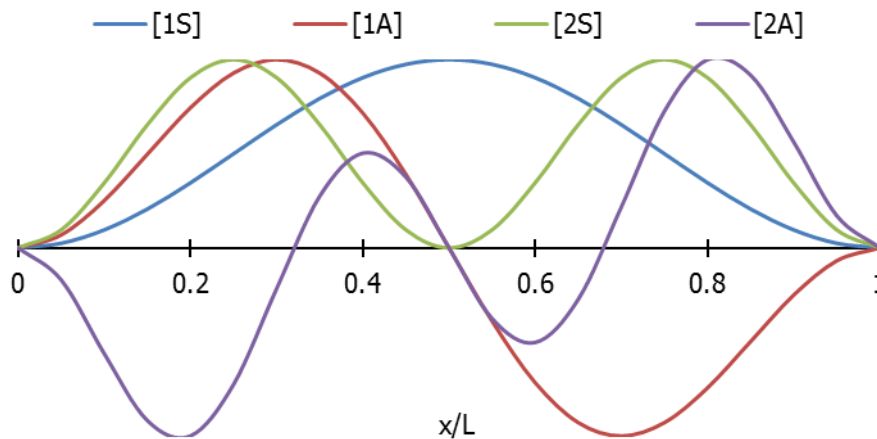
Σχήμα 2-20. Σύγκριση σχημάτων τρίτης ιδιομορφής



Σχήμα 2-21. Σύγκριση σχημάτων τέταρτης ιδιομορφής

2.3.5 Μετάθεση ιδιομορφών

Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για τον υπολογισμό κρίσιμων φορτίων και ιδιομορφών λυγισμού στο MATLAB, προκύπτει ότι στην αμφίπακτη δοκό επί εδάφους Winkler παρατηρείται μια μετατροπή του σχήματος των ιδιομορφών με αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας. Για το λόγο αυτό εισάγεται η ακόλουθη ονοματολογία με βάση τα σχήματα των ιδιομορφών αμφίπακτης δοκού χωρίς έδαφος, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-22. Η ονοματολογία των ιδιομορφών αμφίπακτης δοκού χωρίς έδαφος προκύπτει και σε αυτή την περίπτωση από το σχήμα της ιδιομορφής, δηλαδή εάν αυτό είναι συμμετρικό ή αντισυμμετρικό ως προς το κέντρο της δοκού, καθώς και από την τάξη της ιδιομορφής, ανάλογα την τιμή του αριθμού n . Έτσι, για $n=1$ προκύπτει συμμετρικό σχήμα και άρα υιοθετείται το όνομα [1S], για $n=2$ προκύπτει αντισυμμετρικό σχήμα και υιοθετείται το όνομα [1A], για $n=3$ προκύπτει συμμετρικό σχήμα και υιοθετείται το όνομα [2S] και, τέλος, για $n=4$ έχουμε αντισυμμετρικό σχήμα το οποίο ονομάζεται [2A].

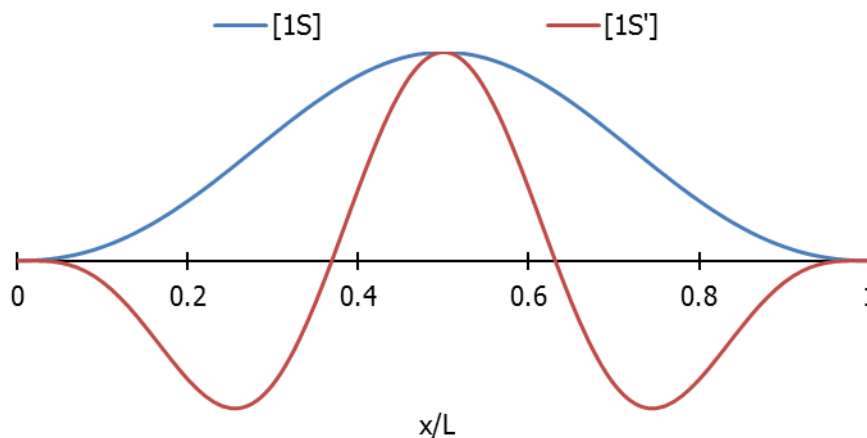


Σχήμα 2-22. Ιδιομορφές λυγισμού αμφίπακτης δοκού

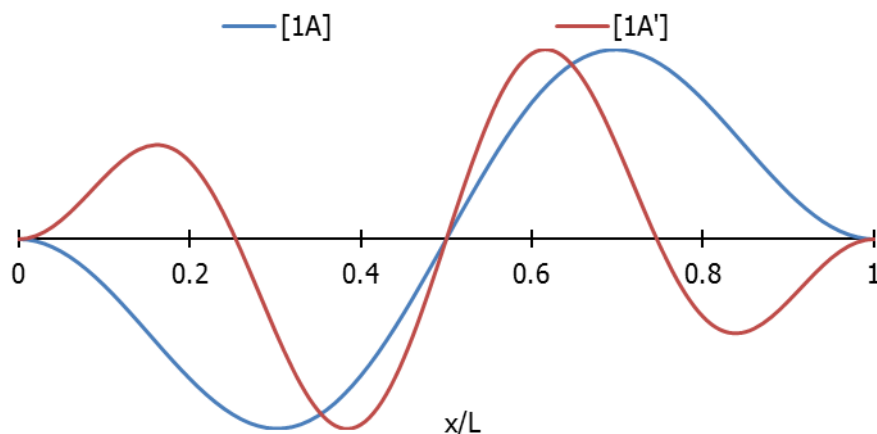
Στον Πίνακα 2-10 και στα σχήματα Σχήμα 2-23 έως Σχήμα 2-26 παρουσιάζεται η ονοματολογία των ιδιομορφών που εισάγεται. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση τον αριθμό των σημείων στα οποία το σχήμα της ιδιομορφής μηδενίζεται εσωτερικά των στηρίξεων. Επομένως, για επιπλέον σημεία μηδενισμού της ιδιομορφής [1S] υιοθετείται το όνομα [1S'], όπως παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 2-23, ενώ αντίστοιχα ονομάζονται και οι ιδιομορφές [1A'], [2S'] και [2A'].

Πίνακας 2-10. Ονοματολογία Ιδιομορφών

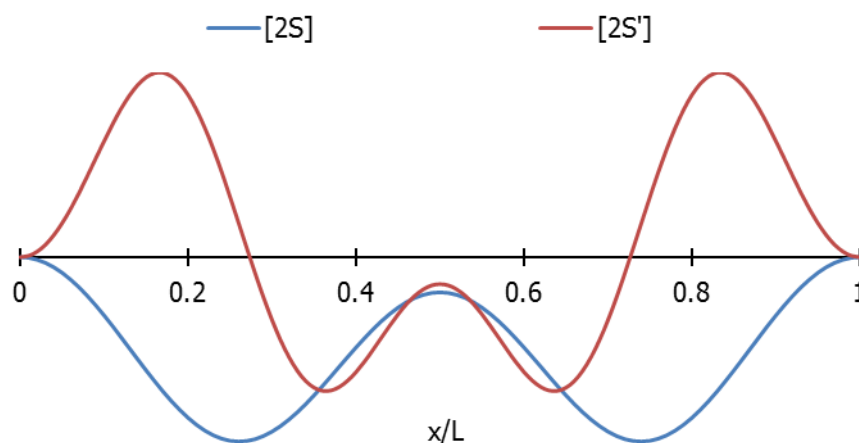
Όνομα Ιδιομορφής	Σχήμα αμφίπακτης χωρίς ελατήρια	Εσωτερικά Σημεία Μηδενισμού
[1S]	[1S]	0
[1S']	[1S]	2
[1A]	[1A]	1
[1A']	[1A]	3
[2S]	[2S]	0
[2S']	[2S]	2
[2A]	[2A]	3
[2A']	[2A]	5



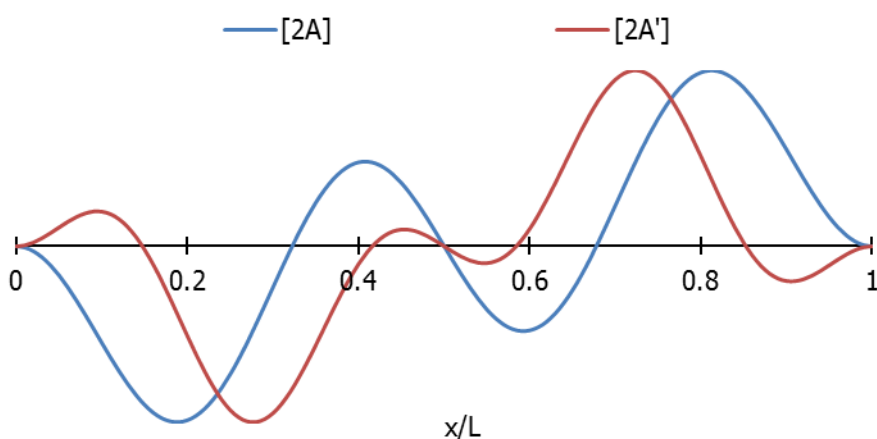
Σχήμα 2-23. Ιδιομορφές λυγισμού [1S] και [1S']



Σχήμα 2-24. Ιδιομορφές λυγισμού [1A] και [1A']



Σχήμα 2-25. Ιδιομορφές λυγισμού [2S] και [2S']



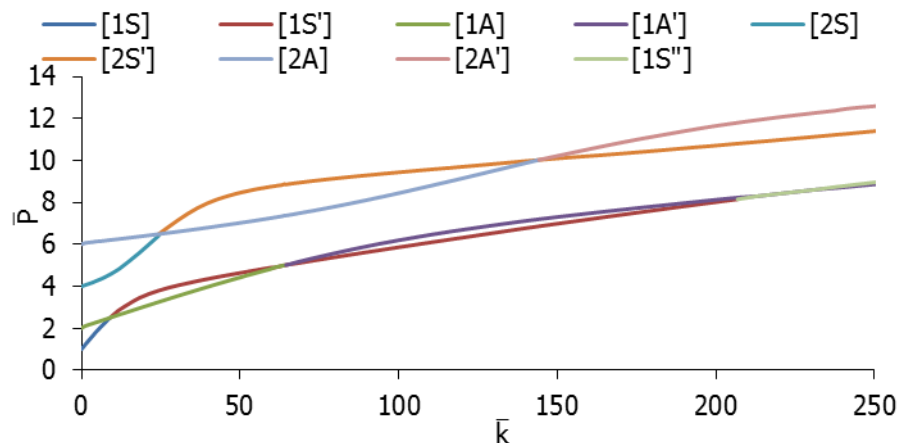
Σχήμα 2-26. Ιδιομορφές λυγισμού [2A] και [2A']

Μετά τις παραμετρικές αναλύσεις που γίνονται στο MATLAB, και σε πλήρη αντιστοιχία με την αμφιέρειστη δοκό, δημιουργούνται οι γραφικές παραστάσεις που δείχνουν τη σχέση της εδαφικής δυσκαμψίας με τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-27 όπου στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το αδιαστατοποιημένο φορτίο σύμφωνα με τις Σχέσεις (2-45) και (2-46) ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη εδαφική

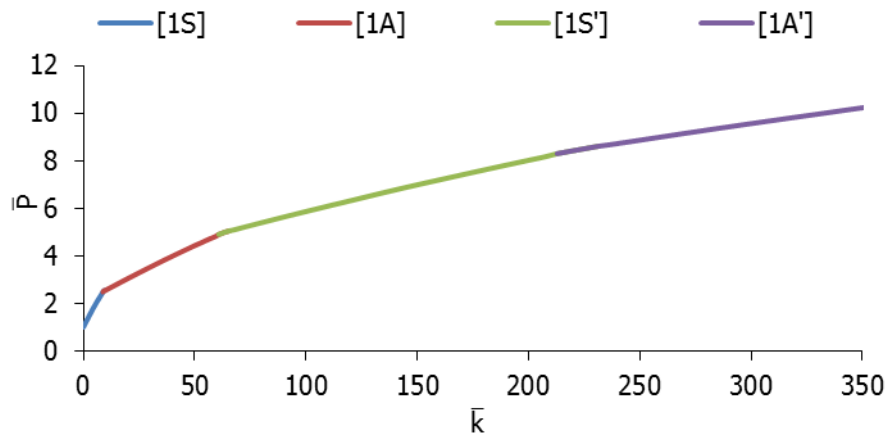
δυσκαμψία σε εύρος 0 έως 250, σύμφωνα με τη σχέση (2-31). Τέλος, στο Σχήμα 2-28 παρουσιάζεται η κρίσιμη ιδιομορφή λυγισμού στο ίδιο εύρος εδαφικής δυσκαμψίας.

$$P_{\text{Euler, Αμφίπακτης}} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (2-45)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{P_{\text{Euler, Αμφίπακτης}}} \quad (2-46)$$



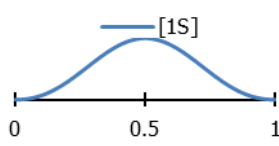
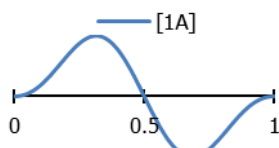
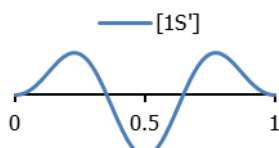
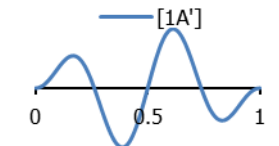
Σχήμα 2-27. Φορτία λυγισμού τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών λυγισμού σε σχέση με την εδαφική δυσκαμψία



Σχήμα 2-28. Σχέση αδιαστατοποιημένης εδαφικής δυσκαμψίας και αδιαστατοποιημένου κρίσιμου φορτίου

Η παρουσία του ελαστικού εδάφους επί του οποίου εδράζεται η δοκός οδηγεί σε μετάθεση των κρίσιμων ιδιομορφών με την αύξηση της δυσκαμψίας του εδάφους k , όπως συμβαίνει και στην αμφιέριστη δοκό. Σε αντίθεση με την αμφιέριστη δοκό, όπου όλα τα σχήματα των ιδιομορφών λυγισμού γίνονται κρίσιμα με την προοδευτική αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας, στην αμφίπακτη δοκό υπάρχει μια διαρκής μετάβαση από μία συμμετρική σε μία αντισυμμετρική κρίσιμη ιδιομορφή λυγισμού με αύξηση των αντιστοιχών εσωτερικών σημείων μηδενισμού, άλλα πάντα με βάση τα σχήματα [1S] και [1A]. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, ορίζονται οι ακόλουθες περιοχές σύμφωνα με τον Πίνακα 2-11.

Πίνακας 2-11. Περιοχές κρίσιμων ιδιομορφών αμφίπακτης δοκού

Περιοχή	Εύρος τιμών εδαφικής δυσκαμψίας	Κρίσιμη ιδιομορφή
A	(0,9)	
B	(9,64)	
Γ	(64,225)	
Δ	(225,576)	

2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετήθηκε αναλυτικά και αριθμητικά η λυγισμική συμπεριφορά δοκού επί ελαστικού εδάφους σαν μία πρώτη προσέγγιση του φαινομένου του καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις τόσο της αμφιέρειστης όσο και της αμφίπακτης δοκού. Τόσο στην αναλυτική προσέγγιση όσο και στην αριθμητική επίλυση υπολογίστηκαν τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία λυγισμού καθώς και τα σχήματα των αντίστοιχων ιδιομορφών. Στη συνέχεια έγινε η σύγκριση των δύο αυτών επιλύσεων όπου προέκυψε πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων, τόσο στις τιμές των κρίσιμων φορτίων όσο και στα σχήματα των ιδιομορφών. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η εδαφική δυσκαμψία επηρεάζει τα κρίσιμα φορτία λυγισμού καθώς με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας παρατηρείται αύξηση των κρίσιμων φορτίων λυγισμού. Παρατηρείται, όμως, μικρότερη επιρροή της αύξησης της εδαφικής δυσκαμψίας στις ανώτερες ιδιομορφές. Τέλος, μελετήθηκε το φαινόμενο της μετάθεσης των κρίσιμων ιδιομορφών λυγισμού καθώς και της μετατροπής του σχήματος αυτών, στην περίπτωση της αμφίπακτης δοκού, με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας.

2.5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[2-1] Maple 15.00 (2011), Waterloo Maple Inc.

[2-2] ADINA R & D Inc. (2006), "Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA, Report AED 06-7.

[2-3] MATLAB 6.1, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2000

3 ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΔΟΚΟΥ ΕΠΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η απώλεια της ευστάθειας μιας κατασκευής θέτει σε κίνδυνο την ικανότητα της να παραλάβει τα φορτία για τα οποία είναι μελετημένη. Σε φορείς δε που ο λυγισμός είναι μια πιθανή μορφή αστοχίας, ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα του φορέα να παραλάβει φορτία στην κατάσταση μετά τον λυγισμό, δηλαδή κατά πόσο ο φορέας παρουσιάζει ασταθή η ευσταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά. Επομένως, το πρόβλημα της δοκού επί ελαστικού εδάφους όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2 αναλύεται στο κεφάλαιο 3 με μη-γραμμικές αναλύσεις οι οποίες έχουν σκοπό τη μελέτη της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του φορέα. Έτσι, εξετάζεται μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες η λυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά της αμφιέρειστης και της αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους.

3.1 ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΔΟΚΟΣ

3.1.1 Δεδομένα αναλύσεων

Μελετάται η λυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά μιας αμφιέρειστης δοκού επί ελαστικού εδάφους με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA [3-1]. Η δοκός που μελετάται είναι διατομής CHS 33.7x2 και μήκους $L=5\text{m}$. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ελαστικός χάλυβας, με μέτρο Ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.30$. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της υπό εξέταση δοκού χωρίς εδαφικά ελατήρια προκύπτει ίσο με $P_{cr}=\pi^2EI/L^2=2.0824\text{kN}$.

Ο φορέας προσομοιώνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements), ενώ το ελαστικό έδαφος Winkler προσομοιώνεται με εγκάρσια μονοαξονικά ελατήρια (spring elements) που συνδέουν τη δοκό με το έδαφος, το οποίο θεωρείται ακλόνητο. Ο φορέας διακριτοποιείται ανά 0.05m , κατόπιν ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης.

Ο τύπος της ανάλυσης που πραγματοποιείται είναι μη-γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (Geometrically nonlinear imperfection analysis - GNIA), ενώ στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος arc-length (collapse). Στη GNIA οι εξισώσεις ισορροπίας διατυπώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Η GNIA ανάλυση δύναται να περιγράψει τόσο τη λυγισμική, όσο και τη μεταλυγισμική συμπεριφορά κατασκευών που είναι ευπαθείς σε λυγισμό.

Επιλέγονται τέσσερις περιπτώσεις εδαφικής δυσκαμψίας. Οι περιπτώσεις 1, 3 αντιστοιχούν στις περιοχές A, B αντίστοιχα, ενώ οι περιπτώσεις 2 και 4 αντιστοιχούν στην μετάβαση από την περιοχή A στην B και από την B στην Γ, αντίστοιχα. Οι περιοχές A, B, Γ για τις κρίσιμες ιδιομορφές λυγισμού ορίζονται στον Πίνακα 2-6 του κεφαλαίου 2. Για τις τέσσερις αυτές περιπτώσεις προκύπτουν και τα κρίσιμα φορτία για τις αντίστοιχες τέσσερις πρώτες ιδιομορφές τους, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1. Υπό εξέταση περιπτώσεις για GNIA

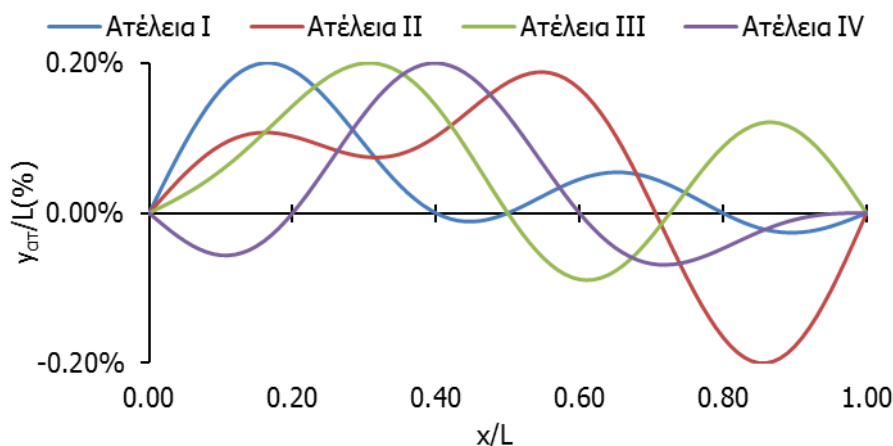
	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
\bar{k}	1.58	4.01	19.46	36.01
k(kN/m)	1.30	3.30	16.00	29.60
P ₁ (kN)	5.38	10.44	42.61	77.06
P ₂ (kN)	9.15	10.42	18.46	27.07
P ₃ (kN)	19.11	19.67	23.24	27.07
P ₄ (kN)	33.52	33.84	35.85	38.00
P _{cr} (kN)	5.38	10.42	18.46	27.07
Κρίσιμη Ιδιομορφή	[1S]	[1S] και [1A]	[1A]	[1A] και [2S]

3.1.2 Σχήματα ατελειών για μη-γραμμικές αναλύσεις

Η παρουσία αθέλητων ατελειών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά κατασκευών ευαίσθητων σε λυγισμό. Για το λόγο αυτό, σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση μελετάται η συμπεριφορά του ατελούς φορέα όπου επιλέγονται ως σχήματα ατελειών γραμμικοί συνδυασμοί των 4 πρώτων ιδιομορφών της αμφιέριστης δοκού επί ελαστικού εδάφους. Η μέγιστη εγκάρσια μετακίνηση κατά μήκος του φορέα $y_{στ}$ λαμβάνεται σύμφωνα με την οδηγία του EC3, δηλαδή ίση με $L/500 = 0.1m$, το οποίο είναι μία συνήθης πρακτική για χαλύβδινα μέλη. Ο γραμμικός συνδυασμός των ιδιομορφών για κάθε συνδυασμό ατέλειας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-2. Τα σχήματα ατελειών που προκύπτουν από τους συνδυασμούς του Πίνακα 3-2 και εισάγονται στις μη-γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-1. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η αδιστατοποιημένη θέση κατά μήκος της δοκού ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το μέγεθος της ατέλειας ως ποσοστό επί του μήκους της δοκού.

Πίνακας 3-2. Συνδυασμοί ατελειών

Συνδυασμοί Ατελειών	Ιδιομορφές Λυγισμού (LBA)
I	[1S]+[2S]+[1A]+[2A]
II	[1S]-[2S]+[1A]+[2A]
III	[1S]+[2S]+[1A]-[2A]
IV	[1S]-[2S]+[1A]-[2A]



Σχήμα 3-1. Σχήματα ατελειών

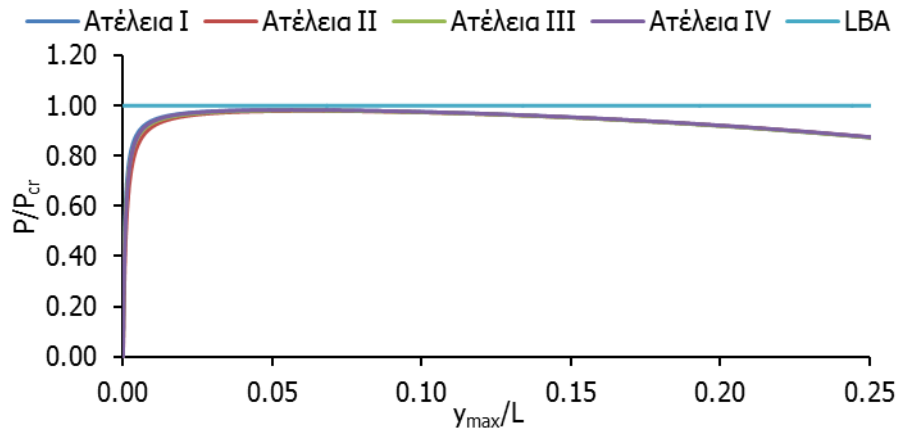
3.1.3 Αποτελέσματα μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες

Τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων παρουσιάζονται συνήθως υπό τη μορφή δρόμων ισορροπίας, όπου στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η μετατόπιση μίας χαρακτηριστικής θέσης του φορέα, ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική τιμή φορτίου. Ο δρόμος ισορροπίας περιλαμβάνει ζεύγη τιμών φορτίου και μετατόπισης για τα οποία ο φορέας ισορροπεί. Στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται για την παρούσα εργασία, στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η μετακίνηση του σημείου με τη μέγιστη εγκάρσια μετακίνηση στο τέλος της ανάλυσης, αδιαστατοποιημένη με το μήκος της δοκού γ_{\max}/L και στον κάθετο άξονα το αξονικό φορτίο, αδιαστατοποιημένο με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού P/P_{cr} . Επίσης παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα του φορέα στο τέλος της ανάλυσης για κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 3-2 έως 3-9.

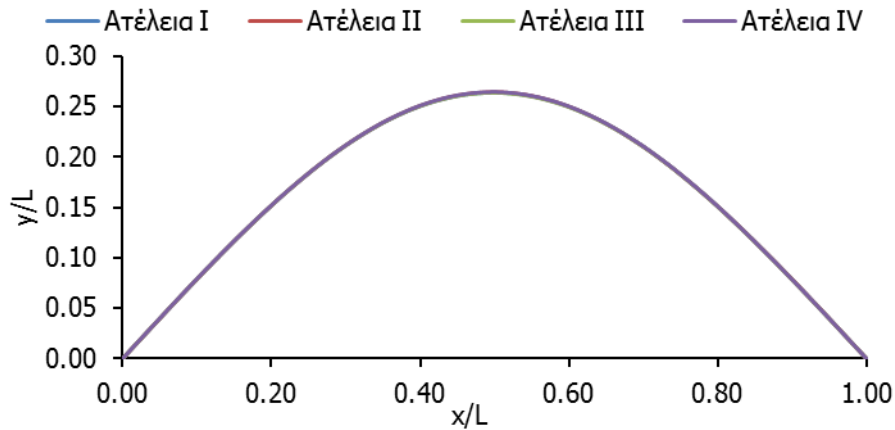
Ακολούθως, ο Πίνακας 3-3 παρουσιάζει την ποσοστιαία διαφορά του οριακού φορτίου P_{\max} όπως προκύπτει για κάθε περίπτωση από την GNI ανάλυση ως προς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όπως προκύπτει από την γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (LBA).

Τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων αναδεικνύουν την ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά του φορέα σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση. Τέτοια ασταθής μεταλυγισμική συμπεριφορά είναι πολύ σημαντική κατά τη διάρκεια σχεδιασμού τέτοιου τύπου κατασκευών και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, με κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας. Όσον αφορά το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού στο τέλος του κάθε δρόμου ισορροπίας, παρατηρείται ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα της ατέλειας. Το σχήμα με το οποίο λυγίζει σε κάθε περίπτωση η δοκός είναι παρόμοιο με την εκάστοτε κρίσιμη ιδιομορφή. Ακόμα και στις περιπτώσεις τα φορτία δύο ιδιομορφών λυγισμού είναι πρακτικά ίσα, ο φορέας λυγίζει με το σχήμα της ιδιομορφής που οριακά δίνει το μικρότερο φορτίο. Τέλος, παρατηρείται ότι με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας, το η απόκλιση του οριακού φορτίου της GNI ως προς το κρίσιμο φορτίο της LBA μεγαλώνει, φτάνοντας στην τάξη του 5% για την τελευταία περίπτωση εδαφικής δυσκαμψίας.

- Περίπτωση 1 - $\bar{k} = 1.58$

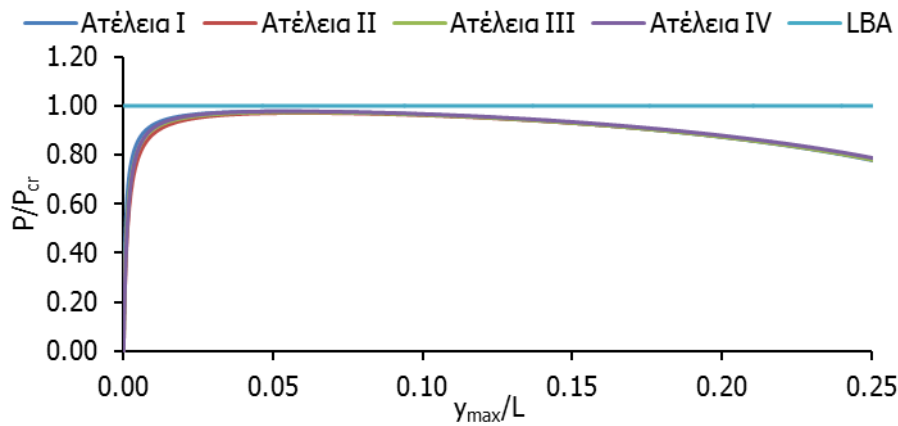


Σχήμα 3-2. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 1.58$

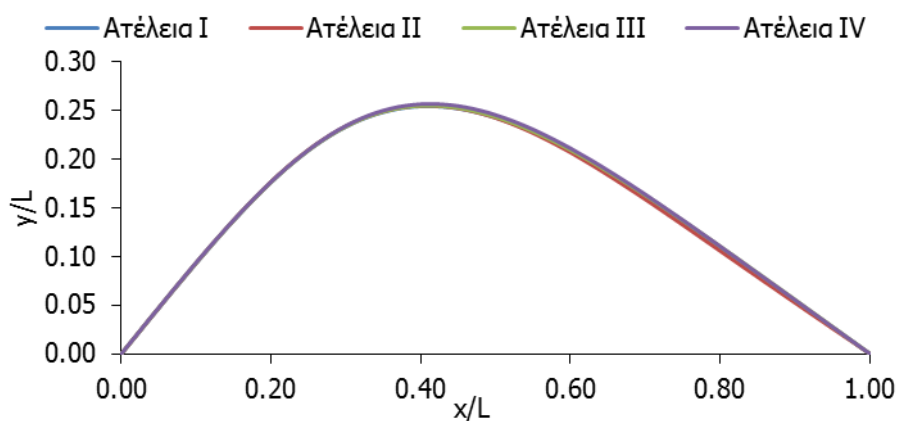


Σχήμα 3-3. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 1.58$

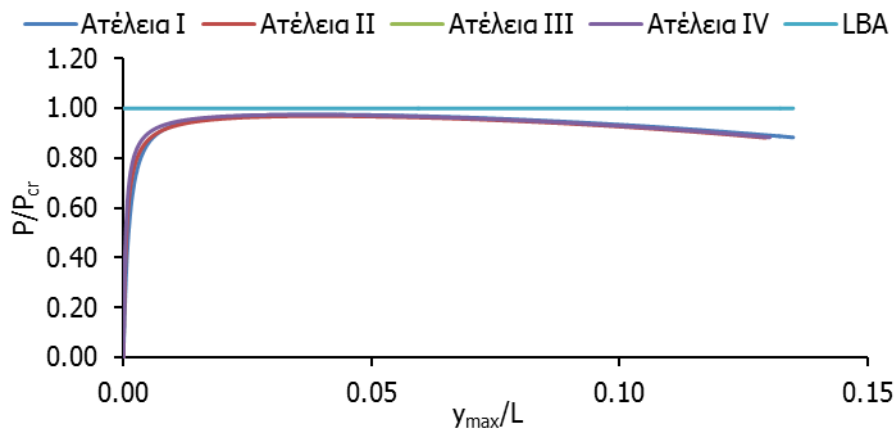
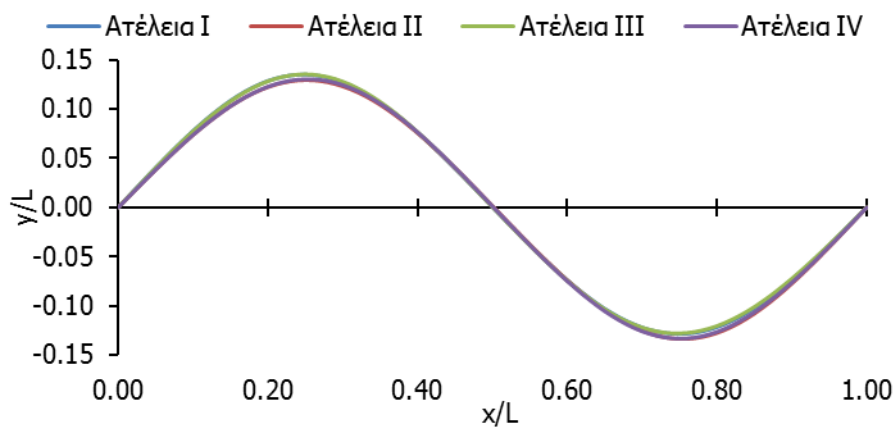
- Περίπτωση 2 - $\bar{k} = 4.01$



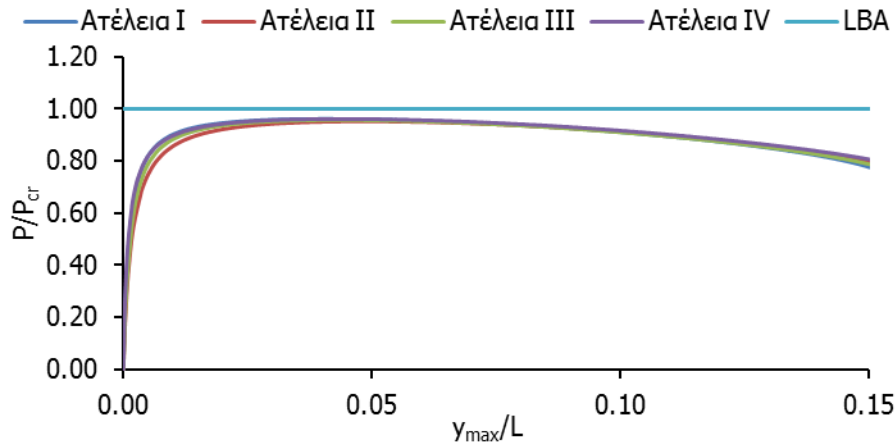
Σχήμα 3-4. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 4.01$

Σχήμα 3-5. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 4.01$

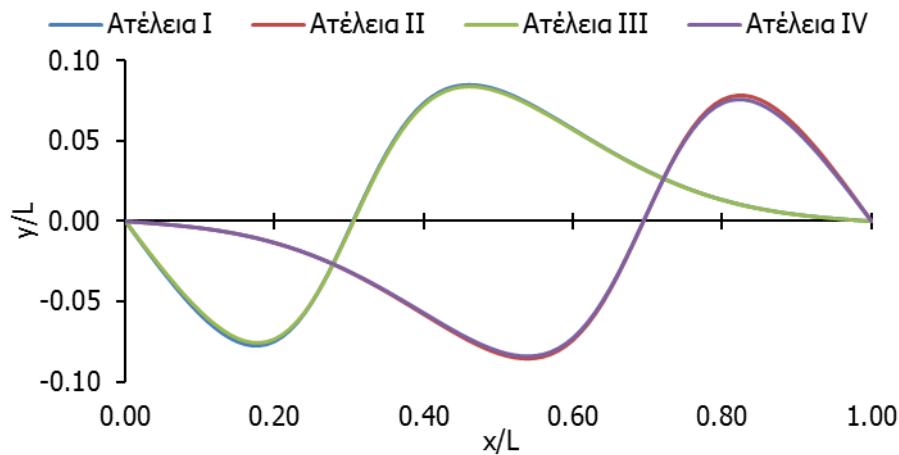
– Περίπτωση 3 - $\bar{k} = 19.46$

Σχήμα 3-6. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 19.46$ Σχήμα 3-7. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 19.46$

– Περίπτωση 4 - $\bar{k} = 36.01$



Σχήμα 3-8. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 36.01$



Σχήμα 3-9. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 36.01$

Πίνακας 3-3. Οριακά φορτία GNIA

	$P_{\max}(I)$	$P_{\max}(II)$	$P_{\max}(III)$	$P_{\max}(IV)$	$P_{cr}(LBA)$	
Περίπτωση 1	5.29	5.26	5.27	5.28	5.38	P(kN)
	-1.68	-2.07	-1.92	-1.71		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 2	10.15	10.09	10.12	10.15	10.42	P(kN)
	-2.58	-3.20	-2.89	-2.55		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 3	18.01	17.89	17.95	18.00	18.46	P(kN)
	-2.44	-3.07	-2.79	-2.52		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 4	26.03	25.77	25.91	26.03	27.07	P(kN)
	-3.84	-4.78	-4.29	-3.85		$\Delta P(\%)$

3.2 ΑΜΦΙΠΑΚΤΗ ΔΟΚΟΣ

3.2.1 Δεδομένα αναλύσεων

Ακολουθως μελετάται η λυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά μιας αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Η δοκός που μελετάται είναι διατομής CHS 168.3x5 και μήκους $L=5\text{m}$. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ελαστικός χάλυβας, με μέτρο Ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0.30$. Το φορτίο λυγισμού της υπό εξέταση δοκού χωρίς εδαφικά ελατήρια προκύπτει ίσο με $P_{cr}=4\pi^2EI/L^2=2838.14\text{kN}$.

Ο φορέας προσομοιώνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements), ενώ το ελαστικό έδαφος Winkler προσομοιώνεται με εγκάρσια μονοαξονικά ελατήρια (spring elements) που συνδέουν τη δοκό με το έδαφος, το οποίο θεωρείται ακλόνητο. Ο φορέας διακριτοποιείται ανά 0.05m , κατόπιν ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης.

Ο τύπος της ανάλυσης που πραγματοποιείται είναι μη-γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GNIA), ενώ στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος arc-length (collapse). Στην GNIA οι εξισώσεις ισορροπίας καταστρώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Η GNI ανάλυση δύναται να περιγράψει τόσο τη λυγισμική, όσο και τη μεταλυγισμική συμπεριφορά κατασκευών που είναι ευπαθείς σε λυγισμό.

Επιλέγονται πέντε περιπτώσεις εδαφικής δυσκαμψίας, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Οι περιπτώσεις 1, 3, 5 αντιστοιχούν στις περιοχές A, B, Γ αντίστοιχα, ενώ οι περιπτώσεις 2 και 4 αντιστοιχούν στην μετάβαση από την περιοχή A στην B και από την B στην Γ, αντίστοιχα. Οι περιοχές A, B, Γ για τις κρίσιμες ιδιομορφές λυγισμού ορίζονται στον Πίνακα 2-11 του κεφαλαίου 2. Για τις πέντε αυτές περιπτώσεις προκύπτουν τα τέσσερα πρώτα κρίσιμα φορτία και τα σχήματα των αντιστοίχων ιδιομορφών τους από γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Οι πέντε υπό εξέταση περιπτώσεις, τα τέσσερα πρώτα φορτία λυγισμού καθώς και στο σχήμα της κρίσιμης ιδιομορφής λυγισμού σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4.

Πίνακας 3-4. Υπό εξέταση περιπτώσεις για GNIA

	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4	Περίπτωση 5
\bar{k}	4.50	9.00	36.50	64	144.50
$k(\text{kN/m})$	1260.51	2521.02	10224.15	17927.27	40476.41
$P_A(\text{kN})$	5123	7098	10887	14202	19519
$P_B(\text{kN})$	6467	7109	12179	14304	20540
$P_C(\text{kN})$	12070	12890	19416	21153	28476
$P_D(\text{kN})$	17450	17670	22058	25496	28819
Κρίσιμη Ιδιομορφή	[1S]	[1S] και [1A]	[1A]	[1A] και [1S']	[1S']

3.2.2 Σχήματα ατελειών για μη-γραμμικές αναλύσεις

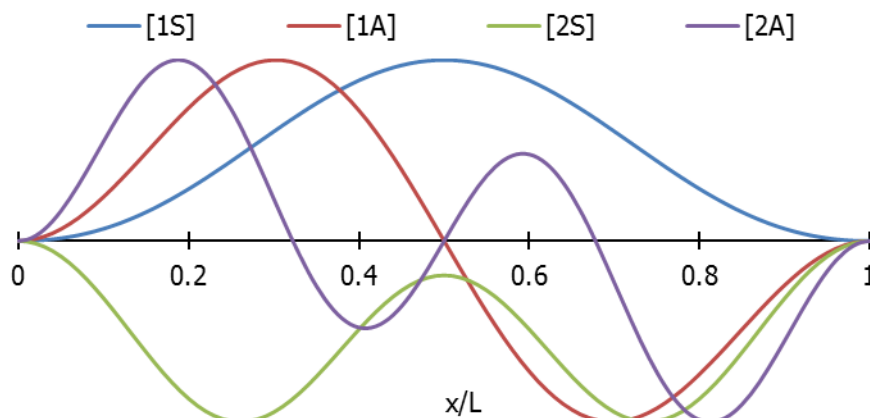
Σε κάθε περίπτωση μελετάται η συμπεριφορά του ατελούς φορέα, με ατέλειες γραμμικούς συνδυασμούς των 4 πρώτων ιδιομορφών της εκάστοτε αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους. Τα διαφορετικά σχήματα των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση καθιστούν αναγκαίο, σε αντίθεση με την αμφιέριστη δοκό, να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά σχήματα ατελειών σε κάθε περίπτωση. Η μέγιστη εγκάρσια ατέλεια κατά μήκος του φορέα $\gamma_{στ}$ λαμβάνεται σύμφωνα με

την οδηγία του EC3, δηλαδή ίση με $L/500=0.1m$, το οποίο είναι μια συνήθης πρακτική για χαλύβδινα μέλη. Σε κάθε περίπτωση οι συνδυασμοί έχουν ονομαστεί όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 3-5. Οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού της κάθε περίπτωσης καθώς και τα σχήματα ατελειών που προκύπτουν από τους γραμμικούς συνδυασμούς αυτών και εισάγονται στις μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA παρουσιάζονται από το Σχήμα 3-14 έως το Σχήμα 3-18. Στα σχήματα των ατελειών, στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη θέση κατά μήκος της δοκού ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το μέγεθος της ατέλειας ως ποσοστό επί του μήκους της δοκού.

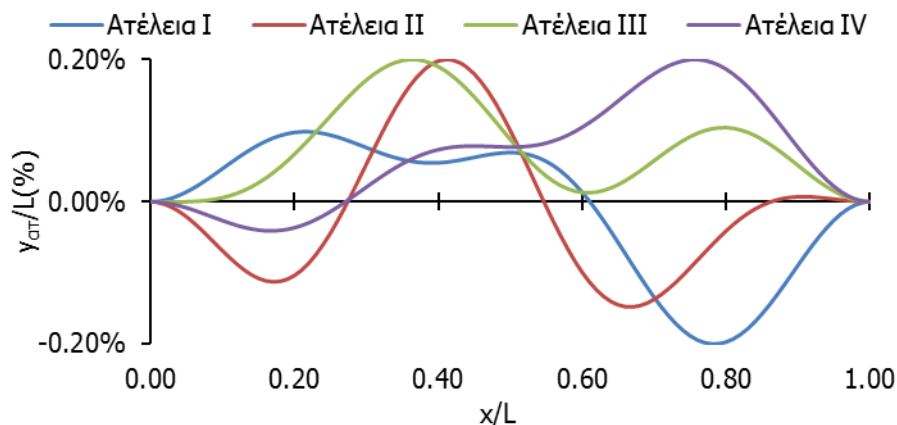
Πίνακας 3-5. Συνδυασμοί ατελειών

Συνδυασμοί Ατελειών	Ιδιομορφές Λυγισμού (LBA)
I	$1^n+2^n+3^n+4^n$
II	$1^n+2^n+3^n-4^n$
III	$1^n+2^n-3^n-4^n$
IV	$1^n-2^n-3^n-4^n$

- Περίπτωση 1 - $\bar{k} = 4.5$

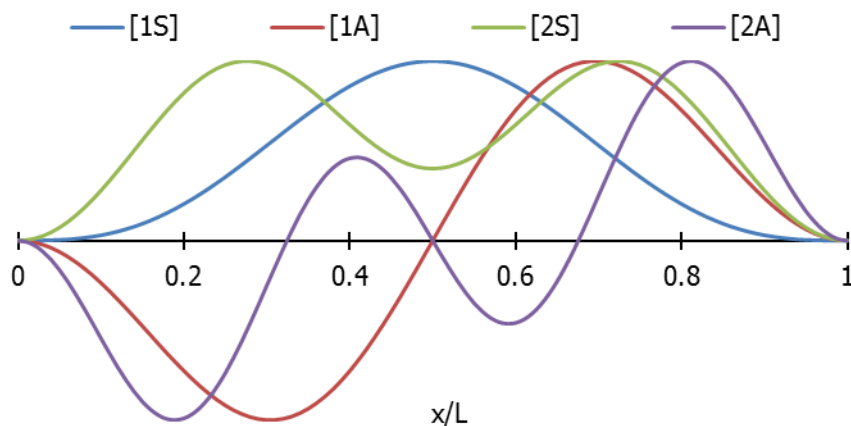


Σχήμα 3-10. Τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού δοκού για $\bar{k} = 4.5$

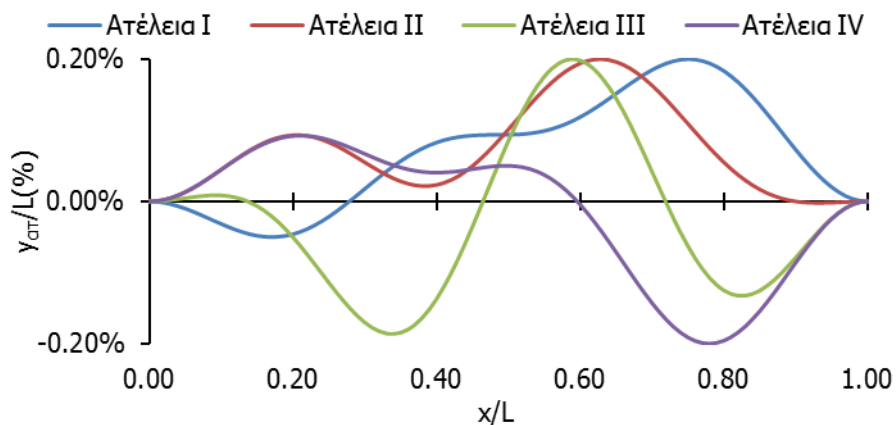


Σχήμα 3-11. Σχήματα ατελειών για $\bar{k} = 4.5$

– Περίπτωση 2 - $\bar{k} = 9$

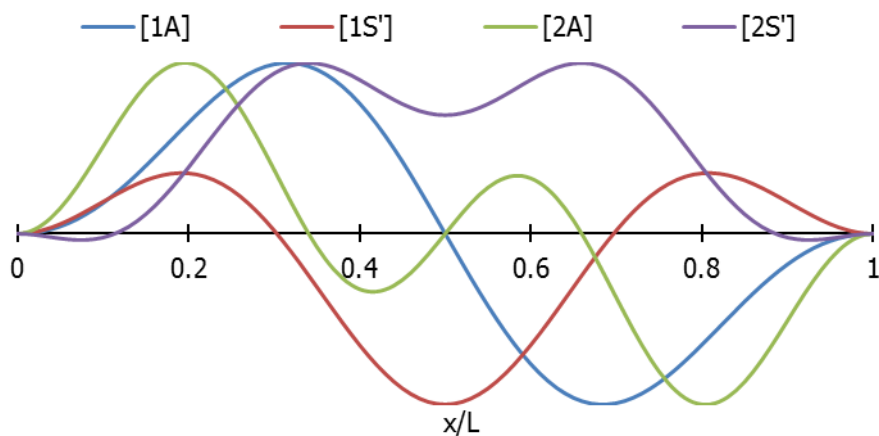


Σχήμα 3-12. Τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού δοκού για $\bar{k} = 9$

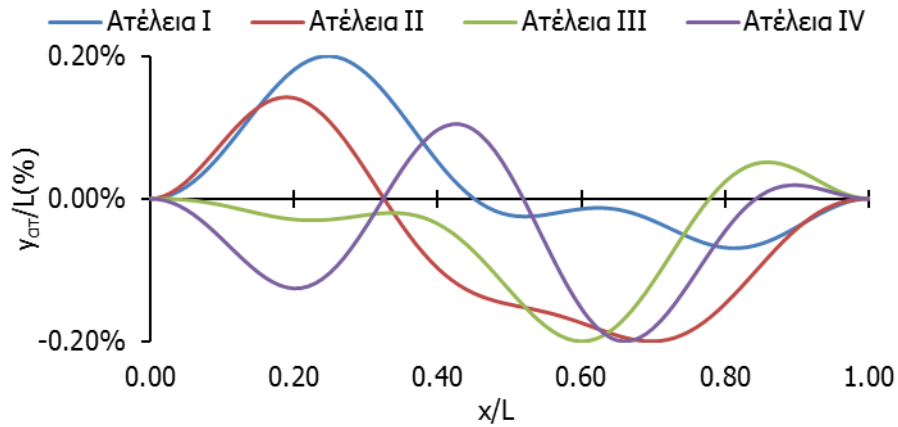


Σχήμα 3-13. Σχήματα ατελειών για $\bar{k} = 9$

– Περίπτωση 3 - $\bar{k} = 36.5$

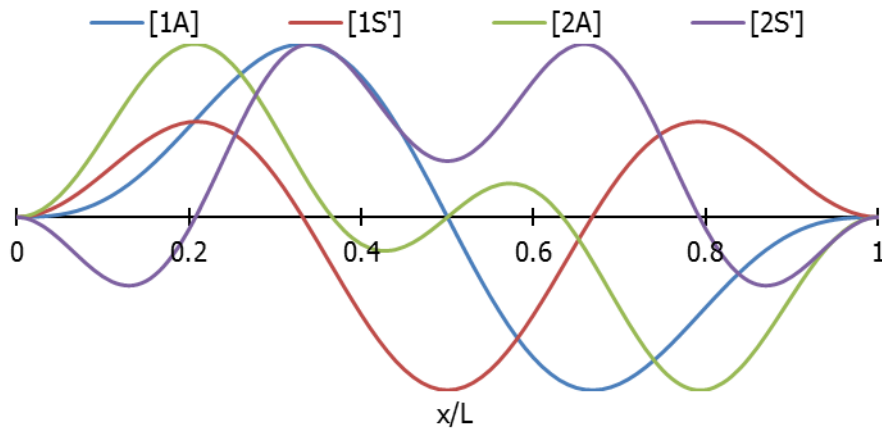


Σχήμα 3-14. Τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού δοκού για $\bar{k} = 36.5$

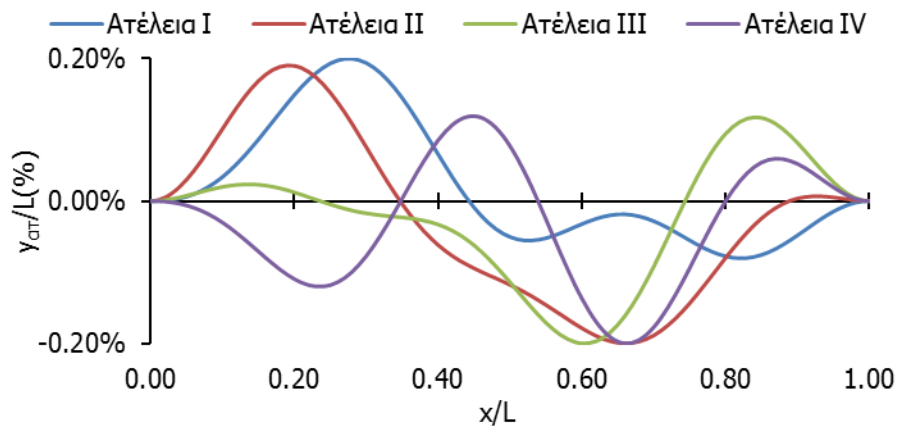


Σχήμα 3-15. Σχήματα ατελειών για $\bar{k} = 36.5$

- Περίπτωση 4 - $\bar{k} = 64$

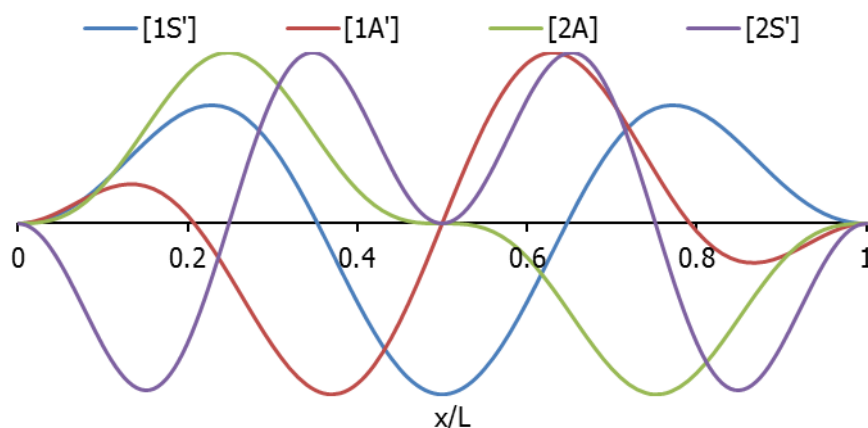


Σχήμα 3-16. Τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού δοκού για $\bar{k} = 64$

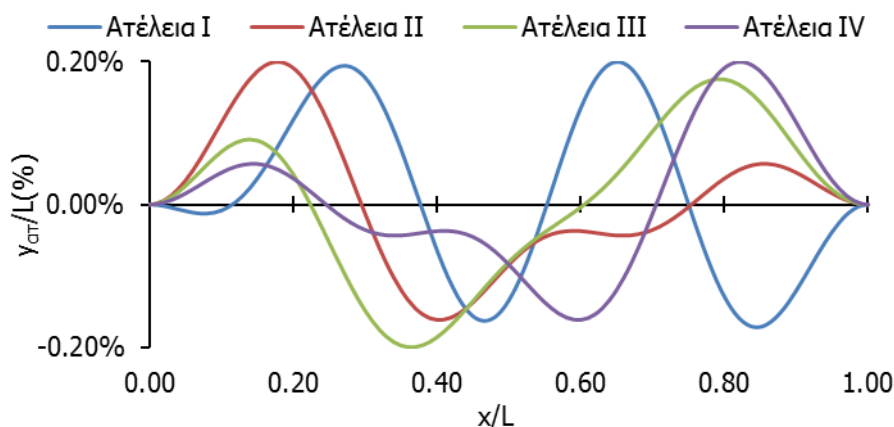


Σχήμα 3-17. Σχήματα ατελειών για $\bar{k} = 64$

– Περίπτωση 5 - $\bar{k} = 144.5$



Σχήμα 3-18. Τέσσερις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού δοκού για $\bar{k} = 144.5$



Σχήμα 3-19. Σχήματα ατελειών για $\bar{k} = 144.5$

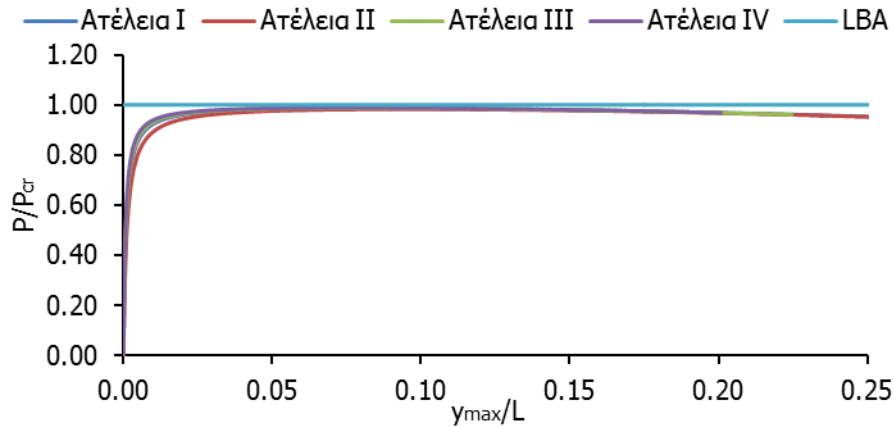
3.2.3 Αποτελέσματα μη-γραμμικών αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων παρουσιάζονται υπό τη μορφή δρόμων ισορροπίας, όπου στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η μετακίνηση του σημείου του φορέα το οποίο έχει τη μέγιστη εγκάρσια μετακίνηση στο τέλος της ανάλυσης, αδιαστατοποιημένη με το μήκος της δοκού γ_{\max}/L και στον κάθετο άξονα το αξονικό φορτίο, αδιαστατοποιημένο με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού P/P_{cr} . Επίσης παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα του φορέα στο τέλος της ανάλυσης για κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται από το Σχήμα 3-20 έως το Σχήμα 3-29. Ακολούθως, ο Πίνακας 3-6 παρουσιάζει την ποσοστιαία διαφορά του οριακού φορτίου P_{\max} όπως προκύπτει για κάθε περίπτωση από την GNI ανάλυση ως προς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όπως προκύπτει από την γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (LBA).

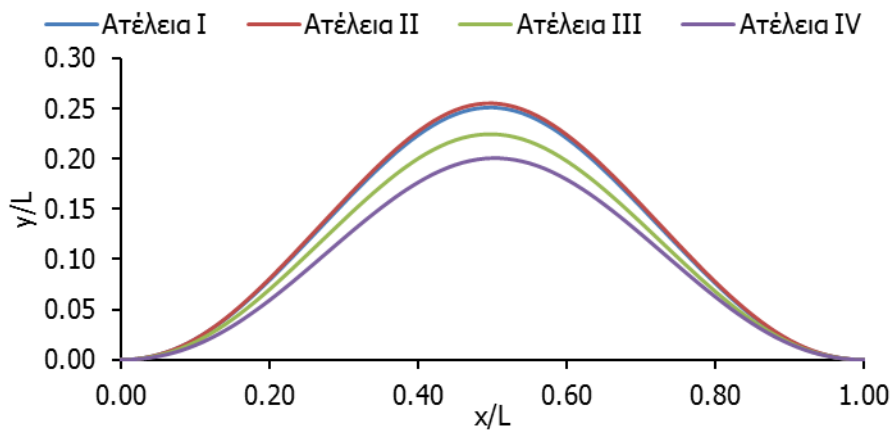
Τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων αναδεικνύουν και στην περίπτωση της αμφίπακτης δοκού την ασταθή μεταλυγισμική της συμπεριφορά της σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση. Όσον αφορά το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού στο τέλος του κάθε δρόμου ισορροπίας, παρατηρείται ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα της ατέλειας. Το σχήμα με το οποίο παραμορφώνεται σε κάθε περίπτωση η δοκός είναι παρόμοιο με την εκάστοτε κρίσιμη ιδιομορφή. Ακόμα και στις περιπτώσεις που τα φορτία δύο ιδιομορφών λυγισμού είναι πρακτικά ίσα, ο φορέας λυγίζει με το σχήμα της

ιδιομορφής που οριακά δίνει το μικρότερο φορτίο. Τέλος, παρατηρείται ότι με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας, το η απόκλιση του οριακού φορτίου της GNIA ως προς το κρίσιμο φορτίο της LBA μεγαλώνει, φτάνοντας στην τάξη του 5% για την τελευταία περίπτωση εδαφικής δυσκαμψίας.

– Περίπτωση 1 - $\bar{k} = 4.5$

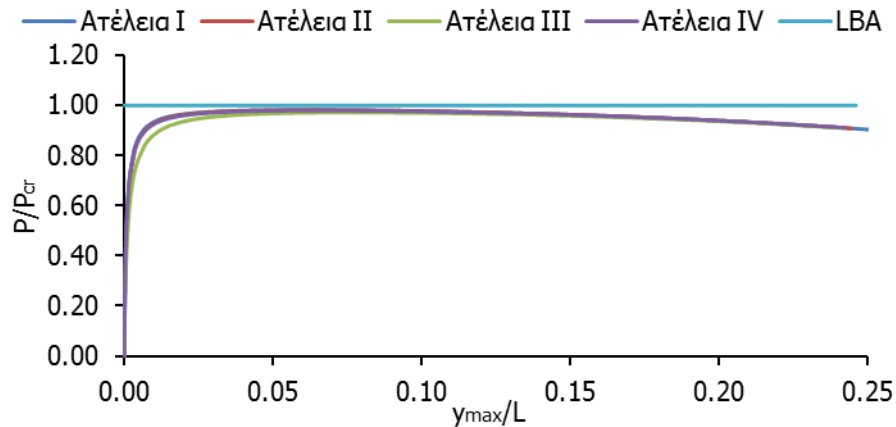


Σχήμα 3-20. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 4.5$

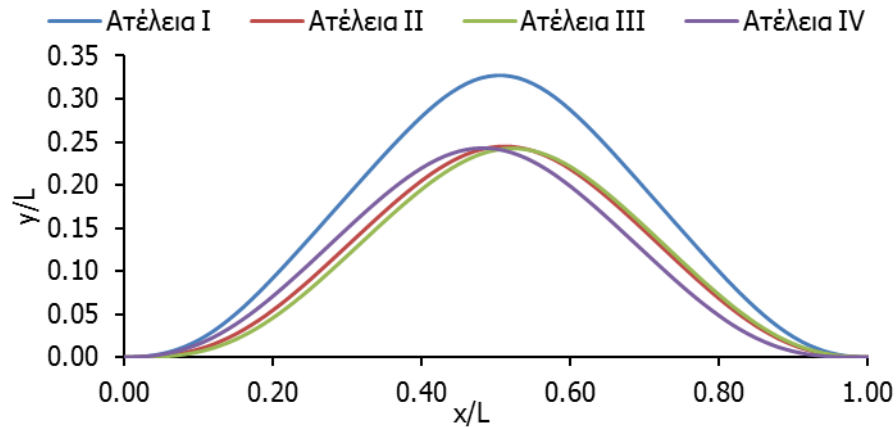


Σχήμα 3-21. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 4.5$

– Περίπτωση 2 - $\bar{k} = 9$

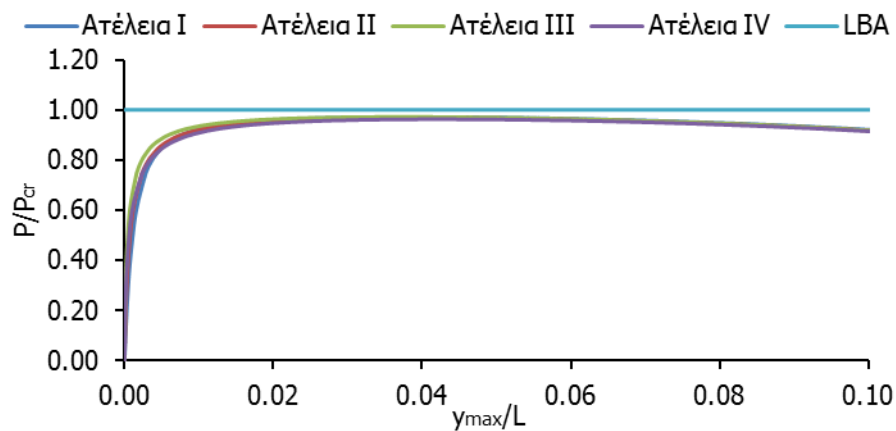


Σχήμα 3-22. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 9$

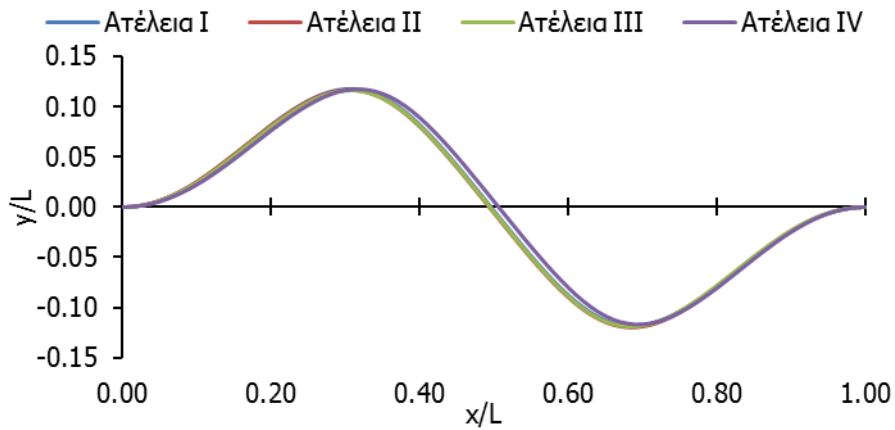


Σχήμα 3-23. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 9$

– Περίπτωση 3 - $\bar{k} = 36.5$

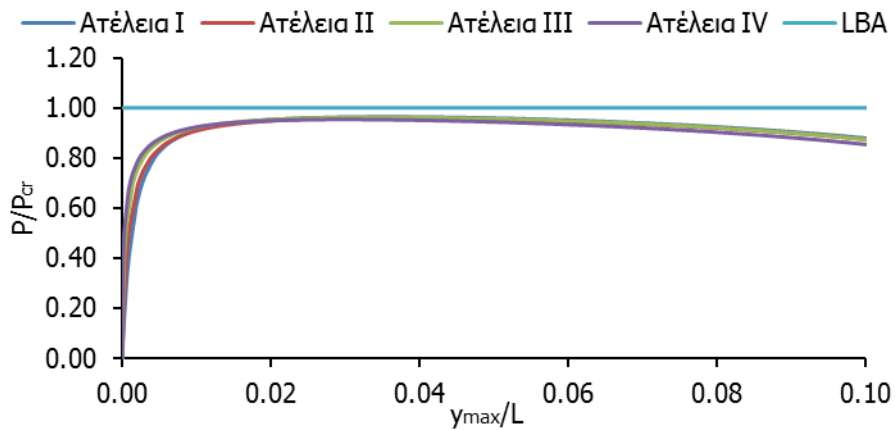


Σχήμα 3-24. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 36.5$

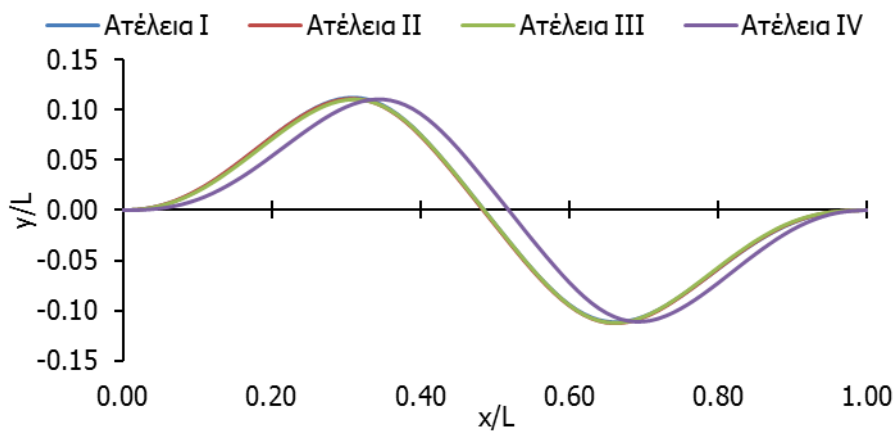


Σχήμα 3-25. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 36.5$

- Περίπτωση 4 - $\bar{k} = 64$

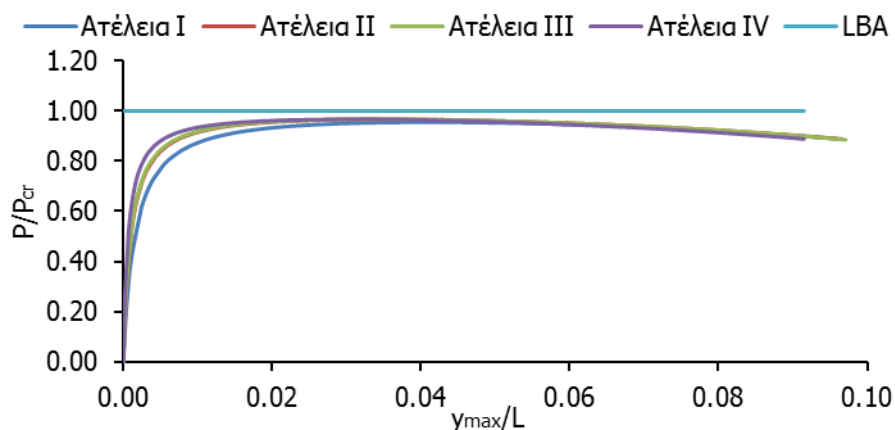


Σχήμα 3-26. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 64$

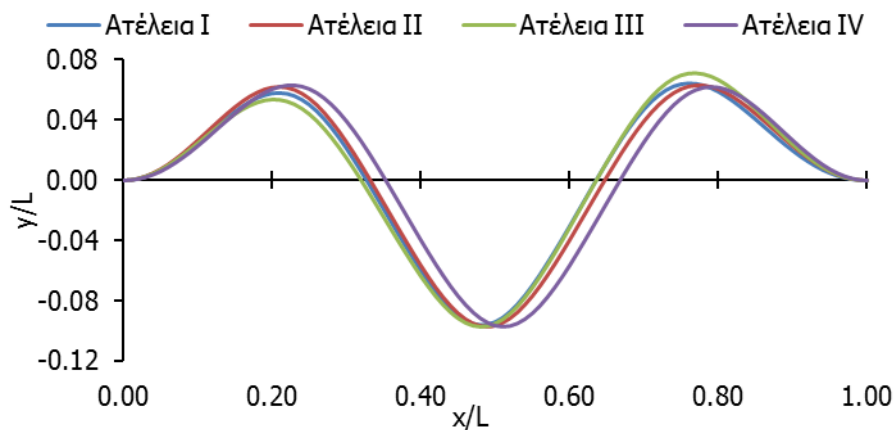


Σχήμα 3-27. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 64$

– Περίπτωση 5 - $\bar{k} = 144.5$



Σχήμα 3-28. Δρόμοι ισορροπίας για $\bar{k} = 144.5$



Σχήμα 3-29. Παραμορφωμένος φορέας για $\bar{k} = 144.5$

Πίνακας 3-6. Οριακά φορτία Ανάλυσης GNIA

	$P_{\max}(I)$	$P_{\max}(II)$	$P_{\max}(III)$	$P_{\max}(IV)$	$P_{cr}(LBA)$	
Περίπτωση 1	5054.60	5034.53	5058.99	5064.84	5123.00	P(kN)
	-1.34	-1.73	-1.25	-1.14		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 2	6968.49	6965.63	6897.32	6951.80	7098.00	P(kN)
	-1.82	-1.86	-2.83	-2.06		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 3	10578.70	10546.30	10582.40	10483.30	10887.00	P(kN)
	-2.83	-3.13	-2.80	-3.71		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 4	13690.60	13625.70	13662.70	13544.40	14202.00	P(kN)
	-3.60	-4.06	-3.80	-4.63		$\Delta P(\%)$
Περίπτωση 5	18631.70	18855.10	18867.30	18855.20	19519.00	P(kN)
	-4.55	-3.40	-3.34	-3.40		$\Delta P(\%)$

3.3 Συμπεράσματα

Μελετήθηκε αριθμητικά η λυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά τόσο της αμφιέρειστης όσο και της αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους σαν μία πρώτη προσέγγιση του φαινομένου του καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών. Η μεταλυγισμική συμπεριφορά των δοκών Euler-Bernoulli επί ελαστικού εδάφους μελετήθηκε μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GNIA). Οι προκύπτοντες δρόμοι ισορροπίας σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση υποδεικνύουν ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά του φορέα καθώς και μικρή επιρροή των ατελειών στο οριακό φορτίο. Τέλος, η αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας συνεπάγεται μεγαλύτερη απόκλιση του οριακού φορτίου P_{max} , όπως προκύπτει σε κάθε περίπτωση από τη GNI ανάλυση, ως προς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όπως προκύπτει από τη γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (LBA).

4 ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΡΗΓΜΑ

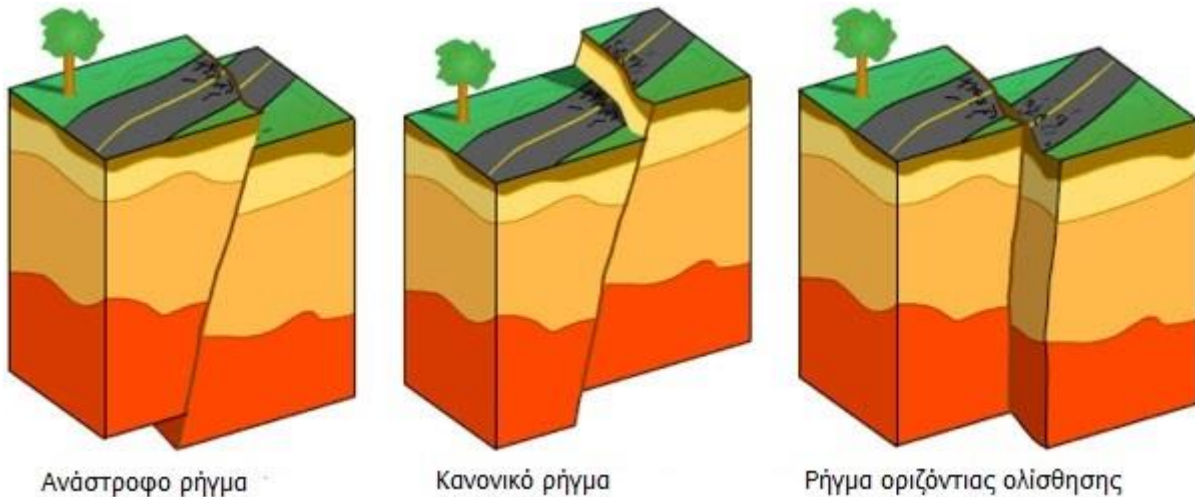
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός αγωγού πραγματοποιείται εντός ενός αυστηρού κανονιστικού πλαισίου που καθιστά αναπόφευκτη, σε ορισμένες περιπτώσεις, την όδευση του αγωγού μέσα από σεισμογενείς περιοχές, που συνήθως περιλαμβάνουν σεισμικά ρήγματα. Έτσι, η ακεραιότητα του αγωγού εξαρτάται άμεσα από την ικανότητά του να ακολουθήσει τις μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που οφείλονται σε ενδεχόμενη ενεργοποίηση των ρηγμάτων αυτών. Η διαφορεική εδαφική μετακίνηση κατά την ενεργοποίηση ενός ρήγματος έχει αποδειχθεί από προηγούμενα σεισμικά γεγονότα ως το κρίσιμο αίτιο αστοχίας υπόγειων μεταλλικών αγωγών, σε σύγκριση με άλλες αστοχίες που συνδέονται με σεισμικές διεγέρσεις, όπως κατολισθήσεις, ρευστοποίηση του εδάφους, φορτία από σεισμικά κύματα κ.α..

Κατά τη διάρκεια του αντισεισμικού σχεδιασμού ενός αγωγού, βασική προτεραιότητα αποτελεί η αποφυγή οποιασδήποτε πιθανής αστοχίας του μεταλλικού κελύφους, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή του μεταφερόμενου καυσίμου, αστοχία της κατασκευής ή ακόμα και έκρηξη. Τα προηγούμενα ενδεχομένως να έχουν ως συνέπεια περιβαλλοντική βλάβη ή ανθρώπινους τραυματισμούς. Η ενεργοποίηση ενός ρήγματος προκαλεί μεγάλες μόνιμες χωρικές εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες παραμορφώνουν τον αγωγό, ο οποίος όντας αναγκασμένος να τις ακολουθήσει αναπτύσσει σύνθετη ένταση. Στη φύση απαντώνται τρεις τύποι ρηγμάτων, τα κανονικά, τα ανάστροφα και τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Στα μεν κανονικά ρήματα ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και εφελκυσμό, ενώ στα ανάστροφα ρήματα ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και θλίψη. Τέλος, στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και διάτμηση. Οι τρεις τύποι ρηγμάτων καθώς και οι παραμορφώσεις που επιβάλλει ο κάθε ένας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-1.

Ο αγωγός, λοιπόν, αναπτύσσει καμπτικές, θλιπτικές ή εφελκυστικές τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις. Παρόλο που ο χάλυβας χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα, οι αναπτυσσόμενες μεγάλες τάσεις και μετελαστικές παραμορφώσεις μπορούν να ξεπεράσουν την ικανότητα του υλικού να τις αναλάβει, και επομένως αποτελούν ένα κρίσιμο θέμα για τους μελετητές τέτοιου τύπου τεχνικών έργων. Μεγάλες εφελκυστικές παραμορφώσεις θέτουν σε κίνδυνο κυρίως τις συγκολλητές συνδέσεις των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού. Από την άλλη πλευρά, μέσω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων είναι πιθανή η απώλεια της ευστάθειας του αγωγού, είτε σε επίπεδο διατομής με τοπικό λυγισμό του μεταλλικού τοιχώματος, είτε σε επίπεδο κατασκευής μέσω καθολικού λυγισμού του αγωγού σε ένα πεπερασμένο μήκος γύρω από το σεισμικό ρήγμα. Συγκεκριμένα στην παρούσα

εργασία, όπου αντικείμενο μελέτης είναι ο καθολικός λυγισμός των υπόγειων μεταλλικών αγωγών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ανάστροφα σεισμικά ρήγματα, τα οποία επιβάλλουν μεγάλες θλιπτικές και καμπτικές παραμορφώσεις και επομένως είναι η πιθανή η απώλεια της ευστάθειας λόγω των αναπτυσσόμενων θλιπτικών δυνάμεων. Επομένως καθίσταται αναγκαίος ο αριθμητικός υπολογισμός των επιβαλλόμενων αυτών παραμορφώσεων και αναπτυσσόμενων τάσεων στον αγωγό για τον προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου καθώς επίσης για πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό αντίστοιχων μελλοντικών έργων.



Σχήμα 4-1. Τύποι ρηγμάτων [United States Geological Survey (USGS)]

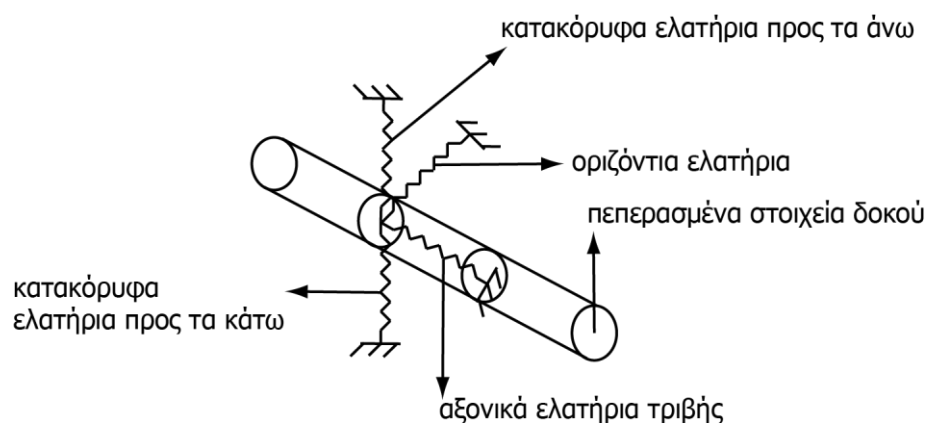
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ

Ο σκοπός της αριθμητικής προσομοίωσης και ανάλυσης του αγωγού είναι η αποτίμηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης του αγωγού έναντι ενεργοποίησης τεκτονικού ρήγματος. Καθίσταται επομένως αναγκαία η αξιόπιστη και ταυτόχρονα υπολογιστικά αποτελεσματική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους, της επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης καθώς επίσης και του ίδιου του αγωγού μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Στην πράξη όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί, όπως ο Ευρωκώδικας 8, τα πρότυπα ASCE-ALA, API 5L, ASME B31 κ.α., προτείνουν τη χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων (beam-type finite elements) για την προσομοίωση του αγωγού, ενώ παράλληλα επιβάλλουν όρια στις εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις έναντι αστοχίας από τοπικό λυγισμό ή εφελκυστική θραύση των ραφών συγκόλλησης. Παρ' όλα αυτά, ένα τμήμα του αγωγού που βρίσκεται κοντά στο τεκτονικό ρήγμα δύναται να προσομοιασθεί με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell-type finite elements) για την ακριβέστερη εκτίμηση της ενδεχόμενης αστοχίας από τοπικό λυγισμό, η οποία δε δύναται να πραγματοποιηθεί με χρήση ραβδωτών στοιχείων. Η χρήση, όμως, επιφανειακών στοιχείων αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του προσομοιώματος και το υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα εργασία, στην οποία δε μελετάται ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού αλλά μόνο καθολικού, επιλέγονται σε όλα τα προσομοιώματα τα ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία.

4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η προσομοίωση του περιβάλλοντος εδάφους μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στην πρώτη επιλογή το έδαφος δύναται να προσομοιωθεί με μετακινησιακά μη-γραμμικά ελατήρια προς όλες τις διευθύνσεις, ενώ στη δεύτερη επιλογή η προσομοίωση δύναται να υλοποιηθεί με συμπαγή

χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (solid finite elements). Η δεύτερη επιλογή, όμως, απαιτεί την προσομοίωση μεγάλου μέρους του περιβάλλοντος εδάφους, κάτι που αυξάνει σημαντικά τη δυσκολία της μοντελοποίησης καθώς και το υπολογιστικό κόστος, ενώ απαιτεί και την προσομοίωση του αγωγού με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Από την άλλη πλευρά, τα εδαφικά ελατήρια είναι συμβατά με τα πεπερασμένα στοιχεία δοκού στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής, ενώ η χρήση τους υιοθετείται από όλους τους σύγχρονους κανονισμούς και πρότυπα. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η προσομοίωση του εδάφους με μετακινησιακά ελατήρια στις τρεις διευθύνσεις. Αναλυτικότερα, γίνεται χρήση ελατηρίων στη διαμήκη διεύθυνση του αγωγού που προσομοιάζουν την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ αγωγού και εδάφους (axial frictional soil springs), εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων για την προσομοίωση της εγκάρσιας μετακίνησης του αγωγού μέσα στο διανοιγμένο όρυγμα (lateral transverse soil springs), καθώς επίσης και εγκάρσιων κατακόρυφων ελατηρίων εγκάρσια στον αγωγό προς τα άνω (vertical upward soil springs) και προς τα κάτω (vertical downward soil springs) για την προσομοίωση της μετακίνησης του αγωγού στο κατακόρυφο επίπεδο. Η χρήση διαφορετικών εδαφικών ελατηρίων πάνω και κάτω από τον αγωγό προκύπτει από το γεγονός ότι τα εδαφικά χαρακτηριστικά πάνω και κάτω από τον αγωγό διαφέρουν σημαντικά, καθώς κάτωθεν του αγωγού βρίσκεται το μητρικό έδαφος, ενώ άνωθεν αυτού βρίσκεται η επίχωση που διαστρώνεται μετά την κατασκευή του, η οποία συνήθως είναι χαλαρό μη-συνεκτικό έδαφος το οποίο συμπυκνώνεται ελαφρά. Τα εδαφικά ελατήρια παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-2, ενώ τα χαρακτηριστικά τους υπολογίζονται βάσει των σχέσεων που προτείνονται από το πρότυπο ASCE-ALA και που παρουσιάζονται στις παραγράφους 4.3.1 έως 4.3.4.



Σχήμα 4-2. Προσομοίωση αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους

4.3.1 Αξονικά εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη αξονική δύναμη ανά μέτρο μήκους που μπορεί να μεταφερθεί στον αγωγό είναι:

$$T_u = nDac + nDH\bar{\gamma} \frac{1 + K_0}{2} \tan \delta \quad (4-1)$$

όπου:

D = εξωτερική διάμετρος αγωγού

c = συνοχή εδάφους

H = βάθος επίχωσης έως τη μέση στάθμη του αγωγού

$\bar{\gamma}$ = ενεργό ειδικό βάρος εδάφους

K_0 = συντελεστής πλευρικής τριβής

$$a = \text{συντελεστής συνοχής} = 0.508 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1}$$

δ = γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους = $f\varphi$

φ = εσωτερική γωνία τριβής εδάφους

f = συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό επένδυσης εξωτερικά του αγωγού

Ενώ η μετακίνηση Δ_T που αντιστοιχεί στη δύναμη T_U ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} \Delta_T &= 3\text{mm για πυκνή άμμο} & \Delta_T &= 5\text{mm για χαλαρή άμμο} \\ \Delta_T &= 8\text{mm για σφιγρή άργιλο} & \Delta_T &= 10\text{mm για μαλακή άργιλο} \end{aligned} \quad (4-2)$$

4.3.2 Οριζόντια εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη εγκάρσια δύναμη ανά μέτρο μήκους που μπορεί να μεταφερθεί στον αγωγό είναι:

$$P_U = N_{ch}cD + N_{qh}\bar{\gamma}HD \quad (4-3)$$

όπου:

N_{ch} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας αργίλου (0 για $c=0$)

N_{qh} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας άμμου (0 για $\varphi=0^\circ$)

Οι συντελεστές N_{ch} και N_{qh} προκύπτουν από τους εμπειρικούς τύπους (4-3) και (4-4), ενώ οι συντελεστές a , b , c , d , e , x παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9 \quad (4-4)$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (4-5)$$

Τέλος, η μετακίνηση Δ_P που αντιστοιχεί στη δύναμη P_U ορίζεται ως

$$\Delta_P = 0.04 \left(\frac{D}{2} + H \right) \leq 0.10D \quad (4-6)$$

Πίνακας 4-1. Συντελεστές a , b , c , d , e , x

Συντελεστής	φ	x	a	b	c	d	e
N_{ch}	0°	H/D	6.752	0.065	-11.063	7.11900	--
N_{qh}	20°	H/D	2.399	0.439	-0.030	0.00106	-1.754×10^{-5}
N_{qh}	25°	H/D	3.332	0.839	-0.090	0.00561	-1.319×10^{-4}
N_{qh}	30°	H/D	4.565	1.234	-0.089	0.00428	-9.159×10^{-5}
N_{qh}	35°	H/D	6.816	2.019	-0.146	0.00765	-1.683×10^{-4}
N_{qh}	40°	H/D	10.959	1.783	0.045	-0.00543	-1.153×10^{-4}
N_{qh}	45°	H/D	17.658	3.309	0.048	-0.00644	-1.299×10^{-4}

4.3.3 Κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα άνω

Οι εξισώσεις για τα εδαφικά ελατήρια προς τα άνω βασίζονται σε εργαστηριακά πειράματα μικρής κλίμακας και θεωρητικά μοντέλα. Για το λόγο αυτό, οι εξισώσεις αυτές έχουν εφαρμογή σε σχετικά μικρά βάθη ορύγματος H/D , όπως ορίζονται στις ακόλουθες εξισώσεις. Η μέγιστη κάθετη δύναμη ανά μέτρο μήκους που μπορεί να μεταφερθεί στον αγωγό είναι:

$$Q_u = N_{cv}cD + N_{qv}\bar{\gamma}HD \quad (4-7)$$

όπου:

N_{cv} = συντελεστής προς τα άνω φέρουσας ικανότητας αργίλου (0 για $c=0$)

$$N_{cv} = 2\left(\frac{H}{D}\right) \leq 10 \text{ για } \left(\frac{H}{D}\right) \leq 10 \quad (4-8)$$

N_{qv} = συντελεστής προς τα άνω φέρουσας ικανότητας άμμου (0 για $\phi=0^\circ$)

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H}{44D}\right) \leq N_q \text{ (Το } N_q \text{ ορίζεται στην παράγραφο 4.3.4)} \quad (4-9)$$

Ενώ η μετακίνηση Δ_{Qu} που αντιστοιχεί στη δύναμη Q_u ορίζεται ως:

$$\Delta_{Qu} = 0.01H \sim 0.02H \text{ για σκληρές και μαλακές άμμους } < 0.1D \quad (4-10)$$

$$\Delta_{Qu} = 0.1H \sim 0.2H \text{ για σφιχτές και χαλαρές αργίλους } < 0.2D$$

4.3.4 Κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα κάτω

Η μέγιστη κάθετη προς τα κάτω δύναμη ανά μέτρο μήκους που μπορεί να μεταφερθεί στον αγωγό είναι:

$$Q_d = N_c cD + N_q \bar{\gamma}HD + N_\gamma \gamma \frac{D^2}{2} \quad (4-11)$$

όπου οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας N_c , N_q , N_γ ορίζονται ως:

$$N_c = [\cot(\phi + 0.001)] * [e^{n \tan(\phi + 0.001)} * \tan^2(45 + \frac{\phi + 0.001}{2}) - 1] \quad (4-12)$$

$$N_q = e^{n \tan \phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (4-13)$$

$$N_\gamma = e^{(0.18\phi - 2.5)} \quad (4-14)$$

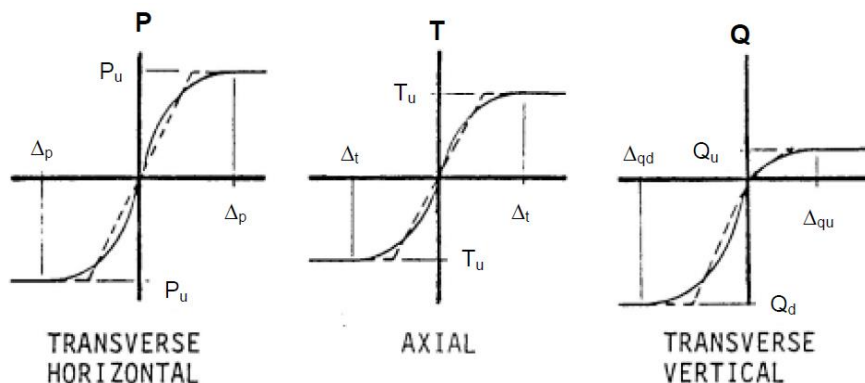
Ενώ η μετακίνηση Δ_{Qd} που αντιστοιχεί στη δύναμη Q_d ορίζεται ως:

$$\Delta_{Qd} = 0.1D \text{ για κοκκώδη εδάφη} \quad (4-15)$$

$$\Delta_{Qd} = 0.2D \text{ για συνεκτικά εδάφη}$$

Τελικά, προκύπτουν τα διαγράμματα που περιγράφουν τη μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών ελατηρίων. Ο οριζόντιος μετελαστικός κλάδος δεν έχει, σύμφωνα με το πρότυπο ASCE-ALA,

συγκεκριμένη παραμόρφωση θραύσης. Τα ενδεικτικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης των εδαφικών ελατηρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3. Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης εδαφικών ελατηρίων [ASCE-ALA: Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe]

4.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για τη μελέτη της απόκρισης ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού σε ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος, χρησιμοποιείται το εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Στόχος της ανάλυσης αυτής είναι ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών στον αγωγό από αυτή τη σεισμική διέγερση, ώστε να αποτιμηθεί η συμπεριφορά του σε πιθανή αστοχία από καθολικό λυγισμό. Η αποτίμηση της συμπεριφοράς σε καθολικό λυγισμό θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 5.

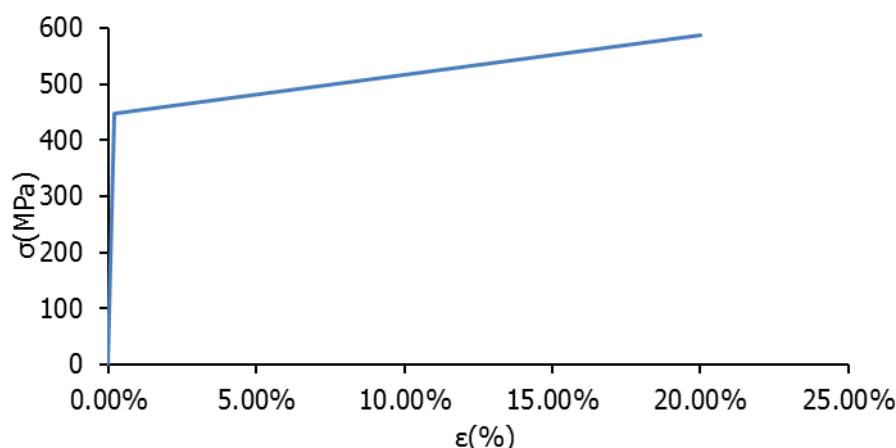
Η πραγματοποιούμενη ανάλυση είναι μη-γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού (Geometric and Material Nonlinear Analysis – GMNA), ενώ στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος arc-length (collapse) προκειμένου να «εντοπισθεί» ενδεχόμενη ασταθής μεταλυγισμική συμπεριφορά. Στη GMNA οι εξισώσεις ισορροπίας διατυπώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη, ενώ ο νόμος του υλικού είναι μη-γραμμικός. Μέσω της GMN ανάλυσης δύναται να περιγραφεί τόσο η λυγισμική, όσο και η μεταλυγισμική συμπεριφορά κατασκευών που είναι ευπαθείς σε λυγισμό και να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση λυγισμού και διαρροής υλικού.

4.4.1 Αγωγός

Για τον αγωγό επιλέγεται μια τυπική διατομή υπόγειου μεταλλικού αγωγού υψηλής πίεσης, με εξωτερική διάμετρο $D=0.9144\text{m}$ (36in), πάχος τοιχώματος $t=0.0119\text{m}$ (0.469in) και συνολικό μήκος $L=1000\text{m}$. Το υλικό του αγωγού είναι χάλυβας ποιότητας API5L-X65, με νόμο υλικού ελαστικό – γραμμικός κρατυνόμενο, του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1 και στο Σχήμα 4-4.

Πίνακας 4-2. Χαρακτηριστικά χάλυβα X65

Τάση διαρροής(MPa)	448.50
Τάση θραύσης(MPa)	587.00
Παραμόρφωση διαρροής(%)	0.2136
Παραμόρφωση θραύσης(%)	20
Μέτρο ελαστικότητας(GPa)	210
Μέτρο κράτυνσης(GPa)	0.70



Σχήμα 4-4. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα X65

Η προσομοίωση του αγωγού γίνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ ο φορέας του συνολικού μήκους $L=1000\text{m}$ διακριτοποιείται ανά 0.50m , έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας που προηγήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης διακριτοποίησης. Ειδικότερα, εξετάστηκαν προσομοιώματα με διακριτοποίηση 0.20m , 0.50m , 1.00m και 2.00m από όπου προέκυψε σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ της διακριτοποίησης των 0.50m και των 1.00m , ενώ οι διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ 0.20m και 0.50m κρίθηκαν ως αμελητέες. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας διακριτοποίησης δεν παρουσιάζονται για λόγους οικονομίας χώρου.

Όσον αφορά τα όρια των μεγίστων επιτρεπόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό από την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος, αυτά εκτιμώνται από τις προτεινόμενες σχέσεις του προτύπου ASCE-ALA. Έτσι, οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις δίνονται από τις εξισώσεις (4-16) και (4-17), αντίστοιχα:

$$\varepsilon_{t,\max} = 2\% \quad (4-16)$$

$$\varepsilon_{c,\max} = 0.50 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0.0025 + 3000 \left(\frac{pD}{2Et} \right)^2, \text{ όπου } D' = \frac{D}{1 - 3(D - D_{\min}) / D} \quad (4-17)$$

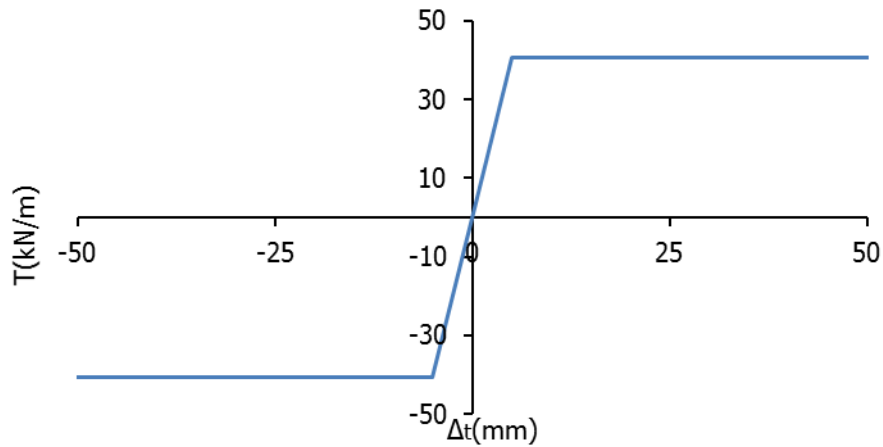
Όπου D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού, D_{\min} η εσωτερική διάμετρος, t το πάχος του τοιχώματος, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και p είναι η εσωτερική πίεση του αγωγού. Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα η εσωτερική πίεση δρα «ανακουφιστικά» έναντι της εξωτερικής εδαφικής πίεσης. Όμως, επί το δυσμενέστερο η εσωτερική πίεση του αγωγού αμελείται και ο αντίστοιχος τελευταίος όρος της σχέσης (4-17) αμελείται. Έτσι, για τη διατομή που εξετάζεται προκύπτει το όριο εφελκυστικών παραμορφώσεων $\varepsilon_{t,\max}=2\%$ και θλιπτικών $\varepsilon_{c,\max}=-0.35\%$.

4.4.2 Έδαφος

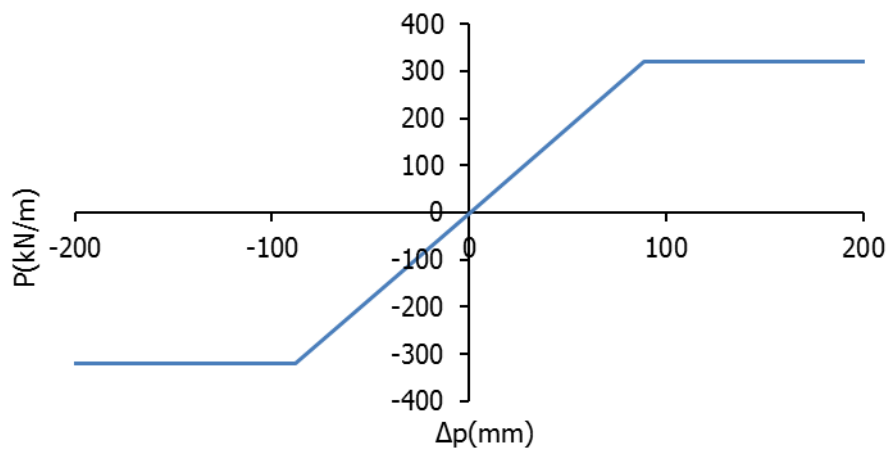
Στην υπό εξέταση περίπτωση θεωρείται ότι ο αγωγός βρίσκεται θαμμένος σε βάθος $H=1.76\text{m}$ έως τη στάθμη του κέντρου βάρους του αγωγού και η επίχωση είναι άμμος μέσης πυκνότητας με εσωτερική γωνία τριβής $\varphi=36^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Τα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων (αξονικά, οριζόντια, κάθετα προς τα άνω και προς τα κάτω) προσδιορίζονται από τις σχέσεις της παραγράφου 4.3. Η μέγιστη δύναμη για κάθε ελατήριο καθώς και η αντίστοιχη μετατόπιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3, ενώ στο Σχήμα 4-5, στο Σχήμα 4-6, στο Σχήμα 4-7 και στο Σχήμα 4-8 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για κάθε τύπο ελατηρίου.

Πίνακας 4-3. Δυνάμεις και μετακινήσεις διαρροής

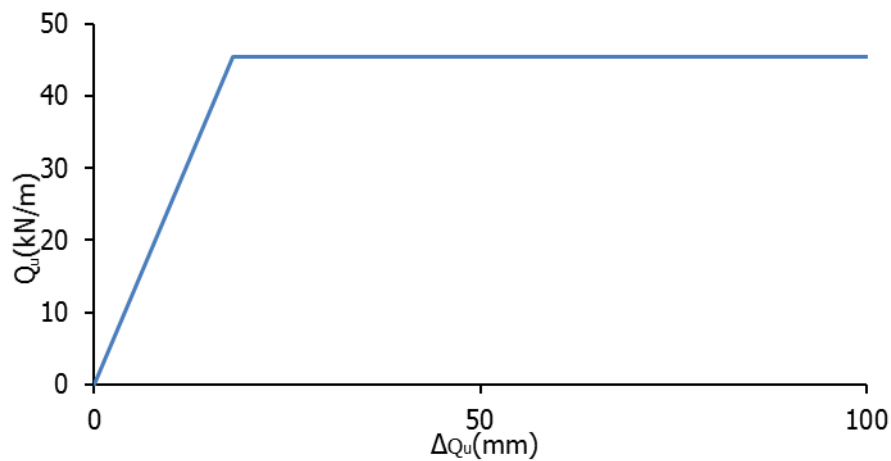
Ελατήρια	Δύναμη διαρροής(kN/m)	Μετατόπιση διαρροής(mm)
Αξονικά	40.72	5.00
Οριζόντια	320.22	88.60
Κατακόρυφα προς τα άνω	45.47	18.00
Κατακόρυφα προς τα κάτω	1494.61	114.30



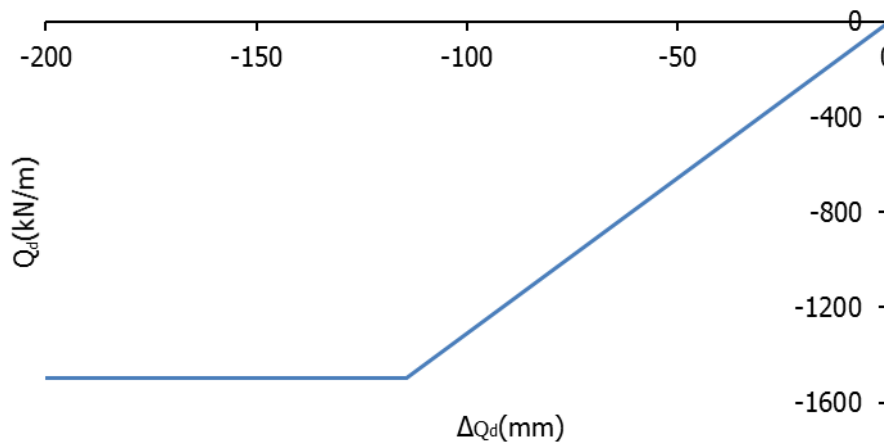
Σχήμα 4-5. Διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης αξονικών ελατηρίων



Σχήμα 4-6. Διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης οριζοντιών ελατηρίων



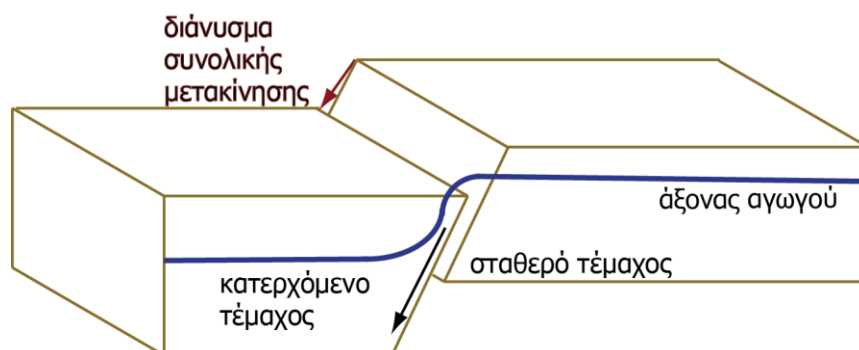
Σχήμα 4-7. Διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων



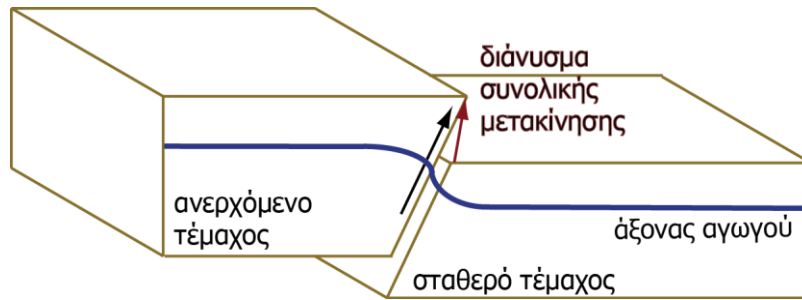
Σχήμα 4-8. Διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων

4.4.3 Προσομοίωση ρήγματος

Εξετάζονται δύο περιπτώσεις σεισμικής διάρρηξης, ένα κανονικό και ένα ανάστροφο ρήγμα, όπως σχηματικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-9 και στο Σχήμα 4-10 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-9. Κανονικό ρήγμα



Σχήμα 4-10. Ανάστροφο ρήγμα

Και στις δύο περιπτώσεις το ρήγμα θεωρείται επίπεδο με μηδενικό πάχος και εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ως ευθεία γραμμή. Ο αγωγός συναντά το ρήγμα υπό γωνία $\beta=20^\circ$, ενώ η γωνία βύθισης των ρηγματών είναι $\psi=70^\circ$. Οι δύο υπό εξέταση περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-11 και στο Σχήμα 4-12, όπου LF είναι το μήκος του ρηγματος στην επιφάνεια του εδάφους, L_p η απόσταση από το πέρας του ρηγματος στην οποία το συναντάει ο αγωγός, ενώ Δ_1 , Δ_2 και Δ_3 είναι οι μετακινήσεις στο επίπεδο του ρηγματος και Δx , Δy και Δz οι αντίστοιχες μετακινήσεις στο επίπεδο του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, Δ_1 και Δ_2 είναι οι μετακινήσεις παράλληλα και κάθετα στον άξονα του ρηγματος, αντίστοιχα, ενώ Δ_3 ονομάζεται η κατακόρυφη μετακίνηση που επιβάλλει η ενεργοποίηση του ρηγματος. Οι μετακινήσεις Δ_2 και Δ_3 συνδέονται με την γωνία βύθισης σύμφωνα με τη σχέση (4-18), ενώ η μετακίνηση Δ_1 παράλληλα στο ρήγμα είναι ανεξάρτητη των υπόλοιπων δύο.

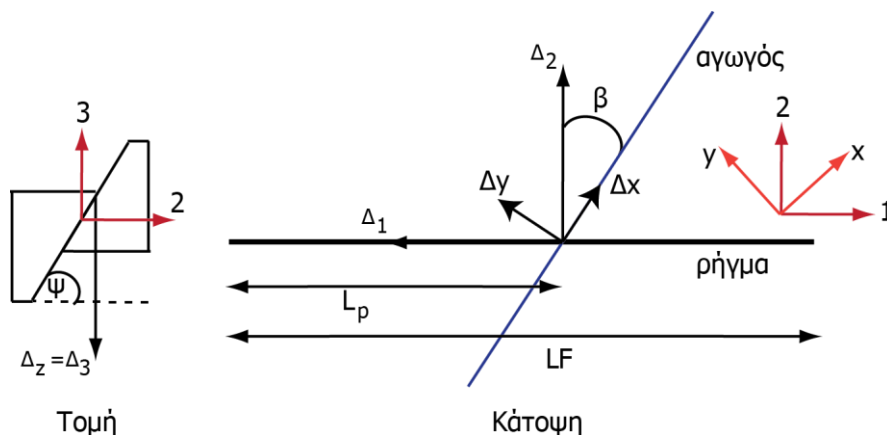
$$\Delta_3 = \Delta_2 \tan(\psi) \quad (4-18)$$

Από περιστροφή του συστήματος αξόνων στον άξονα του αγωγού, προκύπτουν οι μετακινήσεις Δx και Δy παράλληλα και κάθετα στον αγωγό αντίστοιχα, σύμφωνα με τις σχέσεις (4-19) και (4-20). Η κατακόρυφη μετακίνηση Δz ταυτίζεται με την κατακόρυφη μετακίνηση Δ_3 (4-21).

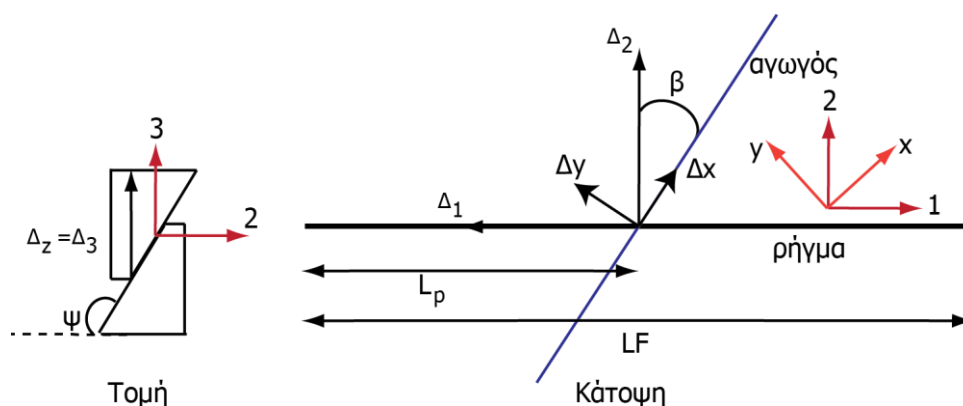
$$\Delta x = \Delta_1 \sin(\beta) + \Delta_2 \cos(\beta) \quad (4-19)$$

$$\Delta y = \Delta_1 \cos(\beta) - \Delta_2 \sin(\beta) \quad (4-20)$$

$$\Delta z = \Delta_3 \quad (4-21)$$

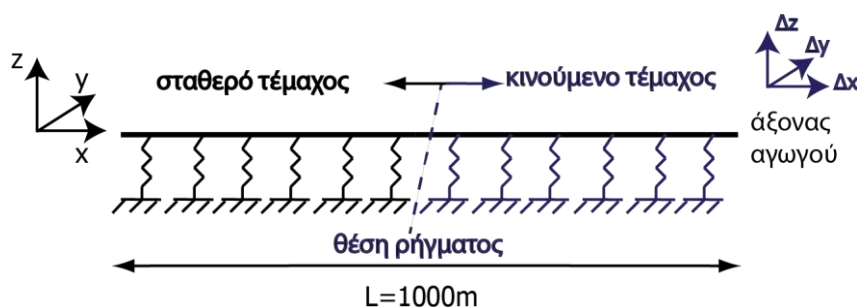


Σχήμα 4-11. Κανονικό ρήγμα



Σχήμα 4-12. Ανάστροφο ρήγμα

Στα αριθμητικά μοντέλα θεωρείται ότι ο αγωγός συναντά το ρήγμα στη μέση του μήκους του, οπότε επιβάλλονται μετακινήσεις στους κόμβους εδάφους των ελατηρίων του μισού αγωγού. Στο Σχήμα 4-13 παρουσιάζεται το υπό μελέτη πρόβλημα, ενώ τα εικονιζόμενα ελατήρια αντικατοπτρίζουν για λόγους ευκρίνειας και τα τέσσερα διαφορετικά εδαφικά ελατήρια που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Οι εδαφικές μετακινήσεις επιβάλλονται στο δεξιό μέρος του σχήματος, κατά τις διευθύνσεις x, y και z του συστήματος αξόνων του αγωγού.



Σχήμα 4-13. Γεωμετρία προβλήματος αριθμητικής προσομοίωσης

Οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις λόγω ενεργοποίησης του ρήγματος είναι κατακόρυφη μετακίνηση $\Delta_3=1\text{m}$ και οριζόντια μετακίνηση $\Delta_1=0.2\text{m}$ και στις δύο περιπτώσεις ρήγματος. Οι μετακινήσεις στο επίπεδο του αγωγού $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ προσδιορίζονται από τις εξισώσεις (4-17), (4-18) και (4-19) και παρατίθενται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4. Επιβαλλόμενες μετακινήσεις στον αγωγό

Ρήγμα	Κανονικό	Ανάστροφο
$\Delta x(\text{m})$	0.410	-0.410
$\Delta y(\text{m})$	0.063	-0.063
$\Delta z(\text{m})$	-1.000	1.000

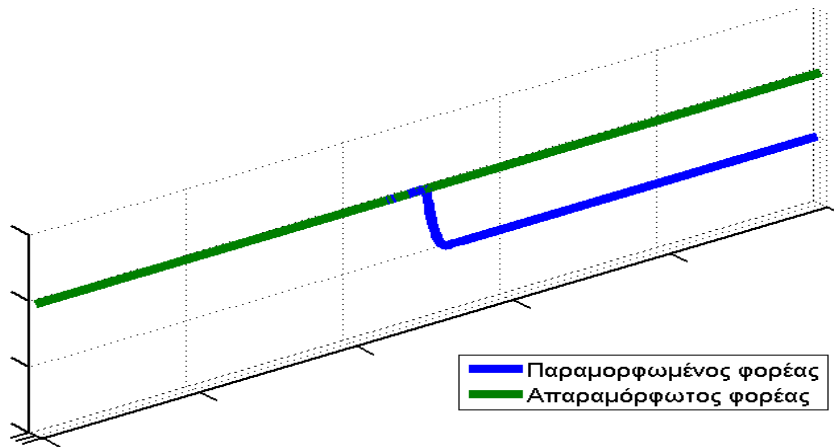
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Τα αποτελέσματα των GMN αναλύσεων παρουσιάζονται σε διαγράμματα που απεικονίζουν την αναπτυσσόμενη ένταση και παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού έπειτα από την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος. Ειδικότερα, παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού στο τέλος της ανάλυσης, μετά τις μόνιμες επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη N κατά μήκος του αγωγού, η καμπτική ροπή στις δύο διευθύνσεις M_y και M_z , η μέγιστη και η ελάχιστη τάση Von Mises σ_{max} και σ_{min} που αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα

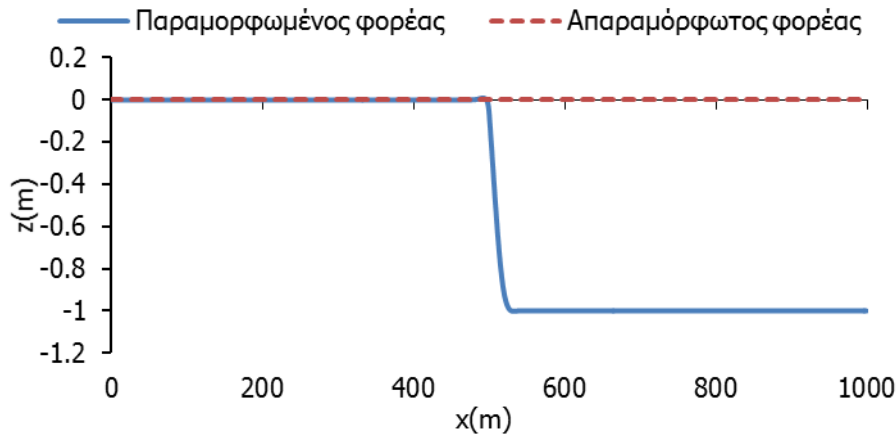
των προηγούμενων, καθώς επίσης και η μέγιστη και η ελάχιστη διαμήκης ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_{,max}$ και $\varepsilon_{,min}$. Τέλος, παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις των εδαφικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού, απ' όπου προκύπτει η έκταση της πλαστικοποίησης του εδάφους πέριξ της θέσης του ρήγματος.

4.5.1 Κανονικό ρήγμα

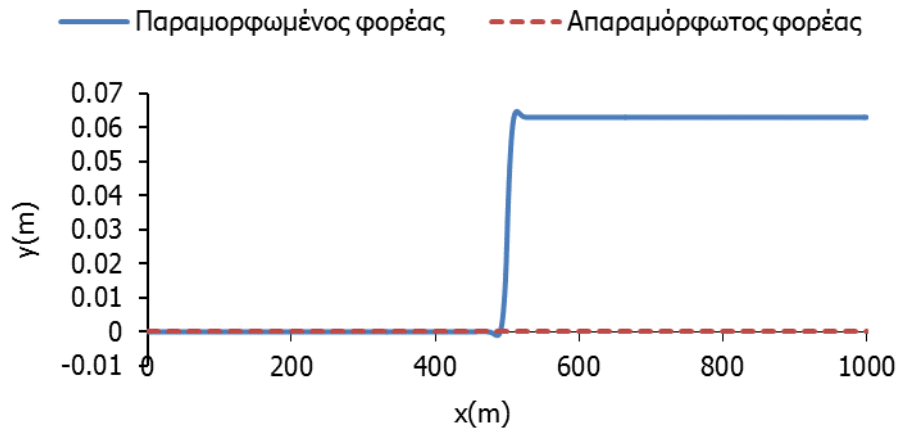
Αρχικά παρουσιάζεται η παραμόρφωση του αγωγού σε τρισδιάστατη απεικόνιση, κάτοψη και όψη λόγω της ενεργοποίησης του ρήγματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αναπτυσσόμενα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη, ενώ στο τέλος της παραγράφου γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.



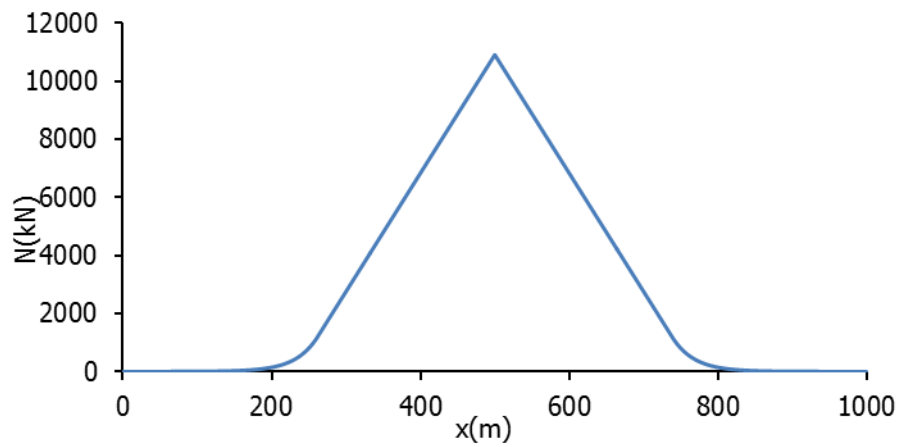
Σχήμα 4-14. Παραμόρφωση αγωγού λόγω ενεργοποίησης ρήγματος



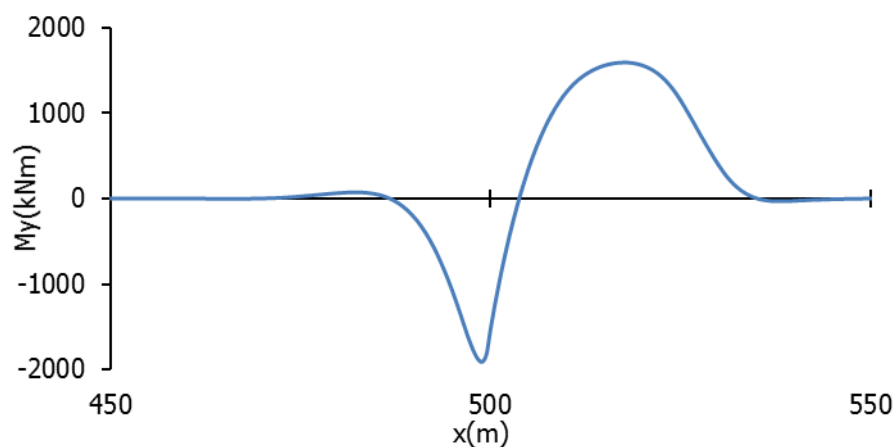
Σχήμα 4-15. Όψη παραμορφωμένου και απαραμόρφωτου φορέα



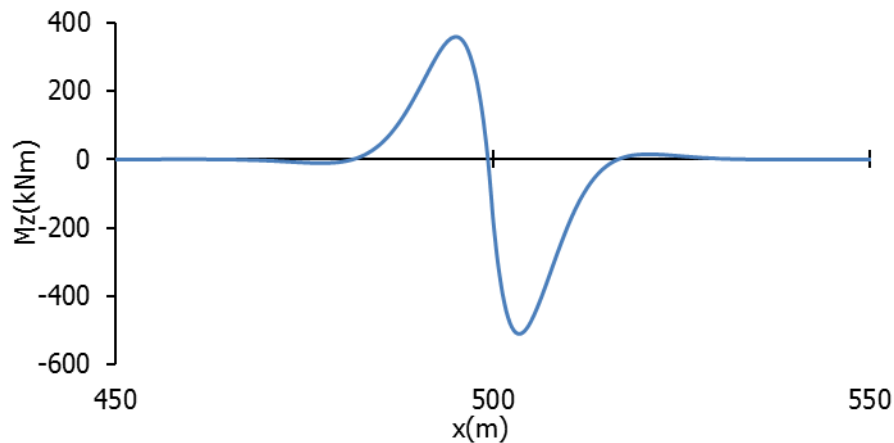
Σχήμα 4-16. Κάτοψη παραμορφωμένου και απαραμόρφωτου φορέα



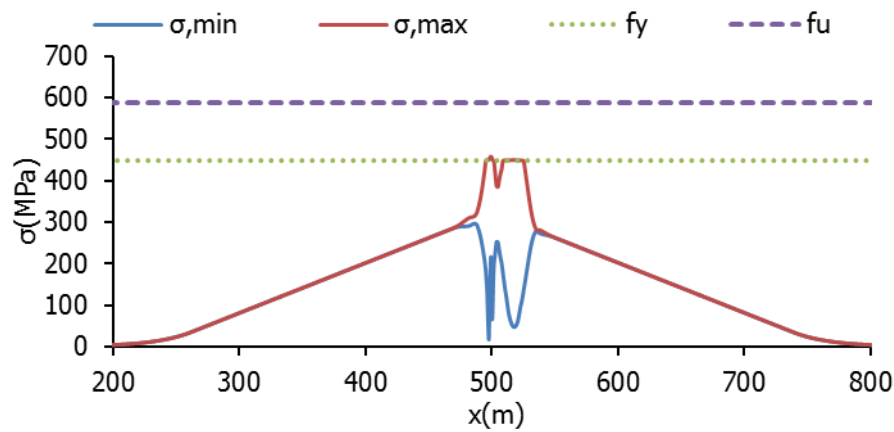
Σχήμα 4-17. Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού



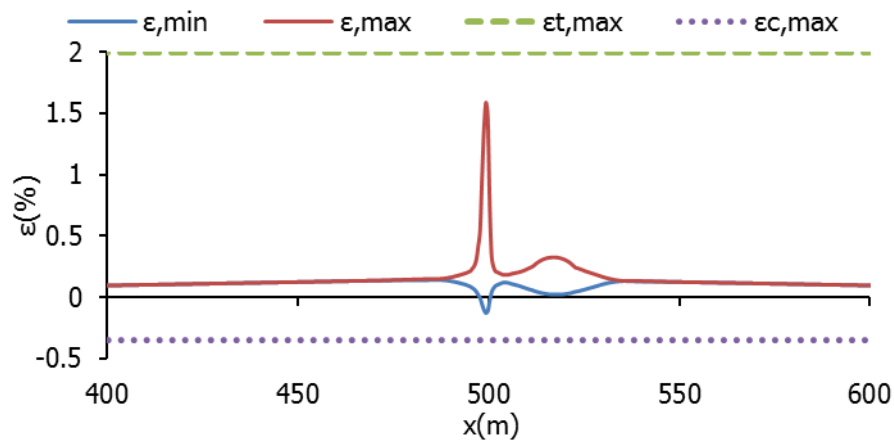
Σχήμα 4-18. Διάγραμμα καμπτικών ροπών στο κατακόρυφο επίπεδο (M_y) κατά μήκος του αγωγού



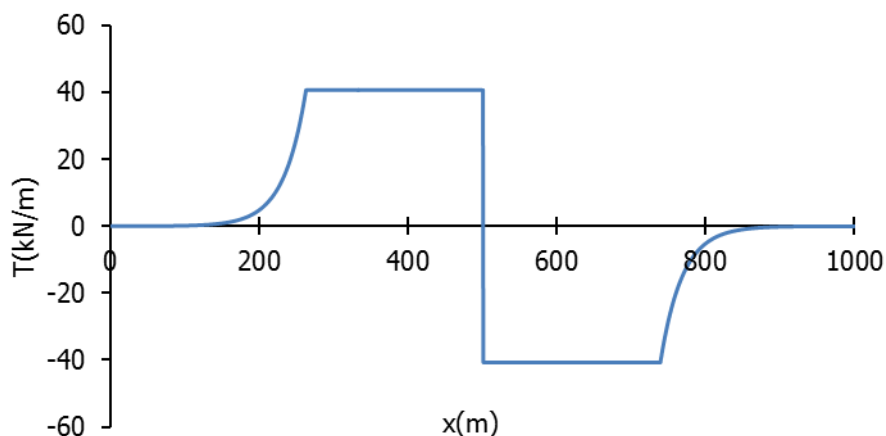
Σχήμα 4-19. Διάγραμμα καμπτικών ροπών στο οριζόντιο επίπεδο (Mz) κατά μήκος του αγωγού



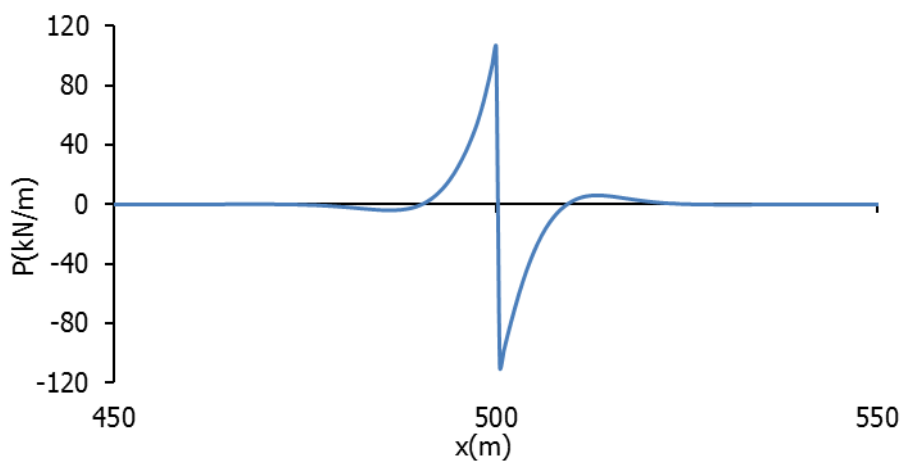
Σχήμα 4-20. Διάγραμμα τάσεων Von Mises κατά μήκος του αγωγού



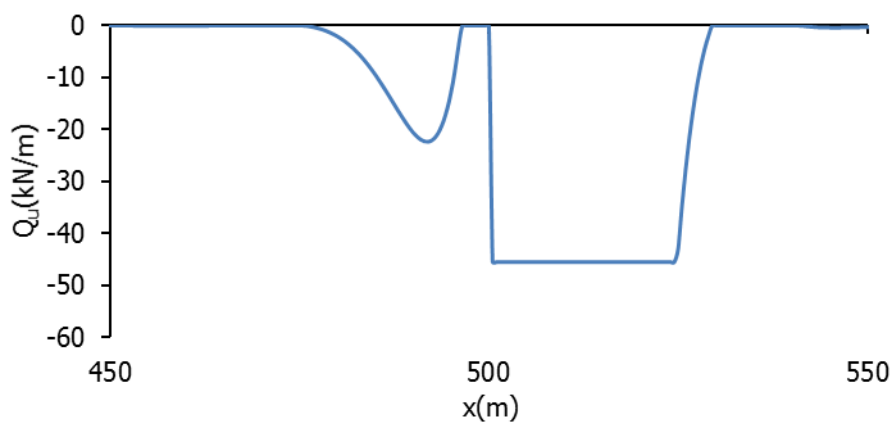
Σχήμα 4-21. Διάγραμμα διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού



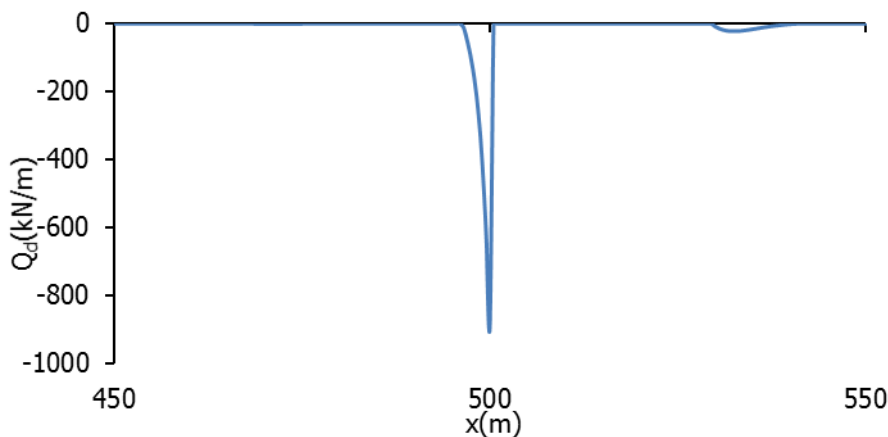
Σχήμα 4-22. Διάγραμμα δυνάμεων αξονικών ελατηρίων τριβής



Σχήμα 4-23. Διάγραμμα δυνάμεων εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων



Σχήμα 4-24. Διάγραμμα δυνάμεων κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων



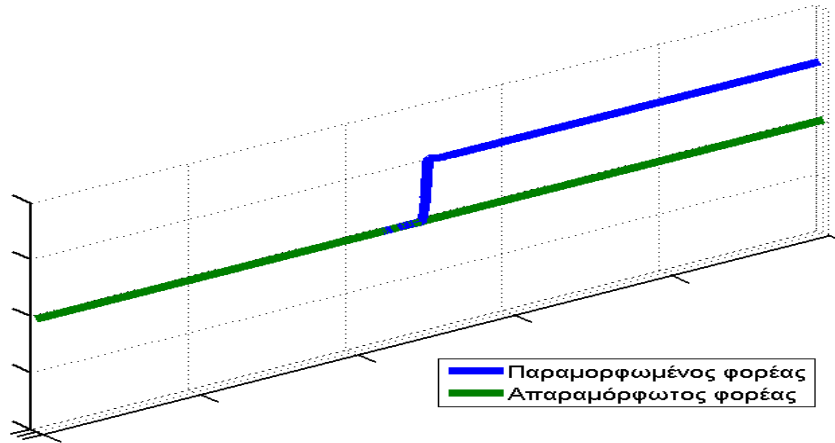
Σχήμα 4-25. Διάγραμμα δυνάμεων κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το κανονικό ρήγμα αναδεικνύουν ότι:

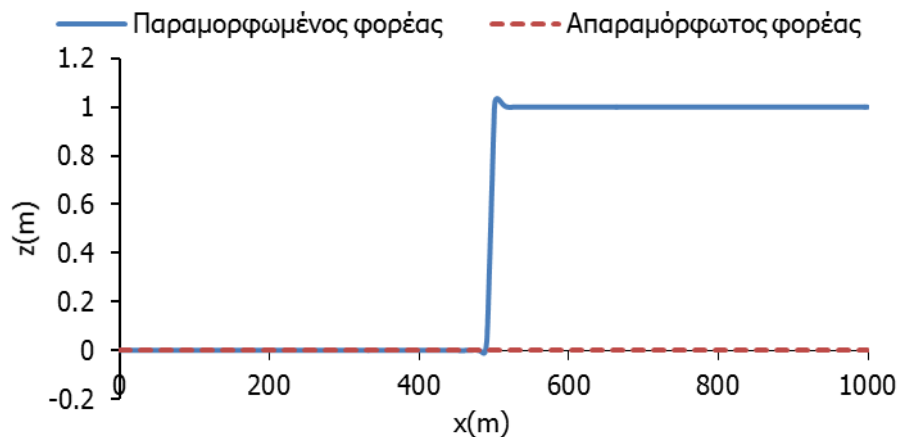
- Κατά μήκος του αγωγού αναπτύσσεται αξονική εφελκυστική δύναμη με διάγραμμα που προσομοιάζει το τριγωνικό σχήμα (Σχήμα 4-17), ενώ η μέγιστη τιμή του βρίσκεται στη θέση του ρήγματος και ισούται με $N=10901.90\text{kN}$.
- Οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές περί τον άξονα y περιορίζονται σε ένα πολύ μικρό μήκος της τάξης των 100m του αγωγού γύρω από το σεισμικό ρήγμα, με μέγιστη τιμή $M=1906.80\text{kNm}$ (Σχήμα 4-18).
- Οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές περί του άξονα z περιορίζονται σε ένα πολύ μικρό μήκος της τάξης των 100m του αγωγού γύρω από το σεισμικό ρήγμα, με μέγιστη τιμή $M=510.39\text{kNm}$ (Σχήμα 4-19).
- Οι τάσεις Von Mises (Σχήμα 4-20) κατά μήκος του αγωγού παρουσιάζουν μία μέγιστη τιμή στην περιοχή του ρήγματος $\sigma=458.13\text{MPa}$. Η μικρή υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα X65 ($f_y=448.50\text{MPa}$) έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μόνιμων μετελαστικών παραμορφώσεων που επηρεάζουν την λειτουργικότητα του αγωγού, χωρίς όμως να τίθεται κίνδυνος θραύσης του κελύφους.
- Αντίστοιχα, οι διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις (Σχήμα 4-21) που αναπτύσσονται στην περιοχή του ρήγματος παρουσιάζουν μέγιστη τιμή $\epsilon=1.59\%$ που είναι μικρότερη από το όριο λειτουργικότητας που προτείνει το ASCE-ALA $\epsilon_{t,max}=2.00\%$ και ελάχιστη τιμή $\epsilon=-0.13\%$ που είναι μικρότερη κατά απόλυτη τιμή από το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων $\epsilon_{c,max}=-0.35\%$.
- Το διάγραμμα των αναπτυσσόμενων δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων (Σχήμα 4-22) υποδηλώνει την πλαστικοποίηση του εδάφους στη διαμήκη διεύθυνση σε μήκος περίπου 500m γύρω από το ρήγμα.
- Από το διάγραμμα των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (Σχήμα 4-23) προκύπτει μεγάλη αύξηση της δύναμης αντίστασης του εδάφους πλευρικά του αγωγού στη θέση του ρήγματος, χωρίς όμως να παρατηρείται πλαστικοποίηση του, καθώς η αναπτυσσόμενη δύναμη είναι μικρότερη της δύναμης διαρροής των πλευρικών ελατηρίων.
- Τέλος, τα διαγράμματα των δυνάμεων των κατακόρυφων ελατηρίων (Σχήμα 4-24 και Σχήμα 4-25) υποδηλώνουν έντονη σημειακή πλαστικοποίηση του μητρικού εδάφους στη θέση του ρήγματος αλλά και πλαστικοποίηση του εδαφικού υλικού της επίχωσης εκατέρωθεν του ρήγματος.

4.5.2 Ανάστροφο ρήγμα

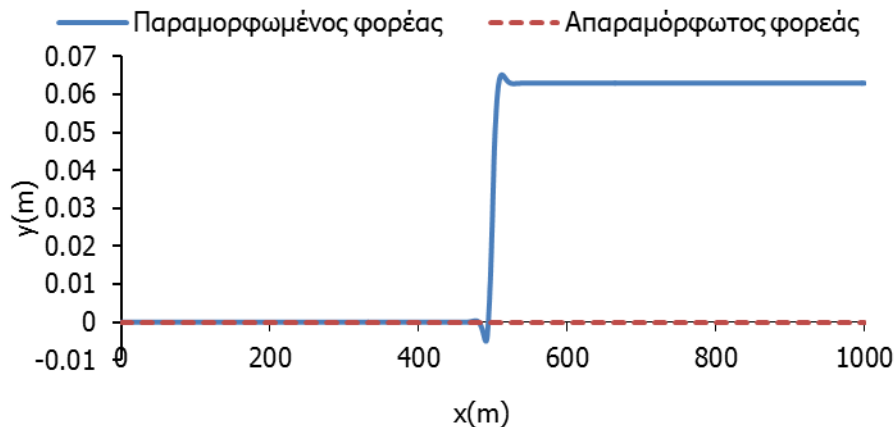
Αρχικά παρουσιάζεται η παραμόρφωση του αγωγού σε τρισδιάστατη απεικόνιση, κάτοψη και όψη λόγω της ενεργοποίησης του ρήγματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αναπτυσσόμενα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη, ενώ στο τέλος της παραγράφου γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.



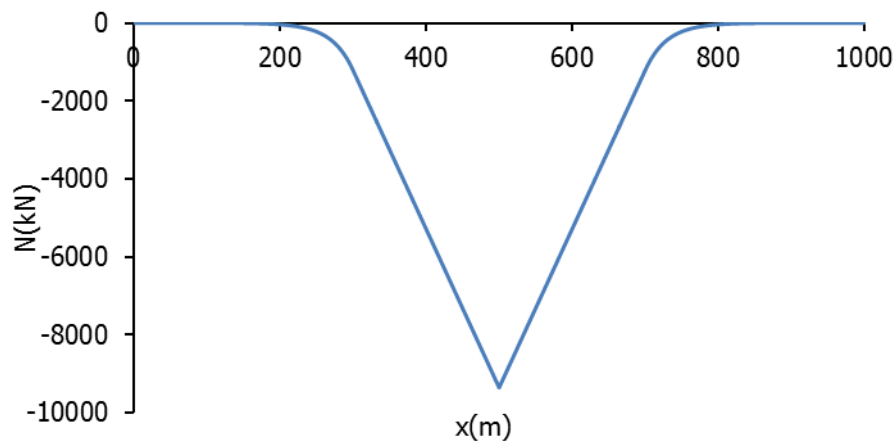
Σχήμα 4-26. Παραμόρφωση αγωγού λόγω ενεργοποίησης ρήγματος



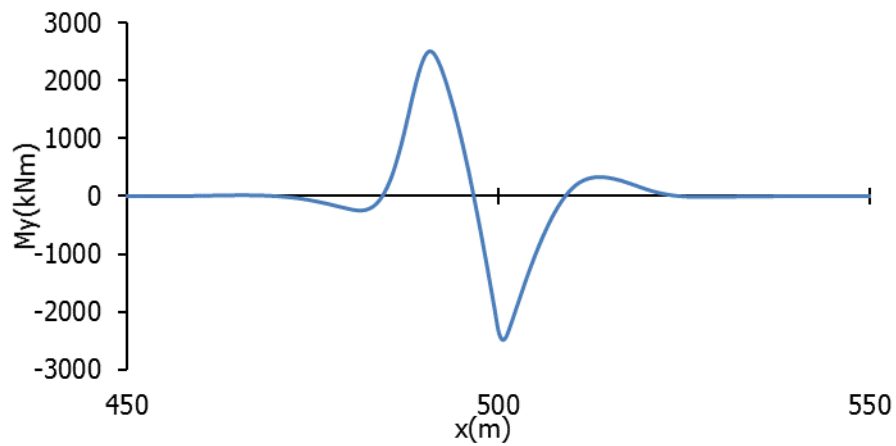
Σχήμα 4-27. Όψη παραμορφωμένου και απαραμόρφωτου φορέα



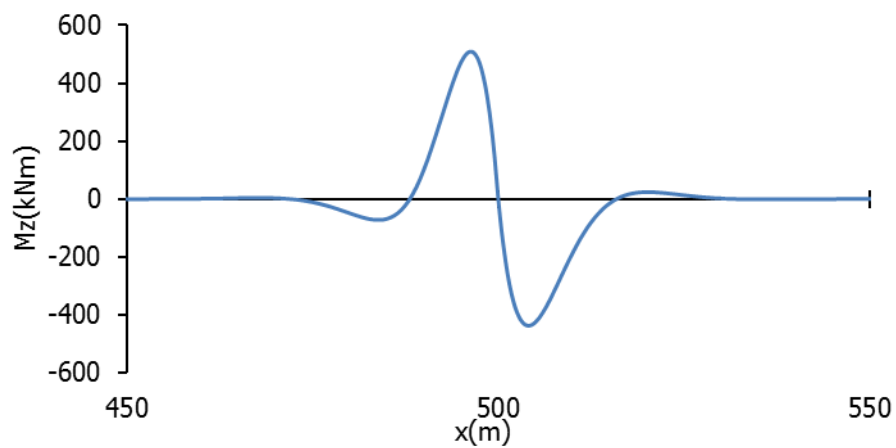
Σχήμα 4-28. Κάτοψη παραμορφωμένου και απαραμόρφωτου φορέα



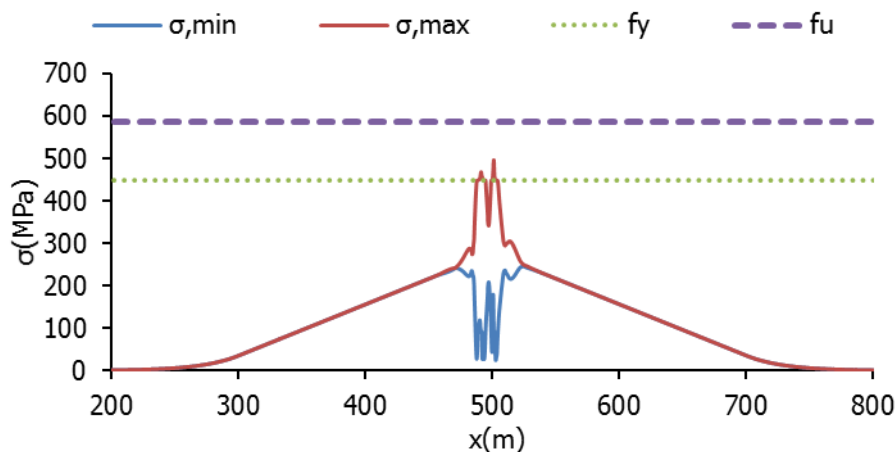
Σχήμα 4-29. Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού



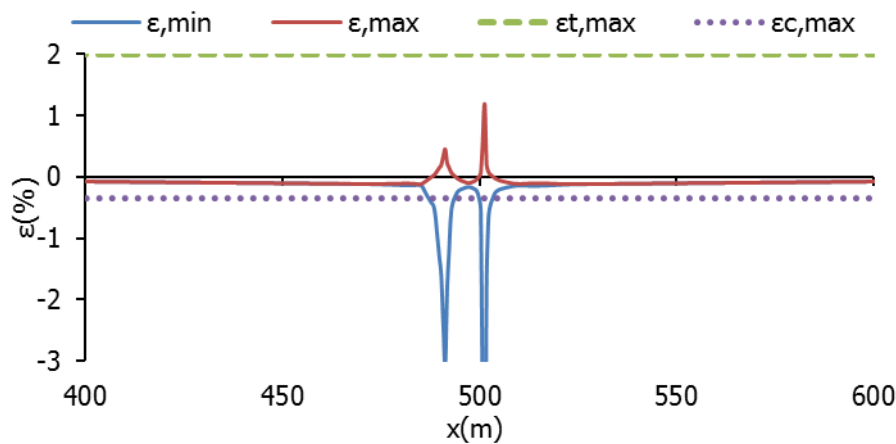
Σχήμα 4-30. Διάγραμμα καμπτικών ροπών στο κατακόρυφο επίπεδο (M_y) κατά μήκος του αγωγού



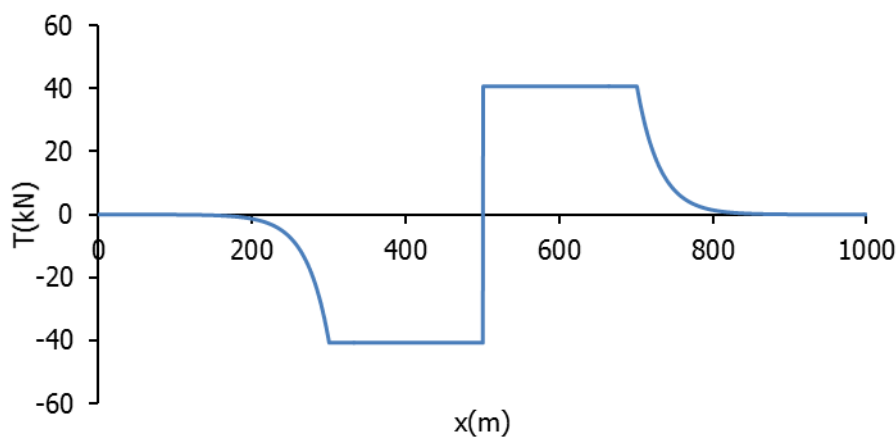
Σχήμα 4-31. Διάγραμμα καμπτικών ροπών στο οριζόντιο επίπεδο (M_z) κατά μήκος του αγωγού



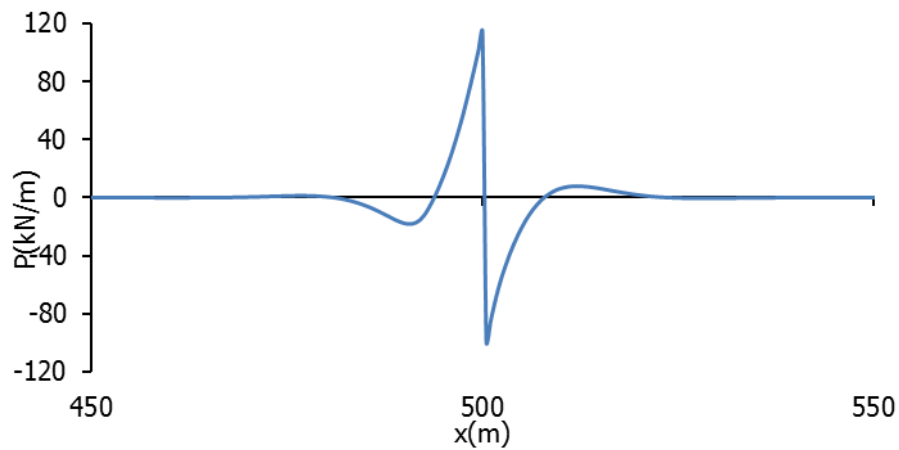
Σχήμα 4-32. Διάγραμμα τάσεων Von Mises κατά μήκος του αγωγού



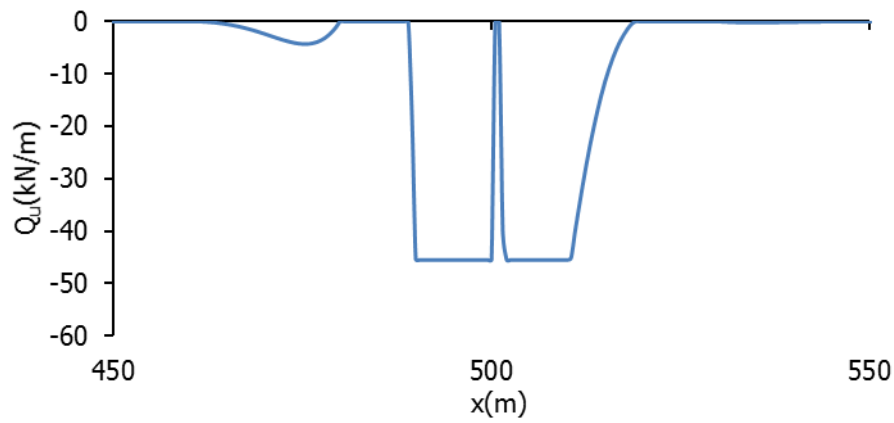
Σχήμα 4-33. Διάγραμμα διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού



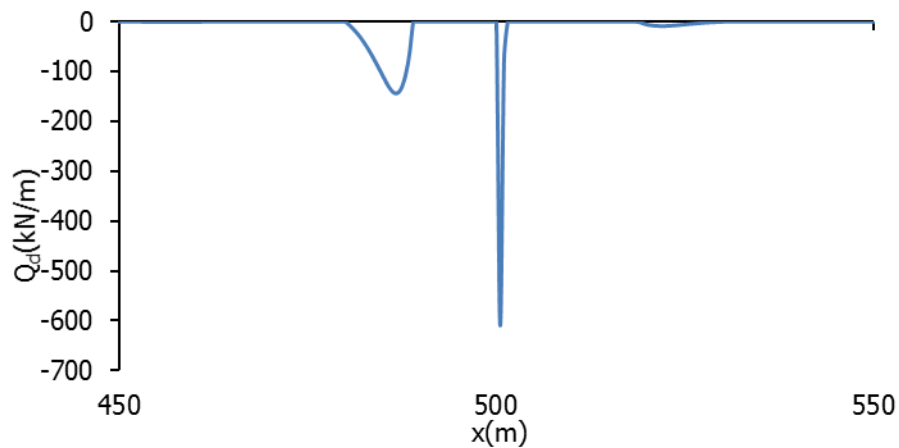
Σχήμα 4-34. Διάγραμμα δυνάμεων αξονικών ελατηρίων τριβής



Σχήμα 4-35. Διάγραμμα δυνάμεων εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων



Σχήμα 4-36. Διάγραμμα δυνάμεων κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων



Σχήμα 4-37. Διάγραμμα δυνάμεων κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων

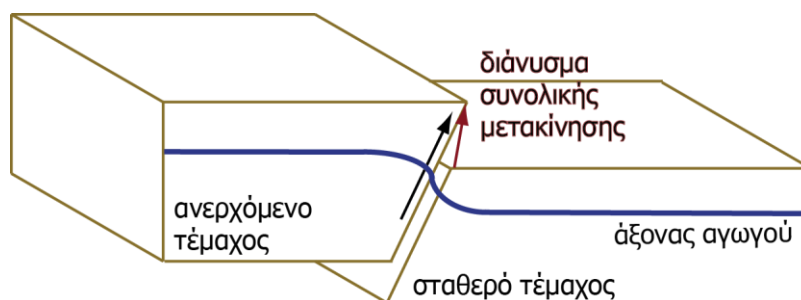
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το ανάστροφο ρήγμα αναδεικνύουν ότι:

- Κατά μήκος του αγωγού αναπτύσσεται αξονική θλιπτική δύναμη με διάγραμμα που προσομοιάζει το τριγωνικό σχήμα (Σχήμα 4-29), ενώ η μέγιστη τιμή του βρίσκεται στη θέση του ρήγματος και ισούται με $N=-9358.94\text{kN}$.
- Οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές περιορίζονται σε ένα πολύ μικρό μήκος του αγωγού της τάξης των 100m γύρω από το σεισμικό ρήγμα, με μέγιστη τιμή $M=2505.29\text{kNm}$ (Σχήμα 4-30).
- Οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές περί του άξονα z περιορίζονται σε ένα πολύ μικρό μήκος του αγωγού της τάξης των 100m γύρω από το σεισμικό ρήγμα, με μέγιστη τιμή $M=508.80\text{kNm}$ (Σχήμα 4-31).
- Οι τάσεις Von Mises (Σχήμα 4-32) κατά μήκος του αγωγού παρουσιάζουν μία μέγιστη τιμή στην περιοχή του ρήγματος $\sigma=496.60\text{MPa}$. Η μικρή υπέρβαση του ορίου διαρροής του χάλυβα X65 ($f_y=448.50\text{MPa}$) έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μόνιμων μετελαστικών παραμορφώσεων που επηρεάζουν την λειτουργικότητα του αγωγού, χωρίς όμως να τίθεται κίνδυνος θραύσης του κελύφους.
- Αντίστοιχα, οι διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις (Σχήμα 4-33) που αναπτύσσονται στην περιοχή του ρήγματος παρουσιάζουν μέγιστη τιμή $\varepsilon=1.91\%$ που είναι μικρότερη από το όριο λειτουργικότητας που προτείνει το ASCE-ALA $\varepsilon_{t,max}=2.00\%$ και ελάχιστη τιμή $\varepsilon=-7.09\%$ που είναι μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή από το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων $\varepsilon_{c,max}=-0.35\%$. Επομένως ο αγωγός έχει αστοχήσει από τοπικό λυγισμό λόγω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων.
- Το διάγραμμα των αναπτυσσόμενων δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων (Σχήμα 4-34) υποδηλώνει την πλαστικοποίηση του εδάφους στη διαμήκη διεύθυνση σε μήκος περίπου 500m γύρω από το ρήγμα.
- Από το διάγραμμα των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (Σχήμα 4-35) προκύπτει μεγάλη αύξηση της δύναμης αντίστασης του εδάφους πλευρικά του αγωγού στη θέση του ρήγματος, χωρίς όμως να παρατηρείται πλαστικοποίηση του, καθώς η αναπτυσσόμενη δύναμη είναι μικρότερη της δύναμης διαρροής των πλευρικών ελατηρίων.
- Τέλος, τα διαγράμματα των δυνάμεων των κατακόρυφων ελατηρίων (Σχήμα 4-36 και Σχήμα 4-37) υποδηλώνουν έντονη σημειακή πλαστικοποίηση του μητρικού εδάφους στη θέση του ρήγματος αλλά και πλαστικοποίηση του εδαφικού υλικού της επίχωσης εκατέρωθεν του ρήγματος.

5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΛΟΓΩ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αποτίμηση του κινδύνου εκδήλωσης καθολικού λυγισμού χαλύβδινων αγωγών που διέρχονται από ανάστροφα σεισμικά ρήγματα. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4, η ενεργοποίηση ενός ανάστροφου ρήγματος έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη σύνθετης εντατικής κατάστασης στον αγωγό, καθώς πέραν της καμπτικής έντασης αναπτύσσονται και μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις κατά μήκος του αγωγού. Η ενεργοποίηση ενός ανάστροφου ρήγματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

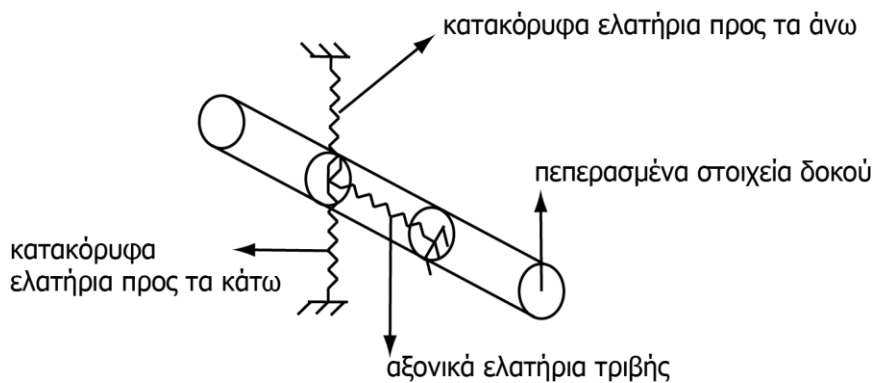


Σχήμα 5-1. Ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος

Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο με μηδενικό πάχος και εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ως ευθεία γραμμή. Ο αγωγός θεωρείται ότι συναντάει κάθετα το ρήγμα, ενώ η γωνία βύθισης του ανάστροφου ρήγματος είναι $\psi=70^\circ$. Έτσι οι μετακινήσεις Δ_1 , Δ_2 και Δ_3 στο επίπεδο του ρήγματος ταυτίζονται με τις αντίστοιχες μετακινήσεις Δ_x , Δ_y και Δ_z στο επίπεδο του αγωγού. Χάρην απλοποίησης στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι η οριζόντια μετακίνηση του ρήγματος πραγματοποιείται αποκλειστικά εντός του κατακόρυφου επιπέδου που διέρχεται από τον αγωγό, χωρίς εγκάρσια προς τον αγωγό συνιστώσα ($\Delta_1=\Delta_y=0$).

Συνεπώς, υιοθετείται το προσομοίωμα της δοκού μεγάλου μήκους επί ελαστοπλαστικού εδάφους με συνεχή πλευρική κατακόρυφη στήριξη από ομοιόμορφα κατανεμημένα εγκάρσια ελατήρια που

προσομοιώνουν την προς τα άνω (upward movement) και την προς τα κάτω κίνηση (downward movement) του αγωγού εντός του ορύγματος. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπ' όψιν και η αλληλεπίδραση αγωγού – εδάφους μέσω της τριβής που προσομοιώνεται με διαμήκη αξονικά ελατήρια. Ο αγωγός προσομοιώνεται αριθμητικά σε δύο διαστάσεις με πεπερασμένα στοιχεία δοκού, καθώς η δυνατότητα που αυτά παρέχουν για υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων σε επιλεγμένες θέσεις τόσο κατά μήκος του αγωγού, όσο και επί της διατομής τα καθιστούν ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για την αποτίμηση της καθολικής και – εμμέσως, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια – της τοπικής συμπεριφοράς του αγωγού. Ακολουθώντας, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού προσομοιώνονται με μη-γραμμικά ελατήρια μετάθεσης σε δύο διευθύνσεις. Ειδικότερα, η τριβή μεταξύ του αγωγού και του εδάφους προσομοιώνεται με διαμήκη ελατήρια, των οποίων οι ιδιότητες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της εδαφικής επίχωσης και του περιβλήματος του αγωγού. Ταυτόχρονα, ένα ζεύγος κατακόρυφων ελατηρίων προσομοιώνει την κατακόρυφη κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος με τα χαρακτηριστικά τους να διαφέρουν σημαντικά λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της υπερκείμενης εδαφικής επίχωσης και του υποκείμενου μητρικού εδάφους. Η αριθμητική προσομοίωση του εδάφους και του αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2.



Σχήμα 5-2. Προσομοίωση αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους

Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος υλοποιείται στην παρούσα εργασία μέσω ενός παραδείγματος και προσεγγίζεται αριθμητικά με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ένας ευθύγραμμος αγωγός συνολικού μήκους $L=1000\text{m}$ με διατομή διαμέτρου $D=0.9144\text{m}$ (36in) και πάχους τοιχώματος $t=0.0119\text{m}$ (0.469in).

Η προσομοίωση του αγωγού γίνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ ο φορέας του συνολικού μήκους 1000m διακριτοποιείται ανά 0.50m, έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας που προηγήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης διακριτοποίησης. Μελετήθηκαν μοντέλα με διακριτοποίηση ανά 0.20m, 0.50m, 1.00m και 2.00m από όπου προέκυψε σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ της διακριτοποίησης των 0.50m και των 1.00m, ενώ οι διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ 0.20m και 0.50m κρίθηκαν ως αμελητέες.

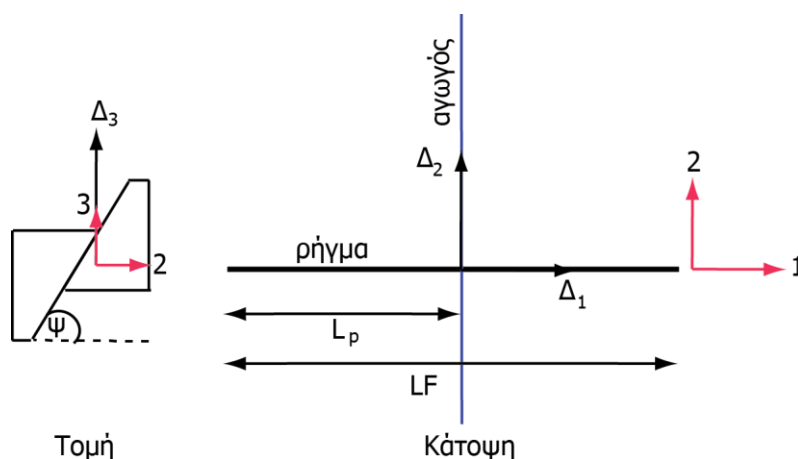
Στην υπό εξέταση περίπτωση θεωρείται ότι ο αγωγός βρίσκεται θαμμένος σε βάθος $H=1.76\text{m}$ έως τη στάθμη του κέντρου βάρους του αγωγού και το υλικό επίχωσης είναι άμμος μέσης πυκνότητας με γωνία τριβής $\phi=36^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Ο αγωγός περιβάλλεται εξωτερικά με πίσσα λιθάνθρακα (coal tar), με συντελεστή $f=0.90$ ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους δίνει τη γωνία τριβής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Επιπλέον, το έδαφος προσομοιώνεται με ελαστοπλαστικά μετακινησιακά ελατήρια των οποίων τα χαρακτηριστικά εκτιμώνται σύμφωνα με τις οδηγίες του ASCE-ALA και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1. Τα διαγράμματα δύναμης – μετακίνησης των χρησιμοποιούμενων εδαφικών ελατηρίων (αξονικά εδαφικά ελατήρια, κατακόρυφα

εδafικά ελατήρια προς τα άνω, κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα κάτω) έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4. (Σχήμα 4-5, Σχήμα 4-7 και Σχήμα 4-8).

Πίνακας 5-1. Δυνάμεις και μετακινήσεις διαρροής εδαφικών ελατηρίων

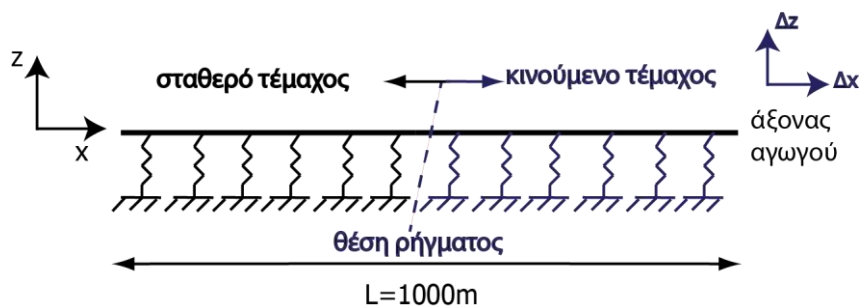
Ελατήρια	Δύναμη διαρροής(kN/m)	Μετατόπιση διαρροής(mm)
Αξονικά	40.72	5.00
Κατακόρυφα προς τα άνω	45.47	18.00
Κατακόρυφα προς τα κάτω	1494.61	114.30

Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος, όπου LF είναι το μήκος του ρήγματος στην επιφάνεια του εδάφους, L_p η απόσταση από το πέρας του ρήγματος στην οποία το συναντάει ο αγωγός. Το ρήγμα ενεργοποιούμενο μετακινείται κατακόρυφα κατά $\Delta_3=4.00\text{m}$ και κατά το διαμήκη άξονα του αγωγού κατά $\Delta_2=1.46$. Η μετακίνηση του εδάφους στο ανερχόμενο τέμαχος του ρήγματος υλοποιείται στο αριθμητικό προσομοίωμα ως στατικά επιβαλλόμενη μετακίνηση στους αντίστοιχους εδαφικούς κόμβους των ελατηρίων.



Σχήμα 5-3. Γεωμετρία προβλήματος

Στα αριθμητικά μοντέλα θεωρείται ότι ο αγωγός συναντά το ρήγμα στη μέση του μήκους του, οπότε επιβάλλονται μετακινήσεις στους κόμβους εδάφους των ελατηρίων του μισού αγωγού. Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται το υπό μελέτη πρόβλημα, ενώ τα εικονιζόμενα ελατήρια αντικατοπτρίζουν για λόγους ευκρίνειας και τα τρία διαφορετικά εδαφικά ελατήρια που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Οι εδαφικές μετακινήσεις επιβάλλονται στο δεξιό μέρος του σχήματος, κατά τις διευθύνσεις x και z του συστήματος αξόνων του αγωγού.



Σχήμα 5-4. Γεωμετρία αριθμητικής προσομοίωσης

5.2 ΚΑΘΟΛΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΑΓΩΓΟΥ

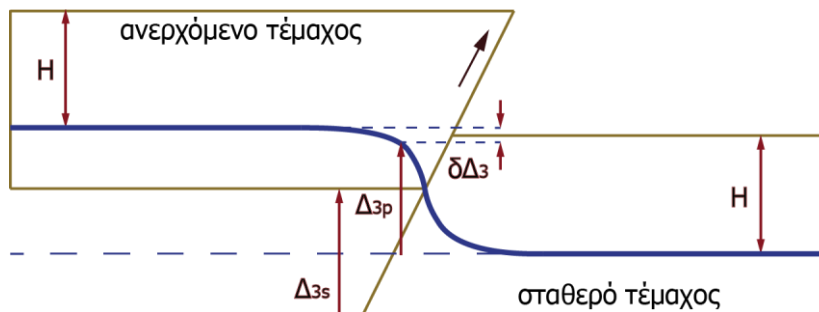
Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω της ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος και των συνεπαγόμενων μεγάλων αναπτυσσόμενων θλιπτικών δυνάμεων υλοποιείται αξιοποιώντας το αριθμητικό προσομοίωμα που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Ο υπό εξέταση αγωγός χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο λόγο $D/t=76.84$ και βρίσκεται θαμμένος σε σχετικά μεγάλο βάθος ($H=1.76m$). Έτσι, αναμένεται να κυριαρχήσει ο τοπικός λυγισμός ως μορφή αστοχίας (Yun και Kyriakides [1-4]). Παρ' όλα αυτά κατά το σχεδιασμό του αγωγού κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση της αλληλουχίας των πιθανών μορφών αστοχίας, ώστε αφενός να αναδειχθεί η κρίσιμη μορφή αστοχίας, αφετέρου δε να αξιολογηθεί η συνολική συμπεριφορά του φορέα.

Το φαινόμενο του λυγισμού χαρακτηρίζεται από έντονη γεωμετρική μη-γραμμικότητα όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα διατυπώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Έτσι, η μελέτη της προλυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του φορέα πραγματοποιείται μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού ώστε να αποτιμηθεί η αλληλεπίδραση του λυγισμού και της αστοχίας του υλικού. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται ένας ελαστοπλαστικός αγωγός, όπου ο χάλυβας είναι ποιότητας API5L-X65, με διγραμμικό νόμο υλικού και χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2, και ο ίδιος αγωγός θεωρούμενος ως απείρως ελαστικός, για λόγους σύγκρισης.

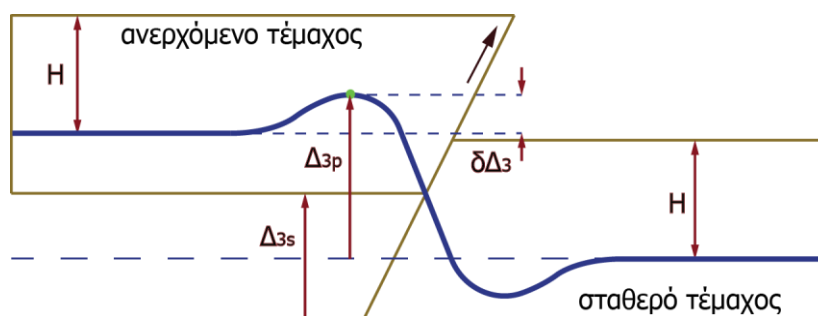
Πίνακας 5-2. Χαρακτηριστικά χάλυβα X65

Τάση διαρροής(MPa)	448.50
Τάση θραύσης(MPa)	587.00
Παραμόρφωση διαρροής(%)	0.21
Παραμόρφωση θραύσης(%)	20
Μέτρο ελαστικότητας(GPa)	210
Μέτρο κράτυνσης(GPa)	0.70

Καθώς το υπό εξέταση πρόβλημα θεωρείται δισδιάστατο, στο Σχήμα 5-5 και στο Σχήμα 5-6 απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του αγωγού και του εδάφους, όπου H είναι το βάθος ταφής του αγωγού, Δ_{3s} είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος, Δ_{3p} είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού, και $\delta\Delta_3 = \Delta_{3p} - \Delta_{3s}$ είναι η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, στο Σχήμα 5-5 απεικονίζεται η περίπτωση όπου $\delta\Delta_3 < 0$ για μικρή μετακίνηση του ανερχόμενου τεμάχου του ρήγματος, ενώ στο Σχήμα 5-6 απεικονίζεται η περίπτωση όπου $\delta\Delta_3 > 0$ για μεγάλη μετακίνηση του ανερχόμενου τεμάχου του ρήγματος, οπότε η παραμόρφωση του αγωγού αποκτά χαρακτηριστικά καθολικού λυγισμού.



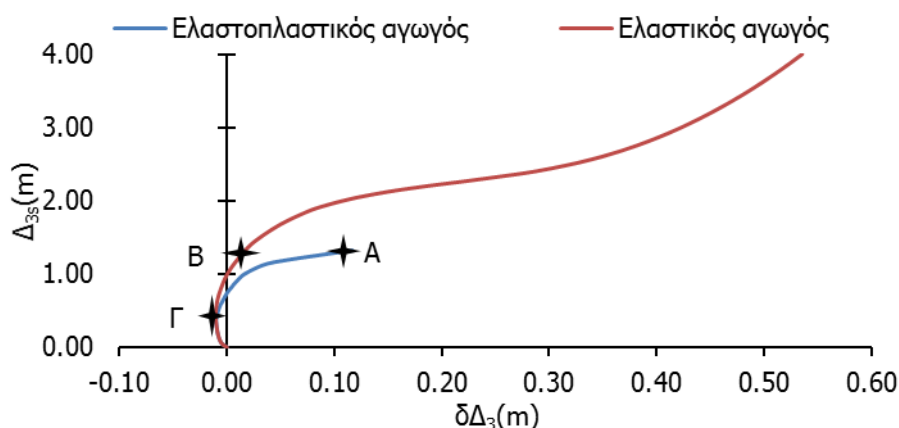
Σχήμα 5-5. Ορισμός κατακορύφων μετακινήσεων αγωγού και ρήγματος για $\delta\Delta_3 < 0$



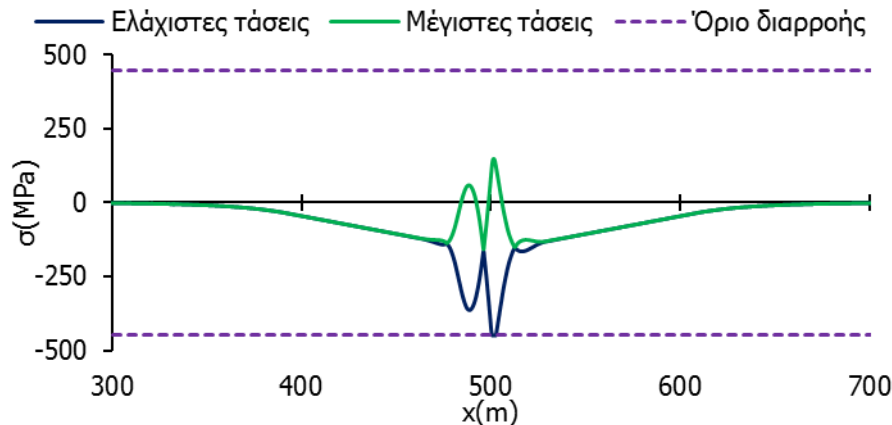
Σχήμα 5-6. Ορισμός κατακόρυφων μετακινήσεων αγωγού και ρήγματος για $\delta\Delta_3 > 0$

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η προλυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά του ελαστικού και του ελαστοπλαστικού αγωγού αποτυπώνονται στους δρόμους ισορροπίας του Σχήματος 5-7. Ειδικότερα, στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση ενός χαρακτηριστικού σημείου κατά μήκος του αγωγού ($\delta\Delta_3$) και στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση (Δ_{3s}). Ως χαρακτηριστικό επιλέγεται το σημείο κατά μήκος του ελαστοπλαστικού φορέα που εμφανίζει τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση (Δ_{3p}) στο τέλος της ανάλυσης και σημειώνεται στο Σχήμα 5-6. Σημειώνεται ότι οι δρόμοι ισορροπίας για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} εμφανίζουν τιμές μετακίνησης $\delta\Delta_3 < 0$ καθώς αρχικά η παραμόρφωση των αγωγών είναι ομαλή σύμφωνα με το Σχήμα 5-5. Όσο, όμως, αυξάνεται η μετακίνηση του ρήγματος η συγκριτικά μικρότερη δυσκαμψία της εδαφικής επίχωσης σε σχέση με το μητρικό έδαφος οδηγεί σε μη αμελητέα παραμόρφωση του αγωγού προς τα άνω, δημιουργώντας τη χαρακτηριστική παραμόρφωση του Σχήματος 5-6. Στη συμπεριφορά τόσο του ελαστικού όσο και του ελαστοπλαστικού αγωγού εκδηλώνεται έντονη μη-γραμμικότητα. Η συμπεριφορά του ελαστικού αγωγού χαρακτηρίζεται αρχικά από σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας και στη συνέχεια από αύξησή της, καθώς η μεταλυγισμική συμπεριφορά είναι ευσταθής με απουσία οριακού σημείου. Ο δρόμος ισορροπίας του ελαστοπλαστικού αγωγού συμπίπτει με αυτόν του ελαστικού ως ένα σημείο Γ, για επιβαλλόμενη μετακίνηση $\Delta_{3s} = 0.30\text{m}$, και στη συνέχεια αποχωρίζεται από αυτόν εμφανίζοντας ταχύτερη μείωση της δυσκαμψίας λόγω τοπικής διαρροής του χάλυβα του αγωγού. Η κατανομή των μεγίστων και ελαχίστων διαμήκων τάσεων κατά μήκος του ελαστοπλαστικού αγωγού στο σημείο Γ απεικονίζεται στο Σχήμα 5-8 αποτυπώνοντας πράγματι την πρώτη διαρροή του αγωγού.

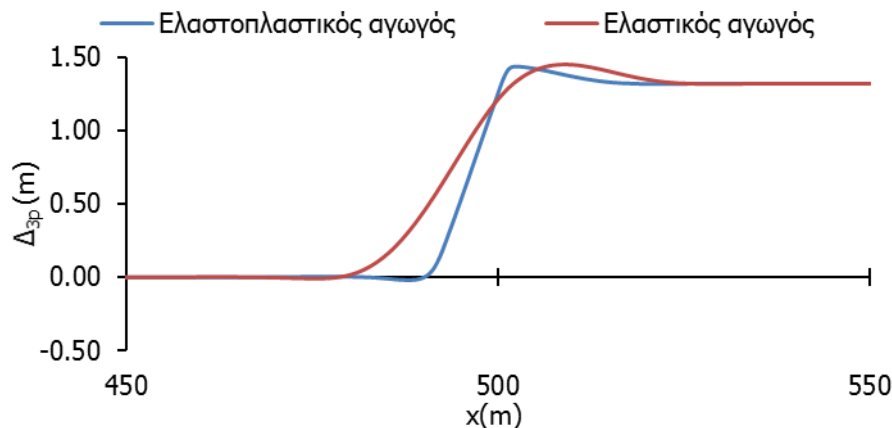


Σχήμα 5-7. Δρόμοι ισορροπίας ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού



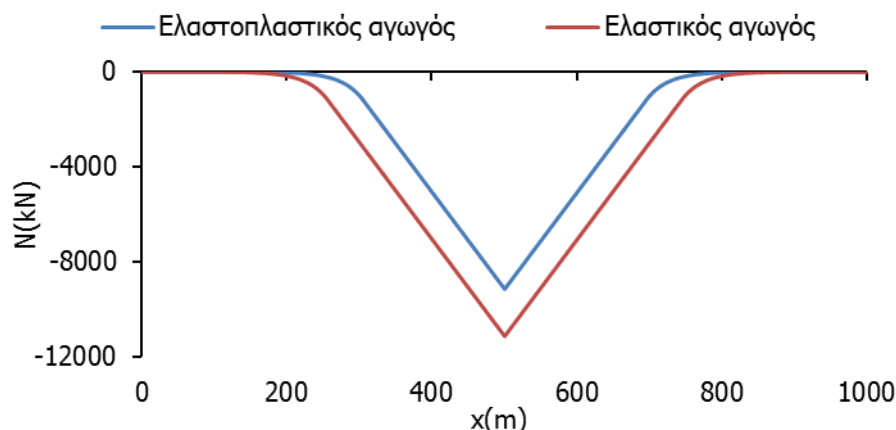
Σχήμα 5-8. Κατανομή διαμήκων ορθών τάσεων κατά μήκος του ελαστοπλαστικού αγωγού στο σημείο Γ του δρόμου ισορροπίας

Στους δρόμους ισορροπίας σημειώνονται επίσης τα σημεία A και B που αντιστοιχούν στην ίδια στάθμη επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης $\Delta_{3s}=1.32\text{m}$, εκείνη για την οποία ολοκληρώνεται η ανάλυση του ελαστοπλαστικού αγωγού. Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζεται λεπτομέρεια της κατακόρυφης μετακίνησης του ελαστικού και του ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία B και A αντίστοιχα. Οι διαφορές στο παραμορφωμένο σχήμα των φορέων οφείλονται στη διαρροή της διατομής του ελαστοπλαστικού αγωγού που με τη σειρά της οδηγεί σε λιγότερη ομαλή κατακόρυφη μετακίνηση. Αντιθέτως, ο ελαστικός αγωγός παρουσιάζει ομαλότερη παραμόρφωση, η οποία παράλληλα εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος αγωγού.

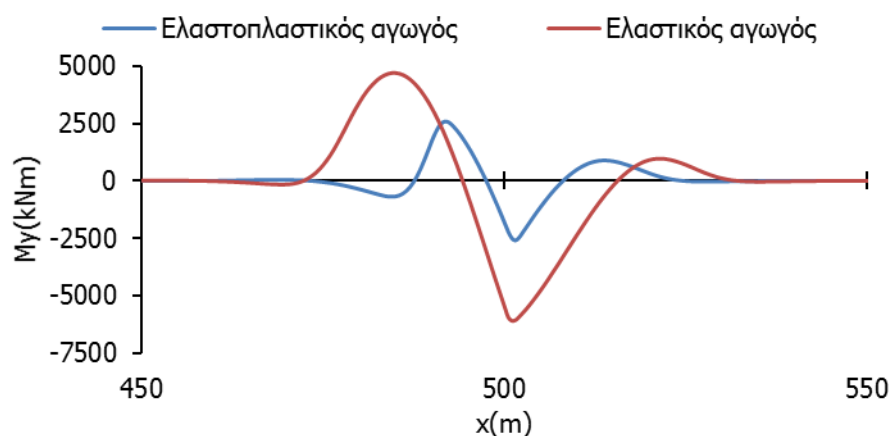


Σχήμα 5-9. Λεπτομέρεια παραμόρφωσης ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία B και A αντίστοιχα

Τέλος, στο Σχήμα 5-10 και στο Σχήμα 5-11 απεικονίζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων (N) και καμπικών ροπών (M_y) αντίστοιχα του ελαστικού και του ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία B και A, όπου παρατηρείται ότι ο ελαστοπλαστικός αγωγός αναπτύσσει μικρότερες αξονικές δυνάμεις και καμπικές ροπές. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαρροής της διατομής, καθώς μετά από αυτήν εκδηλώνεται μείωση της δυσκαμψίας και ο ρυθμός αύξησης των εντατικών μεγεθών είναι μικρότερος συγκριτικά με την ελαστική περιοχή. Σημειώνεται, επίσης, ότι στον ελαστικό αγωγό η επιρροή της μετακίνησης του ρήγματος σε όρους αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος του αγωγού.



Σχήμα 5-10. Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία Β και Α αντίστοιχα



Σχήμα 5-11. Λεπτομέρεια κατανομής καμπτικών ροπών κατά μήκος του ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία Β και Α αντίστοιχα

5.4 ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

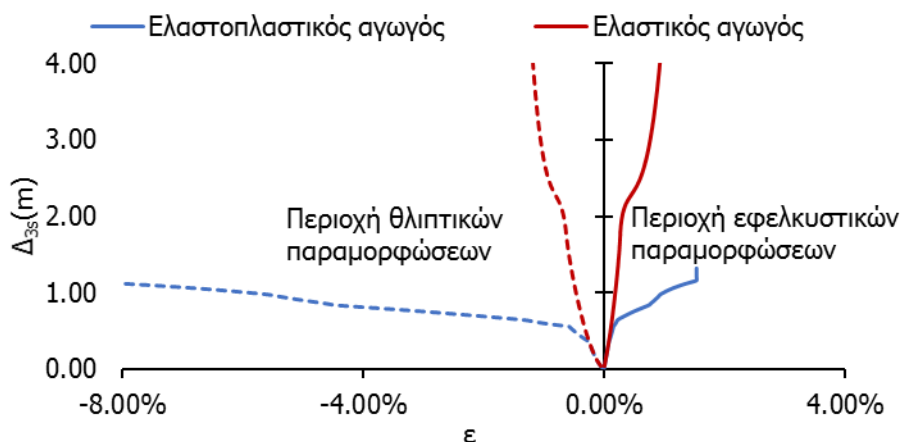
Ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού του αγωγού εξετάζεται στην παρούσα εργασία συναρτήσει των άλλων ενδεχόμενων μορφών αστοχίας του αγωγού, ήτοι της αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων και του τοπικού λυγισμού του τοιχώματος λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων. Η προσομοίωση του αγωγού, όμως, με πεπερασμένα στοιχεία δοκού δεν επιτρέπει την άμεση παρατήρηση φαινομένων τοπικού λυγισμού ούτε θραύσης των συγκολλήσεων. Έτσι, η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό και θραύση συγκολλήσεων πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μέγιστες αναπτυσσόμενες ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής με τα κανονιστικώς προτεινόμενα όρια διαμήκων παραμορφώσεων έναντι αυτών των μορφών αστοχίας. Στην παρούσα εργασία για τα όρια των διαμήκων θλιπτικών και εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων υιοθετούνται οι προτεινόμενες σχέσεις του ASCE-ALA. Συγκεκριμένα, το όριο εφελκυστικών παραμορφώσεων ($\epsilon_{t,max}$) δίνεται από την εξίσωση (5-1), και το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων ($\epsilon_{c,max}$) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-2) όπου D η διάμετρος του αγωγού, t το πάχος τοιχώματος, E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, p η εσωτερική πίεση και D_{min} η εσωτερική διάμετρος του αγωγού.

$$\varepsilon_{t,\max} = 2\% \quad (5-1)$$

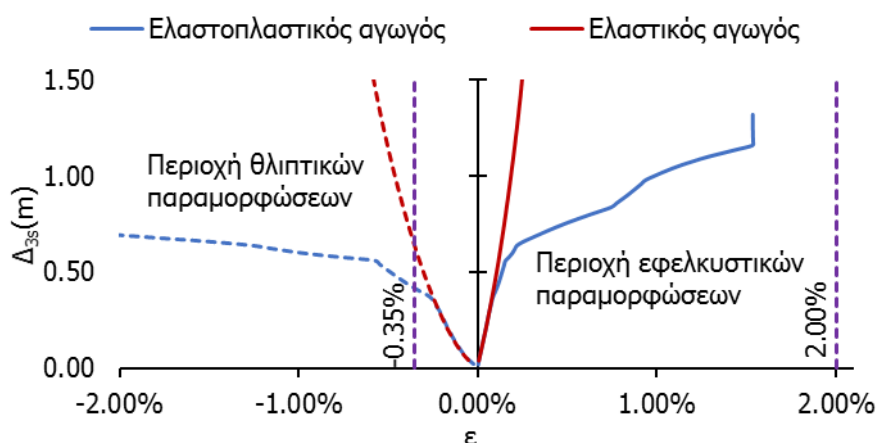
$$\varepsilon_{c,\max} = 0.50 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0.0025 + 3000 \left(\frac{\rho D}{2Et} \right)^2, \text{ όπου } D' = \frac{D}{1 - 3(D - D_{\min}) / D} \quad (5-2)$$

Το υπολογιζόμενο σύμφωνα με την εξίσωση (5-2) όριο θλιπτικών παραμορφώσεων περιέχει και έναν όρο για την εσωτερική πίεση του αγωγού, η οποία στην πραγματικότητα δρα «ανακουφιστικά» έναντι την εξωτερικής εδαφικής πίεσης. Στην παρούσα εργασία και επί το δυσμενέστερο η εσωτερική πίεση θεωρείται μηδενική και ο αντίστοιχος τελευταίος όρος της απαλείφεται. Έτσι, εφαρμόζοντας την εξίσωση (5-2) για τον υπό εξέταση αγωγό προκύπτει ότι το όριο των διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων ισούται με $\varepsilon_{c,\max} = -0.35\%$.

Με βάση τα ανωτέρω η ενδεχόμενη αστοχία του ελαστοπλαστικού αγωγού από τοπικό λυγισμό ή θραύση των συγκολλήσεων εξετάζεται αξιοποιώντας το δρόμο ισορροπίας των ανηγμένων παραμορφώσεων, δηλαδή την εξέλιξη των μέγιστων θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τη σταδιακή επιβολή της εδαφικής μετακίνησης Δ_{3s} . Έτσι, το Σχήμα 5-12 παρουσιάζει τη συνολική εξέλιξη των διαμήκων παραμορφώσεων συναρτήσει της μετακίνησης Δ_{3s} , όπου με αρνητικό πρόσημο παρουσιάζονται οι θλιπτικές παραμορφώσεις και με θετικό οι εφελκυστικές. Στην περίπτωση του ελαστικού αγωγού παρατηρούμε σχετικά ομοιόμορφη αύξηση των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων έως την επιβολή του συνόλου της μετακίνησης Δ_{3s} . Αντίθετα, στην περίπτωση του ελαστοπλαστικού αγωγού για μικρές τιμές της μετακίνησης Δ_{3s} ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων είναι ίδιος με τον ελαστικό αγωγό, έως του σημείου πρώτης διαρροής, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός αυτός αυξάνεται έντονα.



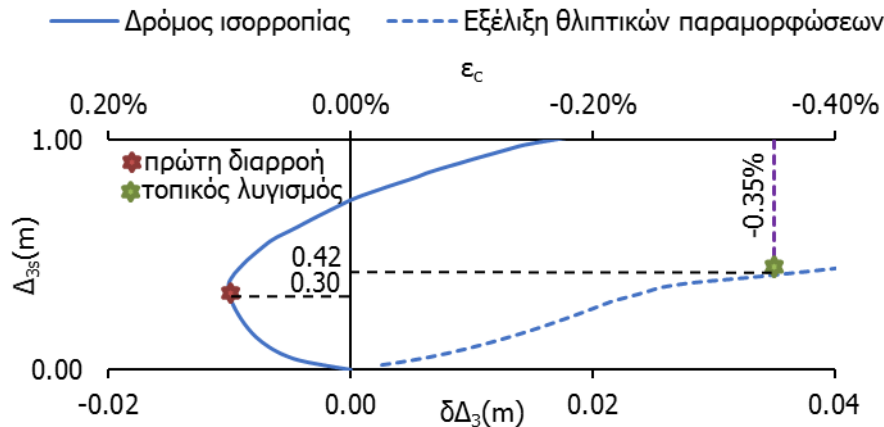
Σχήμα 5-12. Εξέλιξη θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού



Σχήμα 5-13. Εξέλιξη θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού με τα κανονιστικά όρια παραμορφώσεων

Ακολουθώντας, στο Σχήμα 5-13 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχήματος 5-12 συμπεριλαμβανομένων των ορίων παραμορφώσεων των εξισώσεων (5-1) και (5-2) για τις εφελκυστικές και τις θλιπτικές παραμορφώσεις αντίστοιχα. Το πρώτο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις δε φθάνουν το κανονιστικώς ορισθέν όριο που συνεπάγεται αποφυγή αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων. Τούτο συνάδει και με τη «φόρτιση» του αγωγού μιας και η ενεργοποίηση του ανάστροφου ρήγματος προκαλεί αξονική θλίψη και καμπτική ένταση στον αγωγό. Έτσι, οι αναπτυσσόμενες τάσεις του αγωγού αναμένεται να είναι κυρίαρχα θλιπτικές. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και το γεγονός ότι το όριο επιτρεπόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων είναι πολύ αυστηρότερο από το εκείνο των εφελκυστικών, η αστοχία από τοπικό λυγισμό αναμένεται κρίσιμότερη εκείνης από εφελκυστική θραύση των ραφών συγκόλλησης. Ειδικότερα, στην περίπτωση του ελαστικού αγωγού επέρχεται αστοχία λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων για $\Delta_{3s}=0.64\text{m}$, ενώ στην περίπτωση του ελαστοπλαστικού αγωγού για $\Delta_{3s}=0.42\text{m}$, η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από τη μετακίνηση $\Delta_{3s}=0.30\text{m}$ που προκαλεί την πρώτη διαρροή, όπως εποπτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-14 όπου συνδυάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του φορέα σε όρους κατακορύφων σχετικών μετακινήσεων και σε όρους μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων.

Συνεπώς, οι αριθμητικές αναλύσεις του υπό εξέταση βαθιά θαμμένου αγωγού με μεγάλο λόγο D/t αναδεικνύουν ως κρίσιμη μορφή αστοχίας στην περίπτωση που ο αγωγός διέρχεται από ανάστροφο σεισμικό ρήγμα τον ανελαστικό τοπικό λυγισμό, με τη διαρροή του χάλυβα να εκδηλώνεται αρχικά και τον τοπικό λυγισμό να ακολουθεί αμέσως μετά, για μικρή αύξηση της εδαφικής μετακίνησης. Η θραύση των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων δεν αναμένεται ως μηχανισμός αστοχίας όταν ο αγωγός υπόκειται σε εδαφική μετακίνηση λόγω ανάστροφου ρήγματος. Επίσης, ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού χαρακτηρίζεται πρακτικά ως ανύπαρκτος, λαμβάνοντας υπ' όψιν την πρακτικών μηδενική διαφορική μετακίνηση του αγωγού $\delta\Delta_3$ στη στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} για την οποία επέρχεται ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός της διατομής.



Σχήμα 5-14. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας ελαστοπλαστικού αγωγού

5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στη συνέχεια εξετάζεται ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού αγωγών με διαφορετικούς λόγους διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος D/t , καθώς και αγωγών που διέρχονται από διαφορετικής γωνίας ανάστροφα ρήγματα. Στόχος των αναλύσεων αυτών είναι η αποτίμηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού με την μείωση του λόγου D/t που, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Yun και Kyriakides, 1990 [1-4]), καθιστά τον καθολικό λυγισμό του αγωγού κρισιμότερο, καθώς και με τη μείωση της γωνίας του ανάστροφου ρήγματος που συνεπάγεται αύξηση των επιβαλλόμενων αξονικών θλιπτικών δυνάμεων.

5.5.1 Επιρροή γωνίας ρήγματος

Η γωνία ενός ανάστροφου ρήγματος παίζει σημαντικό ρόλο στην αναλογία επιβαλλόμενων θλιπτικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών κατά την ενεργοποίηση ανάστροφου σεισμικού ρήγματος. Για το λόγο αυτό εξετάζονται επιπλέον πέντε περιπτώσεις γωνίας του ανάστροφου ρήγματος και οι οποίες συγκρίνονται με τη γωνία των 70° που εξετάστηκε στην ενότητα 5.4. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι περιπτώσεις γωνιών 50° (Περίπτωση I), 55° (Περίπτωση II), 60° (Περίπτωση III), 65° (Περίπτωση IV), 70° (Περίπτωση V) και 75° (Περίπτωση VI).

Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος υλοποιείται μέσω παραδειγμάτων και προσεγγίζεται αριθμητικά με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ένας ευθύγραμμος αγωγός συνολικού μήκους $L=1000\text{m}$ με διατομή διαμέτρου $D=0.9144\text{m}$ (36in) και πάχους τοιχώματος $t=0.0119\text{m}$ (0.469in).

Σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση θεωρείται ότι ο αγωγός βρίσκεται θαμμένος σε βάθος $H=1.76\text{m}$ έως τη στάθμη του κέντρου βάρους του αγωγού και το υλικό επίχωσης είναι άμμος μέσης πυκνότητας με γωνία τριβής $\varphi=36^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Ο αγωγός περιβάλλεται εξωτερικά με πίσσα λιθάνθρακα (coal tar), με συντελεστή $f=0.90$ ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους δίνει τη γωνία τριβής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Επιπλέον, το έδαφος προσομοιώνεται με ελαστοπλαστικά μετακινησιακά ελατήρια των οποίων τα χαρακτηριστικά εκτιμώνται σύμφωνα με τις οδηγίες του ASCE-ALA και έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 5-1.

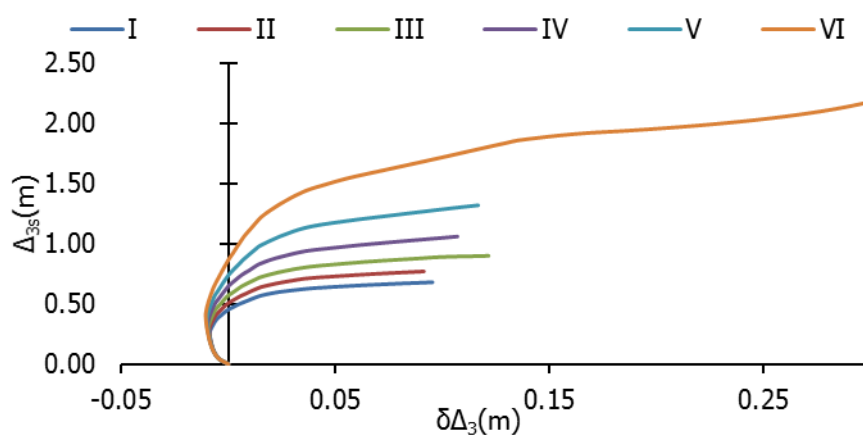
Η γεωμετρία του προβλήματος παραμένει ίδια σε κάθε περίπτωση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-3. Το ρήγμα ενεργοποιούμενο μετακινείται κατακόρυφα σε κάθε προσομοίωμα κατά $\Delta_3=4.00\text{m}$ και κατά το διαμήκη άξονα του αγωγού κατά $\Delta_2=\Delta_3/\tan(\psi)$, όπου ψ η γωνία βύθισης του ανάστροφου ρήγματος. Η μετακίνηση του εδάφους στο ανερχόμενο τμήμα του ρήγματος υλοποιείται στο αριθμητικό προσομοίωμα ως στατικά επιβαλλόμενη μετακίνηση στους αντίστοιχους εδαφικούς

κόμβους των ελατηρίων. Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζονται οι υπό εξέταση περιπτώσεις με τις αντίστοιχες επιβαλλόμενες μετακινήσεις.

Πίνακας 5-3. Επιβαλλόμενες μετακινήσεις για κάθε γωνία ρήγματος

Περίπτωση	Γωνία ρήγματος	Δ_{3s} (m)	Δ_{2s} (m)
I	50°	2.00	1.68
II	55°	2.00	1.40
III	60°	2.00	1.15
IV	65°	2.00	0.93
V	70°	2.00	0.73
VI	75°	2.00	0.54

Η προλυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά των αγωγών στις έξι υπό εξέταση περιπτώσεις αποτυπώνονται στους δρόμους ισορροπίας του Σχήματος 5-15. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση ενός χαρακτηριστικού σημείου κατά μήκος του αγωγού ($\delta\Delta_3$) και στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση (Δ_{3s}). Ως χαρακτηριστικά σημεία σε κάθε φορά λαμβάνονται τα σημεία που παρουσιάζουν τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση (Δ_{3p}), όπως σχηματικά παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5-6, όπου και ορίστηκαν οι μετακινήσεις των αξόνων του δρόμου ισορροπίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά σημεία ταυτίζονται για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι οι δρόμοι ισορροπίας για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} εμφανίζουν τιμές μετακίνησης $\delta\Delta_3 < 0$ καθώς αρχικά η παραμόρφωση των αγωγών είναι ομαλή σύμφωνα με το Σχήμα 5-5. Όσο, όμως, αυξάνεται η μετακίνηση του ρήγματος η συγκριτικά μικρότερη δυσκαμψία της εδαφικής επίχωσης σε σχέση με το μητρικό έδαφος οδηγεί σε μη αμελητέα παραμόρφωση του αγωγού προς τα άνω, δημιουργώντας τη χαρακτηριστική παραμόρφωση του Σχήματος 5-6. Στη συμπεριφορά των αγωγών εκδηλώνεται έντονη μη-γραμμικότητα, όπως παρουσιάζεται στους δρόμους ισορροπίας του Σχήματος 5-15.



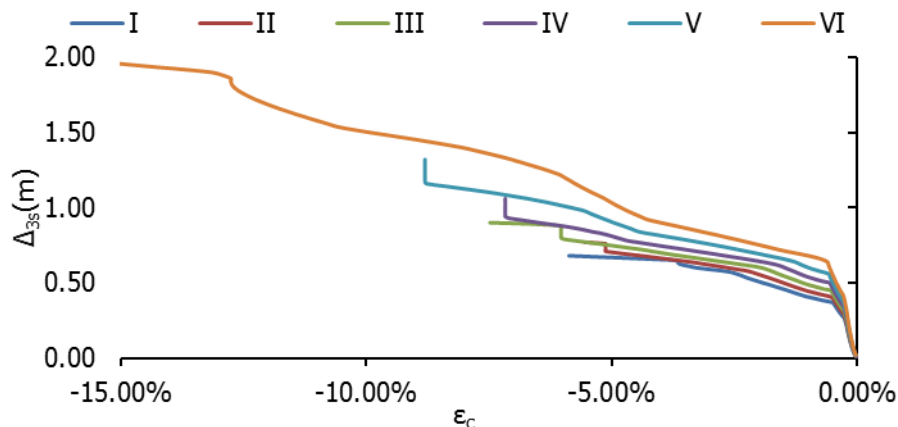
Σχήμα 5-15. Δρόμοι ισορροπίας αγωγών για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος

Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.4, ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού του αγωγού εξετάζεται στην παρούσα εργασία συναρτήσει των άλλων ενδεχόμενων μορφών αστοχίας του αγωγού, ήτοι της αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων και του τοπικού λυγισμού του τοιχώματος λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων. Η προσομοίωση του αγωγού, όμως, με πεπερασμένα στοιχεία δοκού δεν επιτρέπει την άμεση παρατήρηση φαινομένων τοπικού λυγισμού ούτε θραύσης των συγκολλήσεων. Έτσι, η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό και θραύση συγκολλήσεων πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μέγιστες αναπτυσσόμενες ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής με τα κανονιστικώς προτεινόμενα όρια διαμήκων παραμορφώσεων έναντι αυτών των μορφών αστοχίας. Υπενθυμίζονται τα όρια που προκύπτουν από

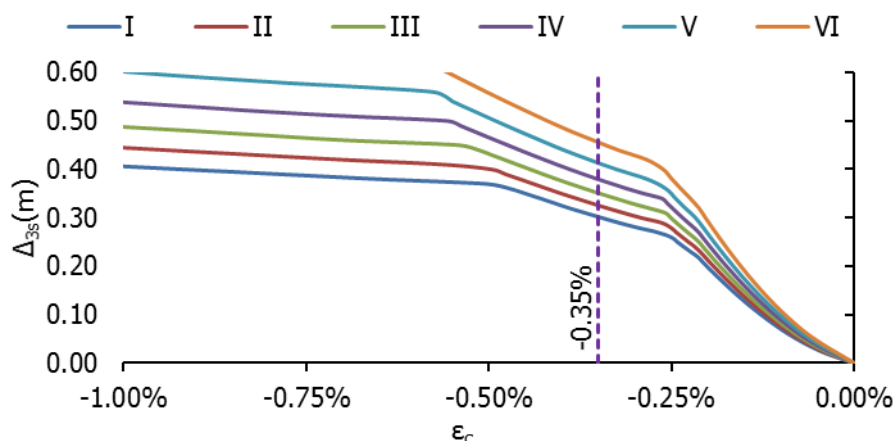
τις προτεινόμενες σχέσεις του ASCE-ALA, δηλαδή το όριο των διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων $\epsilon_{c,max}=-0.35\%$ και το όριο των διαμήκων εφελκυστικών παραμορφώσεων με $\epsilon_{t,max}=2\%$.

Επομένως, για την εκτίμηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό ή εφελκυστική θραύση των συγκολλήσεων δημιουργούνται οι δρόμοι ισορροπίας της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης και της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά μήκος του φορέα σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση Δ_{3s} . Στο Σχήμα 5-16 παρουσιάζεται η συνολική εξέλιξη των μέγιστων διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων, ενώ ακολούθως, στο Σχήμα 5-17, παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχήματος 5-16 συμπεριλαμβανομένου του ορίου των θλιπτικών παραμορφώσεων $\epsilon_{c,max}=-0.35\%$. Προκύπτει λοιπόν αστοχία από τοπικό λυγισμό νωρίτερα από το πέρας των δρόμων ισορροπίας του Σχήματος 5-15 και για πολύ μικρή στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης. Τέλος, υπολογίζεται και η διαφορική εδαφική μετακίνηση $\delta\Delta_3$ στη στάθμη εκδήλωσης τοπικού λυγισμού σε κάθε προσομοίωμα.

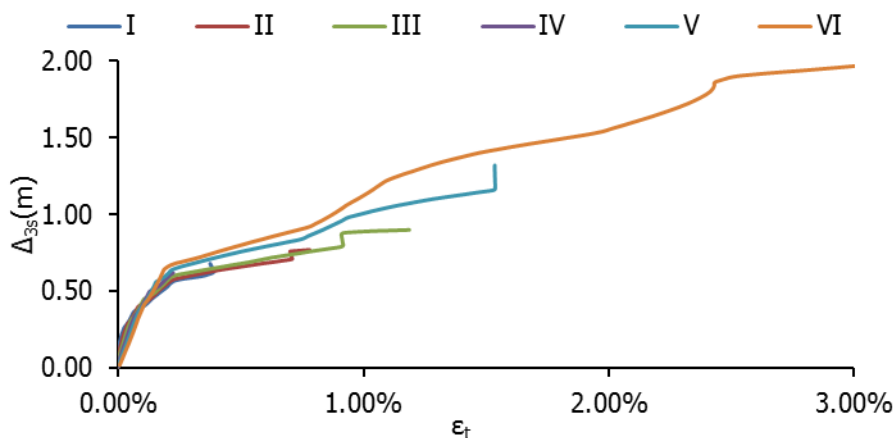
Όσον αφορά το ενδεχόμενο αστοχίας λόγω θραύσης των συγκολλήσεων, στο Σχήμα 5-18 παρουσιάζεται η συνολική εξέλιξη των μέγιστων διαμήκων εφελκυστικών παραμορφώσεων, ενώ ακολούθως, στο Σχήμα 5-19, παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχήματος 5-18 συμπεριλαμβανομένου του ορίου των εφελκυστικών παραμορφώσεων $\epsilon_{t,max}=2\%$. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις δε φθάνουν το κανονιστικώς ορισθέν όριο, με εξαίρεση την περίπτωση ρήγματος των 75° , που συνεπάγεται αποφυγή αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων. Τούτο συνάδει και με τη «φόρτιση» του αγωγού μιας και η ενεργοποίηση του ανάστροφου ρήγματος προκαλεί αξονική θλίψη και καμπτική ένταση στον αγωγό. Ακόμα και στην περίπτωση των 75° , η στάθμη της επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης για την οποία οι εφελκυστικές παραμορφώσεις υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο (1.56m) είναι παραπάνω από τριπλάσια από την αντίστοιχη στάθμη που υπερβαίνεται το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων (0.46m)



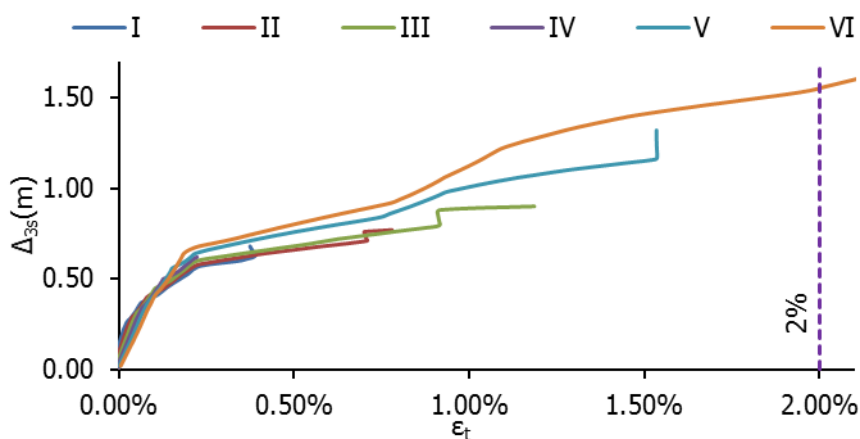
Σχήμα 5-16. Εξέλιξη μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων αγωγών για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος



Σχήμα 5-17. Λεπτομέρεια εξέλιξης θλιπτικών παραμορφώσεων αγωγών για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος με το κανονιστικό όριο θλιπτικών παραμορφώσεων



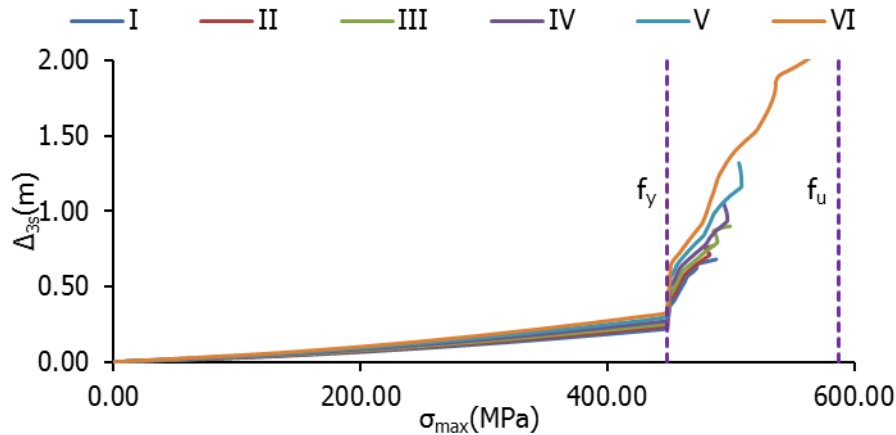
Σχήμα 5-18. Εξέλιξη μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων αγωγών για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος



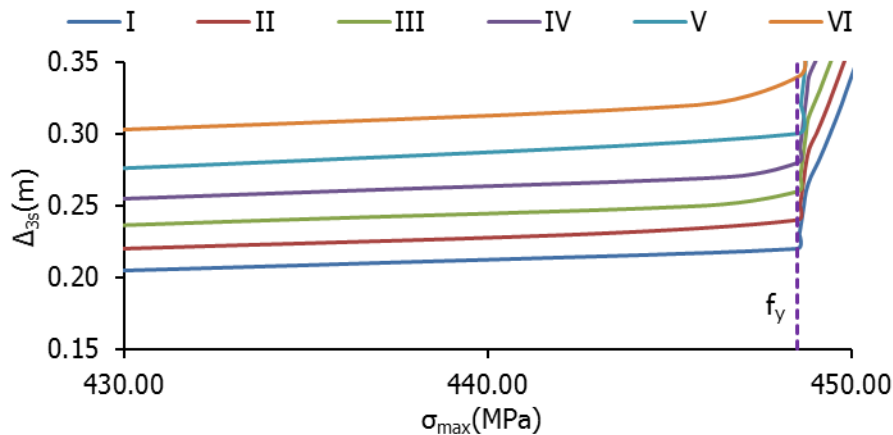
Σχήμα 5-19. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων αγωγών για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος με το κανονιστικό όριο εφελκυστικών παραμορφώσεων

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της στάθμης εδαφικής μετακίνησης στην οποία εκδηλώνεται διαρροή του υλικού του αγωγού, δημιουργούνται οι δρόμοι ισορροπίας της μέγιστης διαμήκου τάσης κατά μήκος του φορέα σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση Δ_{3s} . Στο Σχήμα 5-20

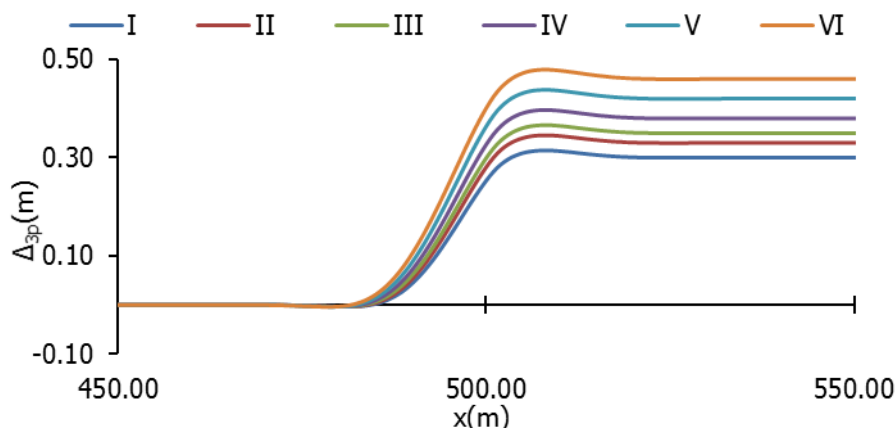
παρουσιάζεται η συνολική εξέλιξη των μέγιστων διαμήκων τάσεων κατά μήκος του φορέα για την επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση, μαζί με τα όρια διαρροής και θραύσης του υλικού, ενώ στο Σχήμα 5-21 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχήματος 5-20 στην περιοχή του ορίου διαρροής. Έτσι, υπολογίζονται οι στάθμες επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης σε κάθε περίπτωση για τις οποίες εκδηλώνεται η πρώτη διαρροή του κάθε φορέα, όπου και προκύπτουν τιμές ελάχιστα μικρότερες από τις αντίστοιχες στις οποίες εκδηλώνεται ο τοπικός λυγισμός. Αυτό αναδεικνύεται και στο παραμορφωμένο σχήμα των αγωγών στη στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης για την οποία εκδηλώνεται ο τοπικός λυγισμός, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-22.



Σχήμα 5-20. Εξέλιξη μέγιστων διαμήκων τάσεων για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος



Σχήμα 5-21. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων διαμήκων τάσεων για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος στη στάθμη του ορίου διαρροής



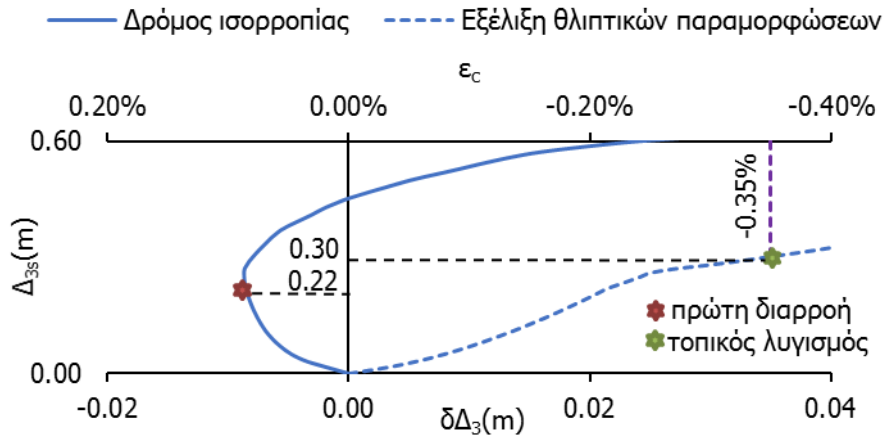
Σχήμα 5-22. Λεπτομέρεια παραμόρφωσης αγωγών στη στάθμη εκδήλωσης καθολικού λυγισμού για τις έξι περιπτώσεις γωνίας ρήγματος

Τέλος, στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις για τις οποίες εκδηλώνεται η πρώτη διαρροή, η αστοχία από τοπικό λυγισμό και στην περίπτωση VI η αστοχία από εφελκυστικές παραμορφώσεις. Επίσης, στην τέταρτη στήλη του πίνακα παρουσιάζεται η διαφορική εδαφική μετακίνηση $\delta\Delta_3$ στην οποία εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός, η οποία σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση είναι πρακτικώς μηδενική. Ειδικότερα, σε κάθε περίπτωση γωνίας βύθισης επέρχεται αστοχία λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων, η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από τη μετακίνηση που προκαλεί την πρώτη διαρροή, όπως εποπτικά παρουσιάζεται από το Σχήμα 5-23 έως το Σχήμα 5-28 όπου συνδυάζονται για κάθε περίπτωση οι δρόμοι ισορροπίας του φορέα σε όρους κατακορύφων σχετικών μετακινήσεων και σε όρους μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων.

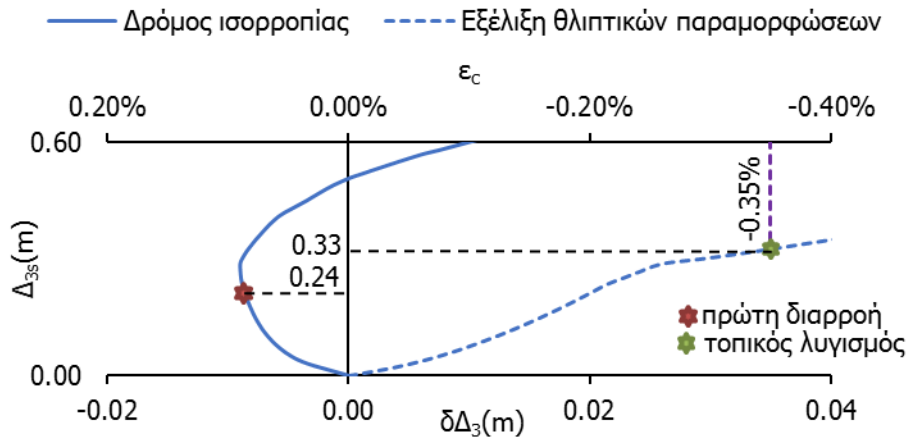
Συνεπώς, οι αριθμητικές αναλύσεις των υπό εξέταση βαθιά θαμμένων αγωγών αναδεικνύουν ως κρίσιμη μορφή αστοχίας στην περίπτωση που ο αγωγός διέρχεται από ανάστροφα σεισμικά ρήγματα διαφόρων γωνιών βύθισης τον ανελαστικό τοπικό λυγισμό, με τη διαρροή του χάλυβα να εκδηλώνεται αρχικά και τον τοπικό λυγισμό να ακολουθεί αμέσως μετά, για μικρή αύξηση της εδαφικής μετακίνησης. Η θραύση των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων δεν αναμένεται ως μηχανισμός αστοχίας όταν ο αγωγός υπόκειται σε εδαφική μετακίνηση λόγω ανάστροφου ρήγματος. Επίσης, ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού χαρακτηρίζεται πρακτικά ως ανύπαρκτος, λαμβάνοντας υπ' όψιν την πρακτικώς μηδενική διαφορική μετακίνηση του αγωγού $\delta\Delta_3$ στη στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} για την οποία επέρχεται ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός της διατομής.

Πίνακας 5-4. Επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις τη στιγμή εκδήλωσης των μηχανισμών αστοχίας

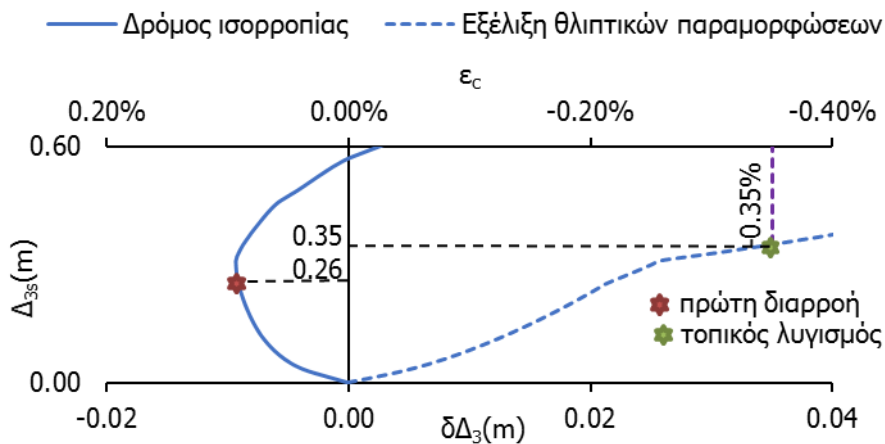
Περίπτωση	Γωνία ρήγματος	Δ_{3s} (m) Πρώτη Διαρροή	Δ_{3s} (m) Τοπικός λυγισμός	$\delta\Delta_3$ (m) Στάθμη τοπικού λυγισμού	Δ_{3s} (m) Εφελκυστική θραύση συγκολλήσεων
I	50°	0.22	0.30	-0.008	-
II	55°	0.24	0.33	-0.008	-
III	60°	0.26	0.35	-0.009	-
IV	65°	0.28	0.38	-0.009	-
V	70°	0.30	0.42	-0.010	-
VI	75°	0.34	0.46	-0.010	1.56



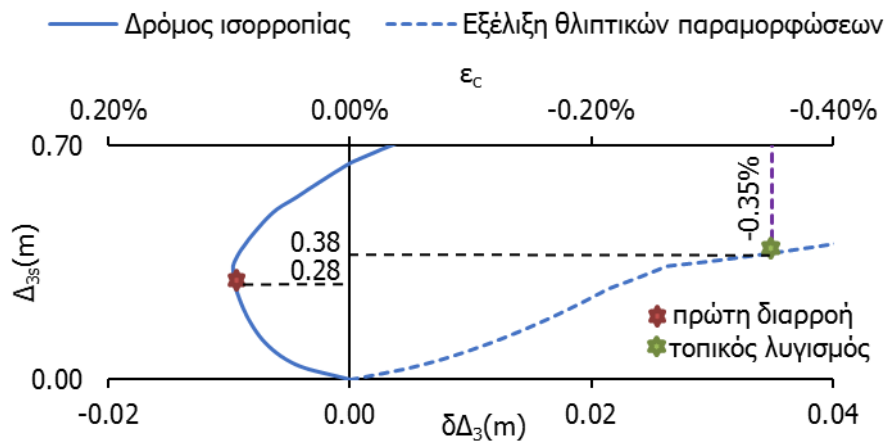
Σχήμα 5-23. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας αγωγού περίπτωσης I



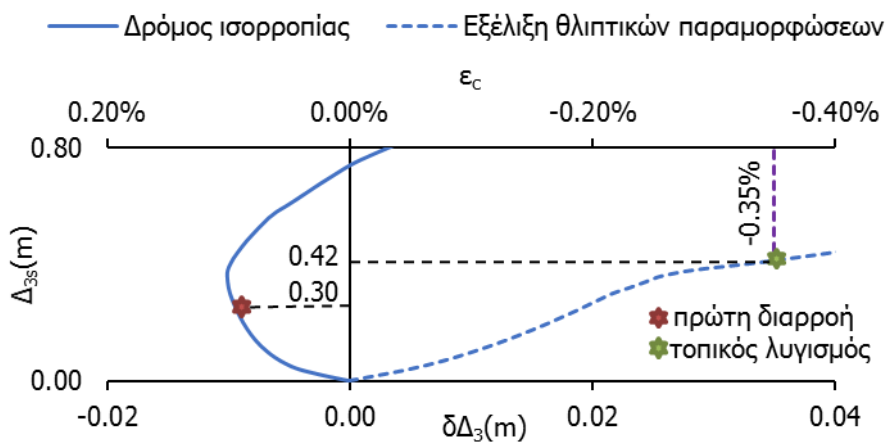
Σχήμα 5-24. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας αγωγού περίπτωσης II



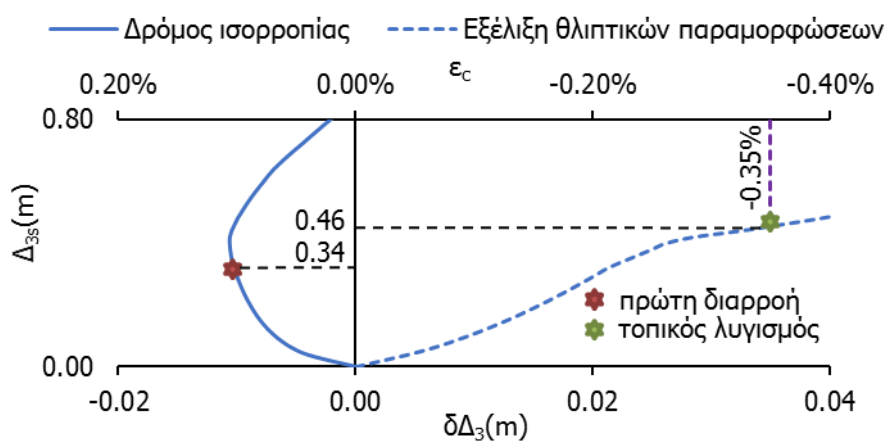
Σχήμα 5-25. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας αγωγού περίπτωσης III



Σχήμα 5-26. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας αγωγού περίπτωσης IV



Σχήμα 5-27. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας αγωγού περίπτωσης V



Σχήμα 5-28. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας αγωγού περίπτωσης VI

5.5.2 Επιρροή λόγου διαμέτρου προς πάχος

Σύμφωνα με τους Yun και Kyriakides [1-4], ο καθολικός λυγισμός υπόγειων αγωγών γίνεται κρισιμότερη μορφή αστοχίας όσο μειώνεται ο λόγος της διαμέτρου D του αγωγού προς το πάχος t του μεταλλικού κελύφους (D/t). Έτσι, στην παράγραφο αυτή μελετώνται έξι διαφορετικές περιπτώσεις λόγων D/t για την αποτίμηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού σε συνάρτηση με τις υπόλοιπες μορφές αστοχίας. Για τις έξι υπό εξέταση περιπτώσεις επιλέγονται τυπικές διαμέτροι υπόγειων μεταλλικών αγωγών μεταφοράς καυσίμων, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5. Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, επιλέγεται βάθος ταφής των αγωγών ως το μέσο του αγωγού H με τέτοιο τρόπο, ώστε ο λόγος H/D σε κάθε περίπτωση να παραμένει σταθερός.

Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο με μηδενικό πάχος και εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ως ευθεία γραμμή. Ο αγωγός θεωρείται ότι συναντάει κάθετα το ρήγμα, ενώ η γωνία βύθισης του ανάστροφου ρήγματος είναι $\psi=70^\circ$. Έτσι οι μετακινήσεις Δ_1 , Δ_2 και Δ_3 στο επίπεδο του ρήγματος ταυτίζονται με τις αντίστοιχες μετακινήσεις Δ_x , Δ_y και Δ_z στο επίπεδο του αγωγού. Χάριν απλοποίησης στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι η οριζόντια μετακίνηση του ρήγματος πραγματοποιείται αποκλειστικά εντός του κατακόρυφου επιπέδου που διέρχεται από τον αγωγό, χωρίς εγκάρσια προς τον αγωγό συνιστώσα ($\Delta_1=\Delta_y=0$).

Συνεπώς, υιοθετείται το προσομοίωμα της δοκού μεγάλου μήκους επί ελαστοπλαστικού εδάφους με συνεχή πλευρική κατακόρυφη στήριξη από ομοιόμορφα κατανεμημένα εγκάρσια ελατήρια που προσομοιώνουν την προς τα άνω (upward movement) και την προς τα κάτω κίνηση (downward movement) του αγωγού εντός του ορύγματος. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψιν και η αλληλεπίδραση αγωγού – εδάφους μέσω της τριβής που προσομοιώνεται με διαμήκη αξονικά ελατήρια.

Πίνακας 5-5. Υπό εξέταση περιπτώσεις παραμετρικών αναλύσεων

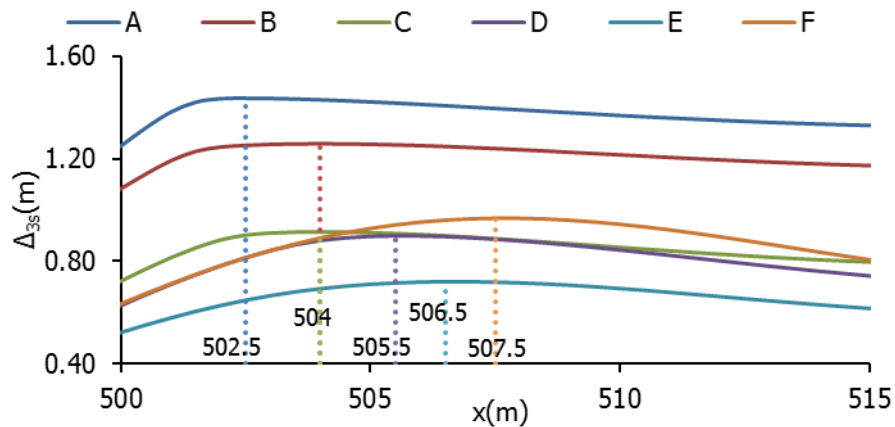
Περίπτωση	Διάμετρος D (m)	Πάχος τοιχώματος t (m)	D/t	Βάθος ταφής H (m)	H/D
A	0.9144	0.0119	76.84	1.764	1.93
B	0.7110	0.0127	55.98	1.370	1.93
C	0.6100	0.0127	48.03	1.180	1.93
D	0.5080	0.0127	40.00	0.980	1.93
E	0.4064	0.0127	32.00	0.784	1.93
F	0.3239	0.0127	25.50	0.625	1.93

Στην υπό εξέταση περίπτωση θεωρείται το υλικό επίχωσης είναι άμμος μέσης πυκνότητας με γωνία τριβής $\phi=36^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Ο αγωγός περιβάλλεται εξωτερικά με πίσσα λιθάνθρακα (coal tar), με συντελεστή $f=0.90$ ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους δίνει τη γωνία τριβής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Σύμφωνα με την παράγραφο 4.3 του κεφαλαίου 4, η προσομοίωση των εδαφικών ελατηρίων σύμφωνα με τις οδηγίες του ASCE-ALA εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αγωγού καθώς και της γεωμετρίας του προβλήματος, δηλαδή από τη διάμετρο D και από το βάθος ταφής H . Επομένως, τα χαρακτηριστικά των ελαστοπλαστικών μετακινησιακών ελατηρίων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του εδάφους διαφέρουν σε κάθε περίπτωση. Η διάμετρος D και το πάχος του τοιχώματος t επηρεάζει επίσης και τη μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση $\epsilon_{c,max}$ που ορίζουν οι οδηγίες του ASCE-ALA και η οποία δίνεται από την εξίσωση (5-2). Με χρήση των εξισώσεων (4-1) έως (4-15) της παραγράφου 4.3 και της εξίσωσης (5-2) παρουσιάζεται ο Πίνακας 5-6 που περιλαμβάνει τις δυνάμεις και τις μετακινήσεις διαρροής των τριών ελαστοπλαστικών ελατηρίων που χρησιμοποιούνται για τη δισδιάστατη προσομοίωση του αγωγού καθώς και το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων $\epsilon_{c,max}$ σε κάθε περίπτωση.

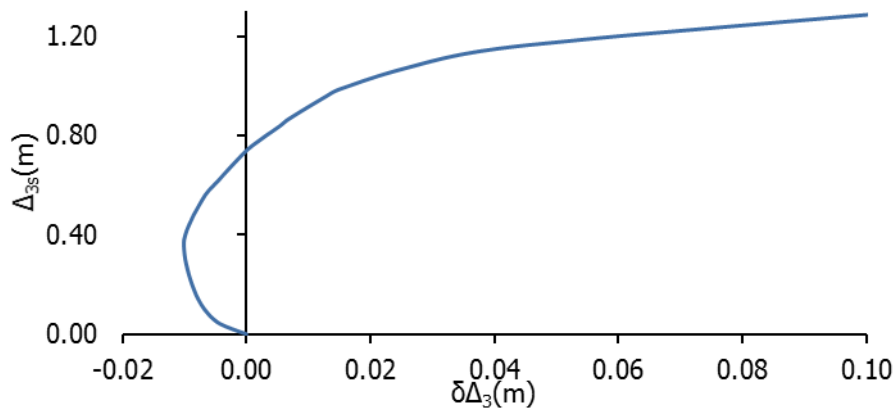
Πίνακας 5-6. Δυνάμεις και μετακινήσεις διαρροής εδαφικών ελατηρίων και όρια θλιπτικών παραμορφώσεων

Περίπτωση	$\epsilon_{c,max}$	Ελατήρια	Δύναμη διαρροής (kN/m)	Μετατόπιση διαρροής (mm)
A	-0.35%	Αξονικά	40.72	5.0
		Κατακόρυφα προς τα άνω	45.47	18.0
		Κατακόρυφα προς τα κάτω	1494.61	114.3
B	-0.55%	Αξονικά	24.73	5.0
		Κατακόρυφα προς τα άνω	27.74	18.0
		Κατακόρυφα προς τα κάτω	906.62	88.9
C	-0.66%	Αξονικά	18.19	5.0
		Κατακόρυφα προς τα άνω	20.40	18.0
		Κατακόρυφα προς τα κάτω	667.12	76.3
D	-0.81%	Αξονικά	12.62	5.0
		Κατακόρυφα προς τα άνω	14.14	18.0
		Κατακόρυφα προς τα κάτω	462.60	63.5
E	-1.02%	Αξονικά	8.08	5.0
		Κατακόρυφα προς τα άνω	9.06	18.0
		Κατακόρυφα προς τα κάτω	296.12	50.8
F	-1.25%	Αξονικά	5.13	5.0
		Κατακόρυφα προς τα άνω	5.75	18.0
		Κατακόρυφα προς τα κάτω	188.09	40.5

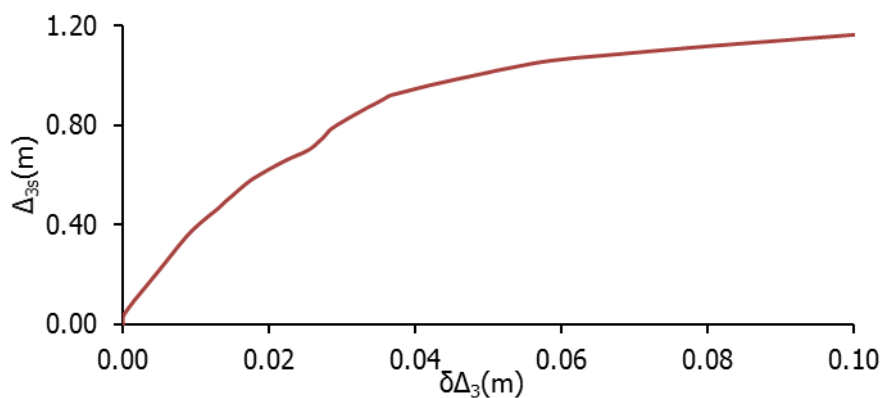
Η προλυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά των αγωγών στις έξι υπό εξέταση περιπτώσεις αποτυπώνονται στους δρόμους ισορροπίας των Σχημάτων 5-30 έως 5-35. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση ενός χαρακτηριστικού σημείου κατά μήκος του αγωγού ($\delta\Delta_3$) και στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση (Δ_{3s}). Ως χαρακτηριστικά σημεία σε κάθε φορά λαμβάνονται τα σημεία που παρουσιάζουν τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση (Δ_{3p}), όπως σχηματικά παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5-6, όπου και ορίστηκαν οι μετακινήσεις των αξόνων του δρόμου ισορροπίας. Οι δρόμοι ισορροπίας της κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται σε διαφορετικά διαγράμματα, λόγω του ότι η θέση του σημείου με τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση διαφέρει σε κάθε αγωγό, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-29, που περιλαμβάνει τη λεπτομέρεια της παραμόρφωση του αγωγού της κάθε περίπτωσης στην περιοχή του ρήγματος στο τέλος της ανάλυσης, με τη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη εγκάρσια μετακίνηση.



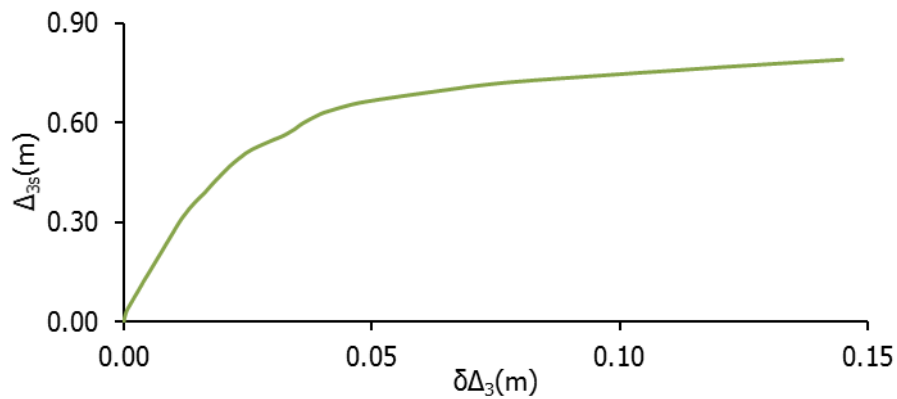
Σχήμα 5-29. Λεπτομέρεια παραμορφωμένων φορέων στο τέλος της ανάλυσης



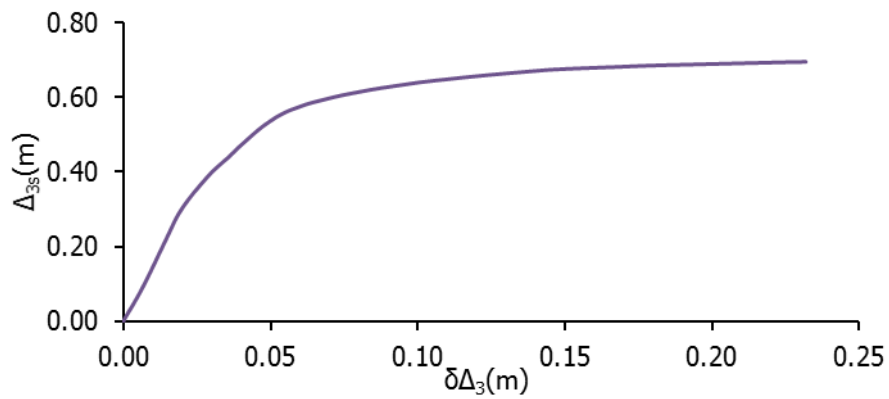
Σχήμα 5-30. Δρόμος ισορροπίας αγωγού περίπτωσης A



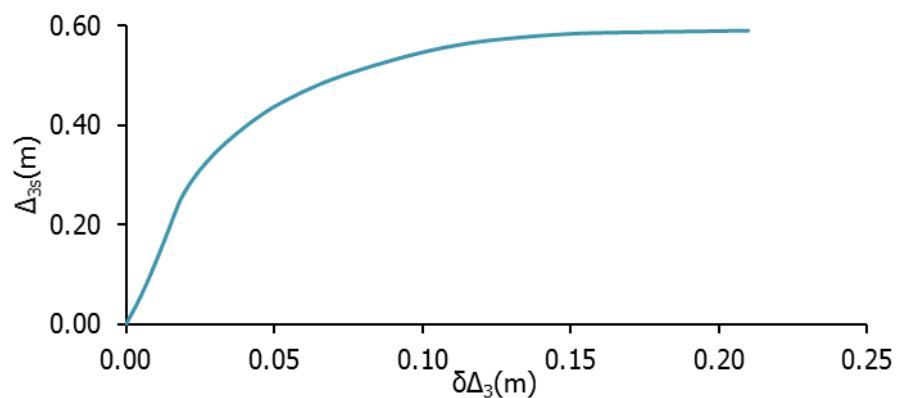
Σχήμα 5-31. Δρόμος ισορροπίας αγωγού περίπτωσης B



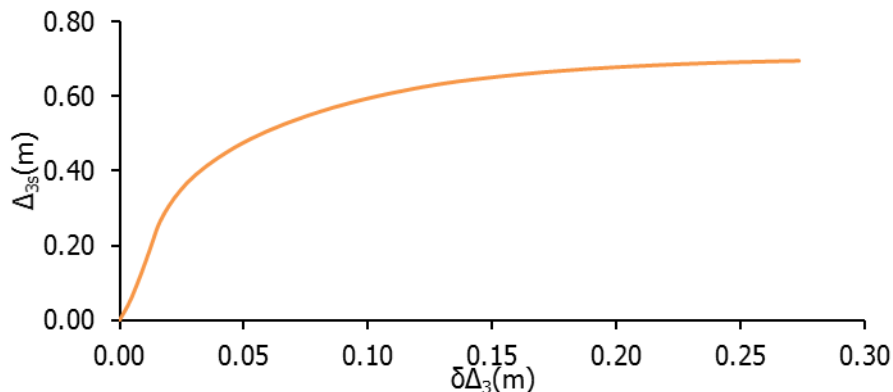
Σχήμα 5-32. Δρόμος ισορροπίας αγωγού περίπτωσης C



Σχήμα 5-33. Δρόμος ισορροπίας αγωγού περίπτωσης D



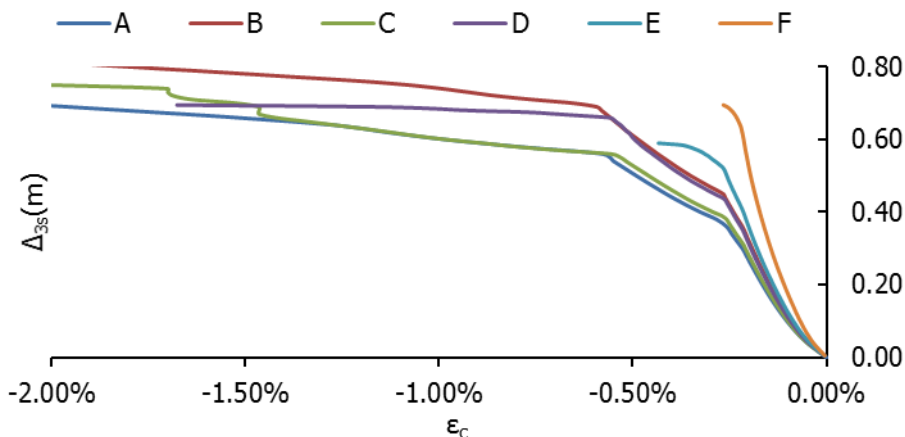
Σχήμα 5-34. Δρόμος ισορροπίας αγωγού περίπτωσης E



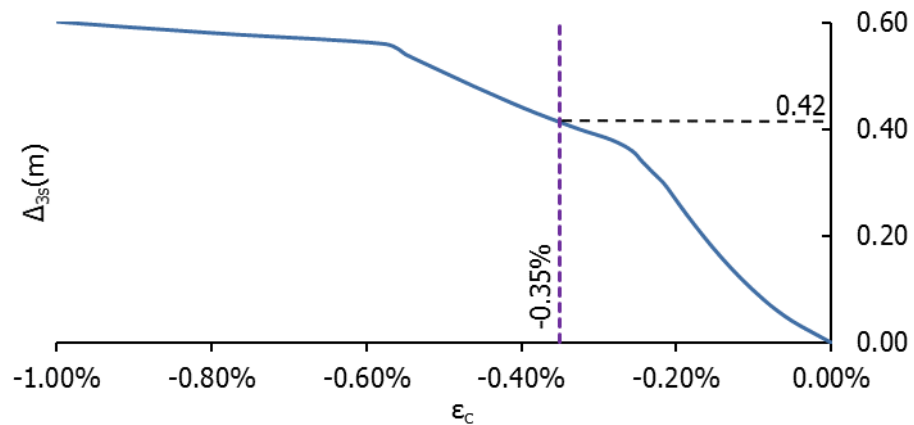
Σχήμα 5-35. Δρόμος ισορροπίας αγωγού περίπτωσης F

Ο καθολικός λυγισμός εξετάζεται και εδώ συναρτήσει των άλλων μορφών αστοχίας του αγωγού, δηλαδή της αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων και του τοπικού λυγισμού του τοιχώματος λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων. Η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό και θραύση συγκολλήσεων πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μέγιστες αναπτυσσόμενες ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής με τα κανονιστικά προτεινόμενα όρια διαμήκων παραμορφώσεων έναντι αυτών των μορφών αστοχίας. Υπενθυμίζεται το όριο των διαμήκων εφελκυστικών παραμορφώσεων $\epsilon_{t,max}=2\%$, ενώ, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5-6, το όριο των διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων $\epsilon_{c,max}$ διαφέρει σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση.

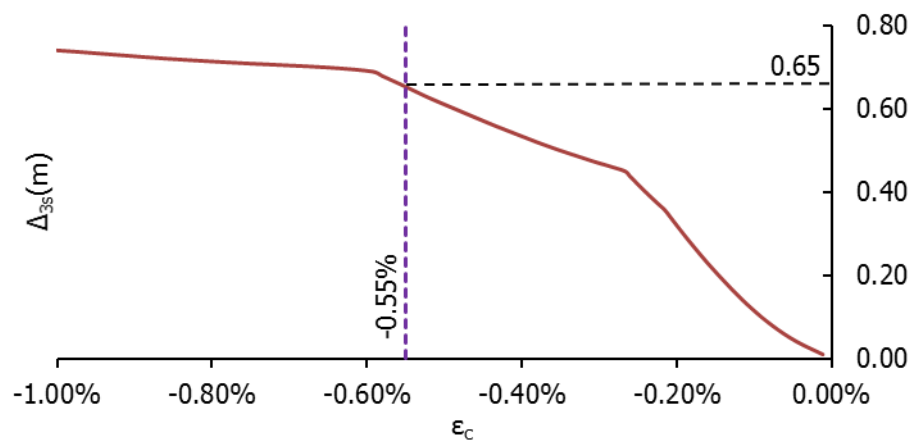
Επομένως, για τον προσδιορισμό της πιθανότητας αστοχίας από τοπικό λυγισμό ή εφελκυστική θραύση των συγκολλήσεων δημιουργούνται οι δρόμοι ισορροπίας της μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης και της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά μήκος του φορέα σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση Δ_{3s} . Στο Σχήμα 5-36 παρουσιάζεται η συνολική εξέλιξη των μέγιστων διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων, ενώ ακολούθως, στα Σχήματα 5-37 έως 5-42, παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχήματος 5-36 για κάθε περίπτωση συμπεριλαμβανομένου του αντίστοιχου ορίου των θλιπτικών παραμορφώσεων $\epsilon_{c,max}$. Προκύπτει λοιπόν αστοχία από τοπικό λυγισμό για πολύ μικρή στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης για τις τέσσερις πρώτες περιπτώσεις. Οι δύο τελευταίες περιπτώσεις, με τους μικρότερους λόγους D/t δεν κινδυνεύουν από τοπικό λυγισμό. Τέλος, υπολογίζεται και η διαφορική εδαφική μετακίνηση $\delta\Delta_3$ στη στάθμη εκδήλωσης τοπικού λυγισμού σε κάθε ένα από τα τέσσερα πρώτα προσομοιώματα.



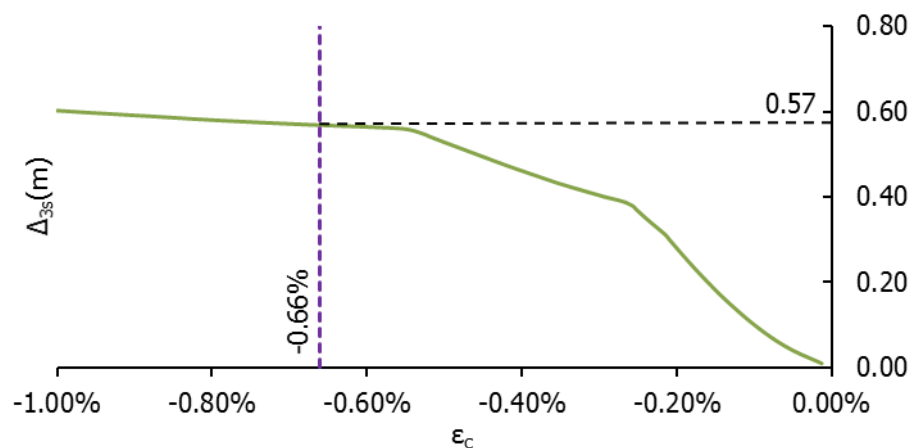
Σχήμα 5-36. Εξέλιξη μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων αγωγών για τις έξι περιπτώσεις



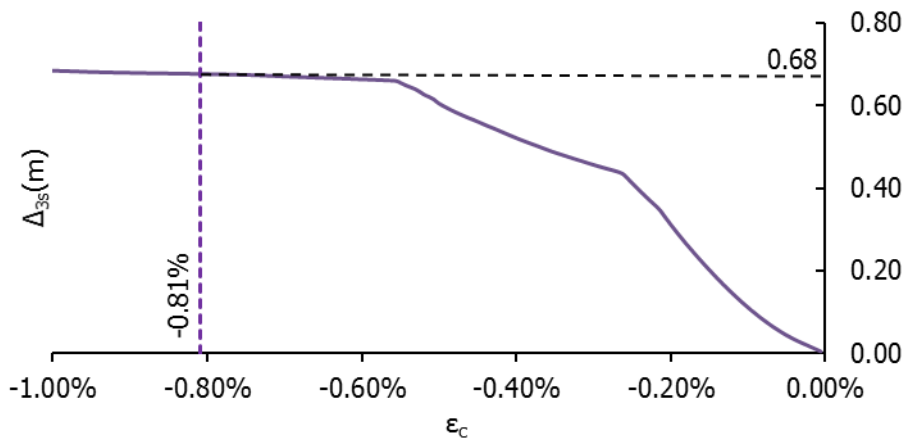
Σχήμα 5-37. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων περίπτωσης Α με το αντίστοιχο κανονιστικό όριο



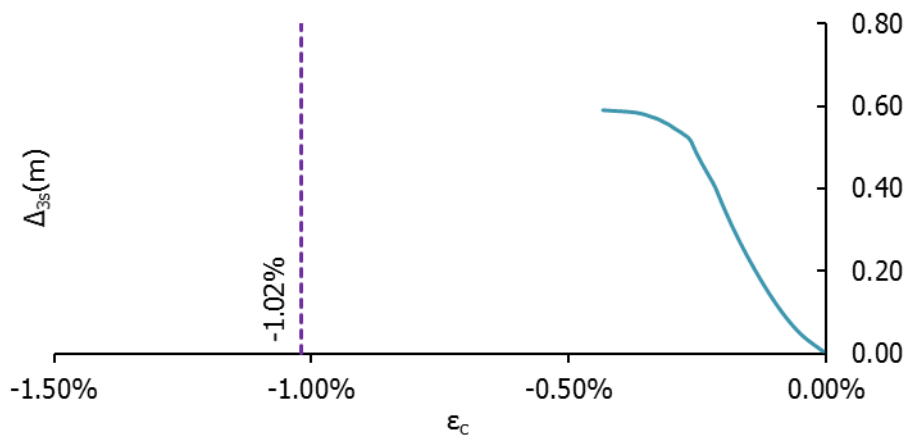
Σχήμα 5-38. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων περίπτωσης Β με το αντίστοιχο κανονιστικό όριο



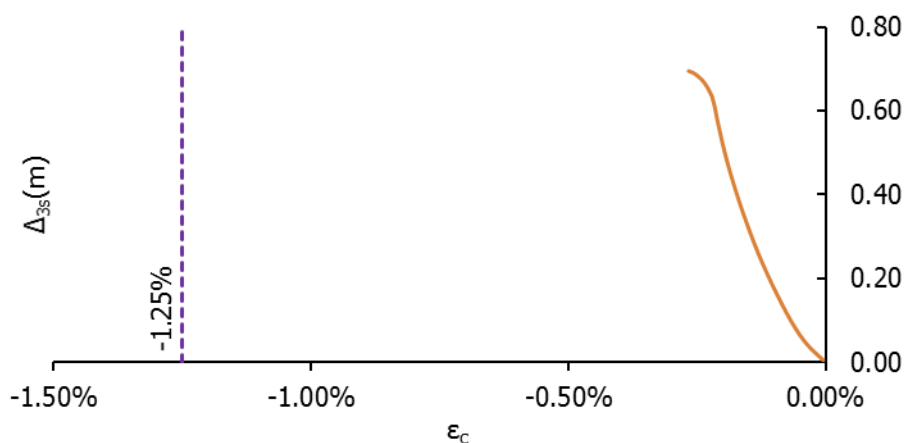
Σχήμα 5-39. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων περίπτωσης C με το αντίστοιχο κανονιστικό όριο



Σχήμα 5-40. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων περίπτωσης D με το αντίστοιχο κανονιστικό όριο



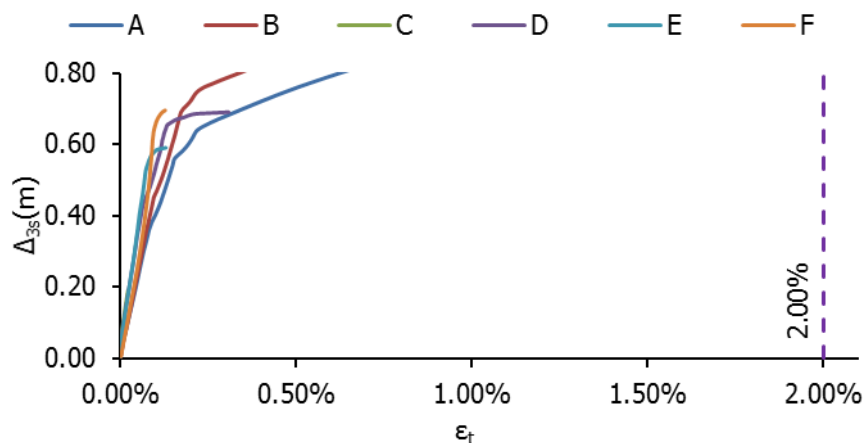
Σχήμα 5-41. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων περίπτωσης E με το αντίστοιχο κανονιστικό όριο



Σχήμα 5-42. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων περίπτωσης F με το αντίστοιχο κανονιστικό όριο

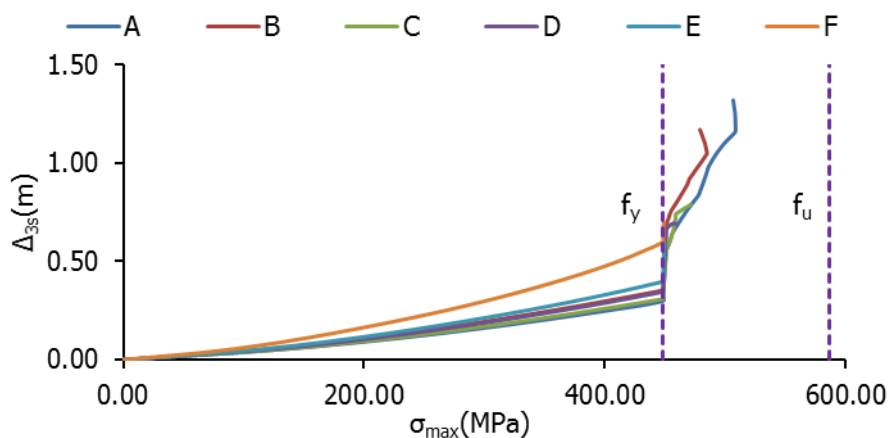
Όσον αφορά την πιθανότητα αστοχίας λόγω θραύσης των συγκολλήσεων, στο Σχήμα 5-43 παρουσιάζεται η συνολική εξέλιξη των μέγιστων διαμήκων εφελκυστικών παραμορφώσεων

συμπεριλαμβανομένου του ορίου των εφελκυστικών παραμορφώσεων $\epsilon_{t,max}=2\%$. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις δε φθάνουν το κανονιστικώς ορισθέν όριο σε καμία από τις υπό εξέταση περιπτώσεις που συνεπάγεται αποφυγή αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων. Τούτο συνάδει και με τη «φόρτιση» του αγωγού μιας και η ενεργοποίηση του αναστροφου ρήγματος προκαλεί αξονική θλίψη και καμπτική ένταση στον αγωγό. Επομένως, ενδεχόμενη αστοχία από εφελκυστική παραμόρφωση δεν είναι πιθανή για τις παραμετρικές αναλύσεις του λόγου διαμέτρου προς πάχος και στο εξής δεν θα λαμβάνεται υπόψη στην αποτίμηση της συμπεριφοράς των φορέων.

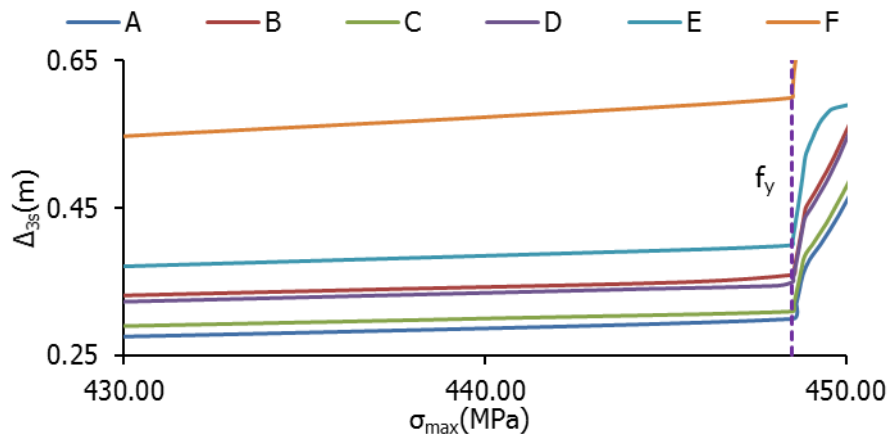


Σχήμα 5-43. Εξέλιξη μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων αγωγών για τις έξι περιπτώσεις

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της στάθμης εδαφικής μετακίνησης στην οποία εκδηλώνεται διαρροή του υλικού του αγωγού, δημιουργούνται οι δρόμοι ισορροπίας της μέγιστης διαμήκου τάσης κατά μήκος του φορέα σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση Δ_{35} . Στο Σχήμα 5-44 παρουσιάζεται η συνολική εξέλιξη των μέγιστων διαμήκων τάσεων κατά μήκος του φορέα για την επιβαλλόμενη εδαφική μετακίνηση, μαζί με τα όρια διαρροής και θραύσης του υλικού, ενώ στο Σχήμα 5-45 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχήματος 5-44 στην περιοχή του ορίου διαρροής. Έτσι, υπολογίζονται οι στάθμες επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης σε κάθε περίπτωση για τις οποίες εκδηλώνεται η πρώτη διαρροή του κάθε φορέα. Σημειώνεται ότι σε καμία από τις υπό εξέταση περιπτώσεις δεν υπερβαίνεται το όριο θραύσης του υλικού.

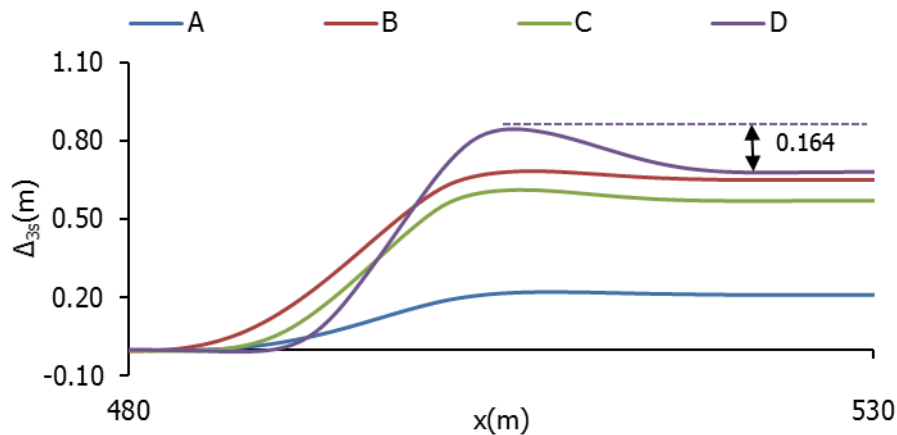


Σχήμα 5-44. Εξέλιξη μέγιστων διαμήκων τάσεων για τις έξι περιπτώσεις



Σχήμα 5-45. Λεπτομέρεια εξέλιξης μέγιστων διαμήκων τάσεων για τις έξι περιπτώσεις στη στάθμη του ορίου διαρροής

Τέλος, στον Πίνακα 5-7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις για τις οποίες εκδηλώνεται η πρώτη διαρροή και η αστοχία από τοπικό λυγισμό. Για τις τέσσερις πρώτες περιπτώσεις αγωγών οι οποίες και αστοχούν από τοπικό λυγισμό παρουσιάζεται και η διαφορική εδαφική μετακίνηση $\delta\Delta_3$ τη στιγμή που εκδηλώνεται ο τοπικός λυγισμός. Στις τρεις πρώτες περιπτώσεις η διαφορική αυτή μετακίνηση είναι πρακτικώς μηδενική και επομένως ο μηχανισμός αστοχίας είναι ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός. Για την περίπτωση D, η μετακίνηση $\delta\Delta_3$ στην οποία εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός λαμβάνει την τιμή $\delta\Delta_3=0.164\text{m}$, η οποία δε θεωρείται αμελητέα και επομένως μπορούμε να μιλήσουμε για εκδήλωση καθολικού λυγισμού ταυτόχρονα με την εκδήλωση τοπικού λυγισμού. Εποπτικά οι παρατηρήσεις αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-46 που περιλαμβάνουν λεπτομέρεια παραμόρφωσης του αγωγού στη στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης για την οποία εκδηλώνεται ο τοπικός λυγισμός.

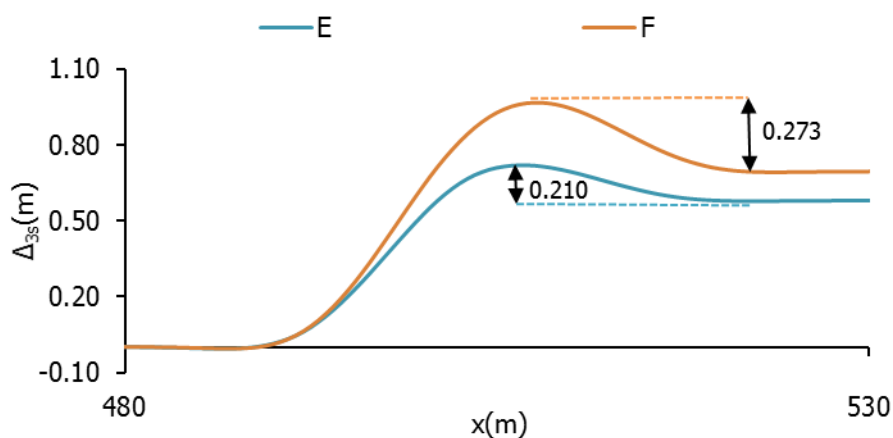


Σχήμα 5-46. Λεπτομέρεια παραμόρφωσης αγωγών στη στάθμη εκδήλωσης καθολικού λυγισμού για τις περιπτώσεις A, B, C και D

Πίνακας 5-7. Επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις τη στιγμή εκδήλωσης τοπικού λυγισμού

Περίπτωση	D/t	Διάμετρος D(m)	$\Delta_{3s}(m)$ – Πρώτη Διαρροή	$\Delta_{3s}(m)$ – Τοπικός λυγισμός	$\delta\Delta_3(m)$ – Στάθμη τοπικού λυγισμού
A	76.84	0.9144	0.30	0.42	-0.010
B	55.98	0.7110	0.36	0.65	0.022
C	48.03	0.6100	0.31	0.57	0.033
D	40.00	0.5080	0.35	0.68	0.164
E	32.00	0.4064	0.40	-	-
F	25.50	0.3239	0.60	-	-

Όσον αφορά τις τελευταίες δύο υπό εξέταση περιπτώσεις E και F, η απουσία εκδήλωσης τοπικού λυγισμού μέχρι το πέρας των αναλύσεων, σε συνδυασμό με την απουσία υπέρβασης του ορίου θραύσης του υλικού και της μέγιστης επιτρεπόμενης εφελκυστικής παραμόρφωσης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για τις περιπτώσεις αυτές κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο καθολικός λυγισμός. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-47 που περιλαμβάνει λεπτομέρεια παραμόρφωσης των δύο αυτών περιπτώσεων στο τέλος της ανάλυσης, εφόσον όπως αποδείχθηκε δεν εκδηλώνεται νωρίτερα κάποια άλλη μορφή αστοχίας, η διαφορική εδαφική μετακίνηση $\delta\Delta_3$ είναι αρκούντως μεγάλη ώστε να θεωρηθεί αυτή η μορφή αστοχίας.



Σχήμα 5-47. Λεπτομέρεια παραμόρφωσης αγωγών στο τέλος της ανάλυσης για τις περιπτώσεις E και F

Για τις τρεις τελευταίες περιπτώσεις, παρουσιάζεται ο Πίνακας 5-8 που περιλαμβάνει την επί τοις εκατό αναλογία της διαφορικής εδαφικής μετακίνησης ως προς το βάθος υπερκάλυψης του αγωγού H' , που

συνδέεται με το βάθος ταφής μέχρι τον άξονα του αγωγού H με τη σχέση $H'=H-D/2$, καθώς και ως προς τη διάμετρο του αγωγού D . Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη θεώρησης της αστοχίας από καθολικό λυγισμό στις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Πίνακας 5-8. Αποτίμηση πιθανότητας καθολικού λυγισμού

Περίπτωση	Διάμετρος $D(m)$	Βάθος ταφής $H(m)$	Υπερκάλυψη $H'(m)$	$\delta\Delta_{3,max}(m)$	$\delta\Delta_{3,max}/H'$ (%)	$\delta\Delta_{3,max}/D$ (%)
D	0.508	0.980	0.726	0.164	22.59%	32.28%
E	0.406	0.784	0.581	0.210	36.16%	51.67%
F	0.324	0.625	0.463	0.273	58.96%	84.29%

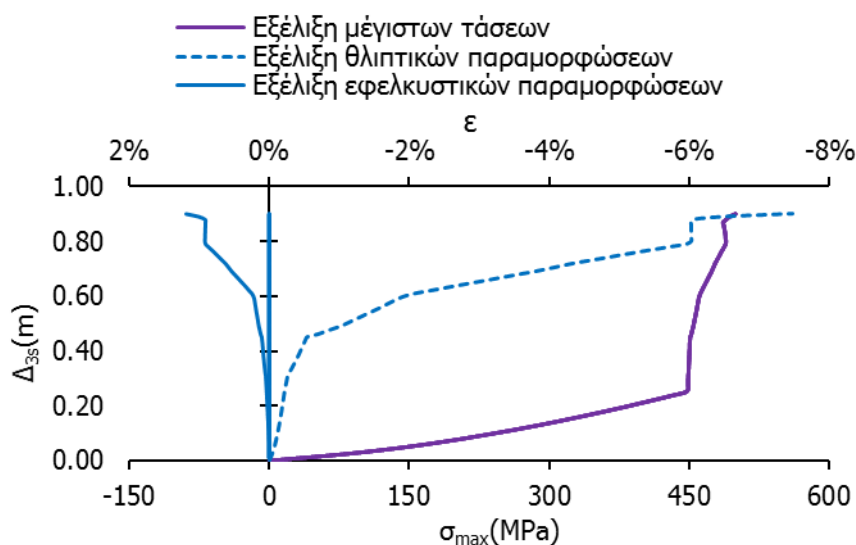
Τέλος, παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός Πίνακας 5-9 που περιλαμβάνει το μηχανισμό αστοχίας για την κάθε υπό εξέταση περίπτωση, καθώς και τη στάθμη επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης για την οποία λαμβάνει χώρα η αστοχία αυτή.

Πίνακας 5-9. Μηχανισμοί αστοχίας και αντίστοιχες στάθμες επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης

Περίπτωση	Μηχανισμός αστοχίας	$\Delta_{3s}(m)$
A	Ανελαστικός τοπικός λυγισμός	0.42
B	Ανελαστικός τοπικός λυγισμός	0.65
C	Ανελαστικός τοπικός λυγισμός	0.57
D	Ανελαστικός τοπικός και καθολικός λυγισμός	0.68
E	Ανελαστικός καθολικός λυγισμός	0.59
F	Ανελαστικός καθολικός λυγισμός	0.70

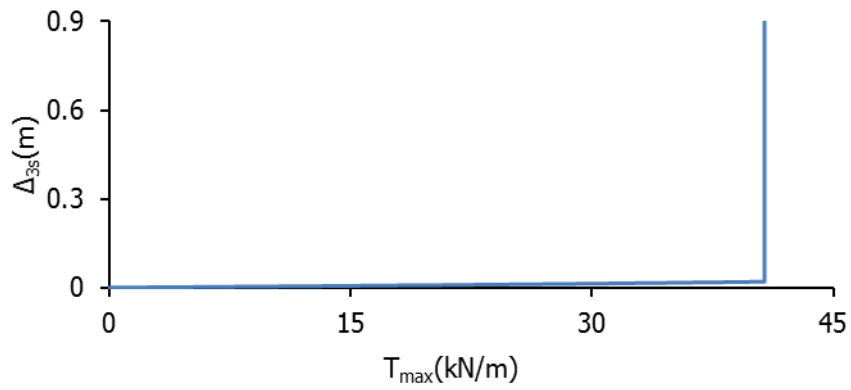
5.6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Το γεγονός ότι στους δρόμους ισορροπίας των τάσεων και παραμορφώσεων, σε πολλές από τις υπό εξέταση περιπτώσεις, δημιουργούνται ασυνέχειες σε στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη στην οποία εκδηλώνεται αστοχία από τοπικό λυγισμό και εκδηλώνεται η πρώτη διαρροή στο φορέα οδηγεί στην ανάγκη διερεύνησης του φαινομένου. Αυτή η ασυνέχεια στους δρόμους ισορροπίας έχει παρουσιαστεί σε πολλά από τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου, όπως για παράδειγμα στο Σχήμα 5-16. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται προς ανάλυση και διερεύνηση του φαινομένου η περίπτωση III της παραγράφου 5.5.1, που αντιστοιχεί σε γωνία ανάστροφου ρήγματος $\psi=60^\circ$. Το προς ανάλυση πρόβλημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-48, όπου παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας των εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων, των θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων και των μέγιστων διαμήκων τάσεων σε κοινό διάγραμμα. Παρατηρείται ότι για στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} από 0.80m έως 0.87m, στο εκάστοτε μέγεθος δεν αυξάνεται η τιμή του, αλλά διατηρείται «στάσιμη».

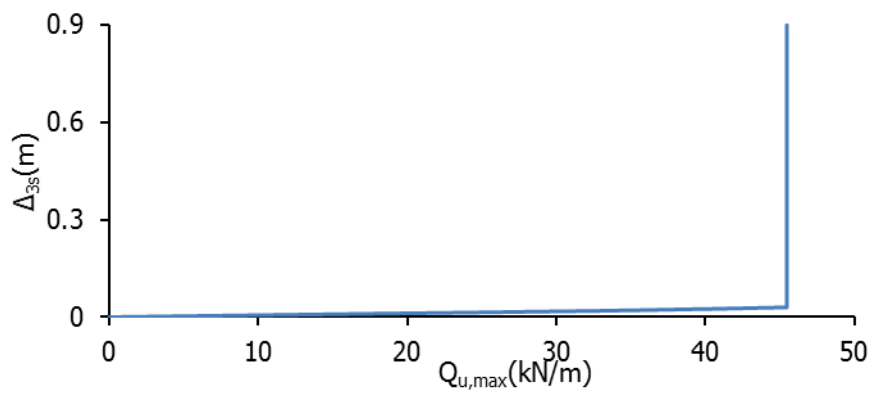


Σχήμα 5-48. Δρόμοι ισορροπίας τάσεων και παραμορφώσεων

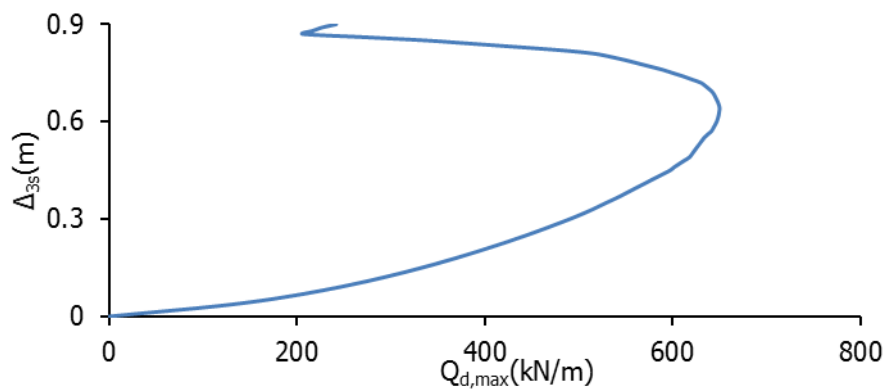
Για την επεξήγηση του φαινομένου, παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας της μέγιστης αναπτυσσόμενης δύναμης των εδαφικών ελατηρίων κατά μήκος του φορέα, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-49, στο Σχήμα 5-50 και στο Σχήμα 5-51. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει πλαστικοποίηση των αξονικών ελατηρίων και των κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων σε πολύ μικρή στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επιρροή των ελατηρίων στη μελέτη της απόκρισης του αγωγού για στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} από 0.80m έως 0.87m. Αντίθετα, ο δρόμος ισορροπίας των κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων, που προσομοιάζουν την αντίσταση που προβάλλει το μητρικό έδαφος, φανερώνει μείωση της μέγιστης αναπτυσσόμενης δύναμης των κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων για στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} από 0.64m έως 0.87m. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία στο συγκεκριμένο δρόμο ισορροπίας στο Σχήμα 5-52 και σε λεπτομέρεια στο Σχήμα 5-53, όπου σε κοινό διάγραμμα παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της δύναμης των εδαφικών ελατηρίων και των θλιπτικών παραμορφώσεων του μεταλλικού φορέα. Σε αυτά τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία, για στάθμες επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} ίσες με 0.64m, 0.80m, 0.87m και 0.90m παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-54 η αναπτυσσόμενη δύναμη των κατακόρυφων προς τα κάτω εδαφικών ελατηρίων κατά μήκος του φορέα, ενώ στο Σχήμα 5-55 παρουσιάζεται η αντίστοιχη παραμόρφωση του αγωγού. Επίσης, στο Σχήμα 5-56 παρουσιάζεται η αντίστοιχη αναπτυσσόμενη δύναμη των κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων. Παρατηρείται, λοιπόν, μείωση της δύναμης των κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων στη θέση του αγωγού $x=500m$, αλλά ταυτόχρονα αύξηση της στη θέση κατά μήκος του αγωγού $x=490m$. Αντίστοιχα, οι δυνάμεις των κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων ταυτίζονται για τις τρεις πρώτες υπό εξέταση θέσεις, ενώ μεταβάλλονται στο σημείο D. Αυτό εξηγεί εν μέρει τη συμπεριφορά των μέγιστων εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών κατά μήκος του φορέα, που παρουσιάζουν τη στάσιμη περιοχή που εξηγήθηκε προηγουμένως. Σημειώνεται πάντως ότι η εν λόγω ασυνέχεια, εφόσον εμφανίζεται για αρκετά μεγαλύτερη τιμή επιβαλλόμενης μετακίνησης από αυτή που προκαλεί την αστοχία από τοπικό λυγισμό, δεν αποτελεί πρακτικό σημείο ενδιαφέροντος στη μελέτη της συμπεριφοράς του αγωγού λόγω της ενεργοποίησης του ανάστροφου ρήγματος.



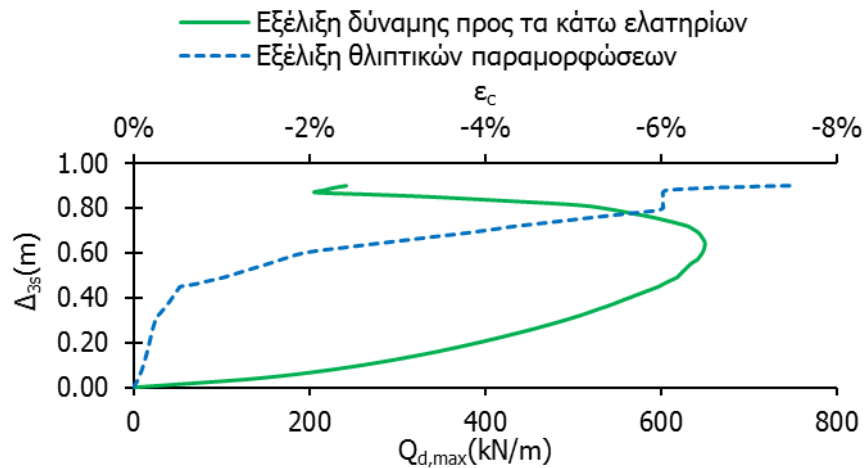
Σχήμα 5-49. Δρόμος ισορροπίας δύναμης αξονικών ελατηρίων



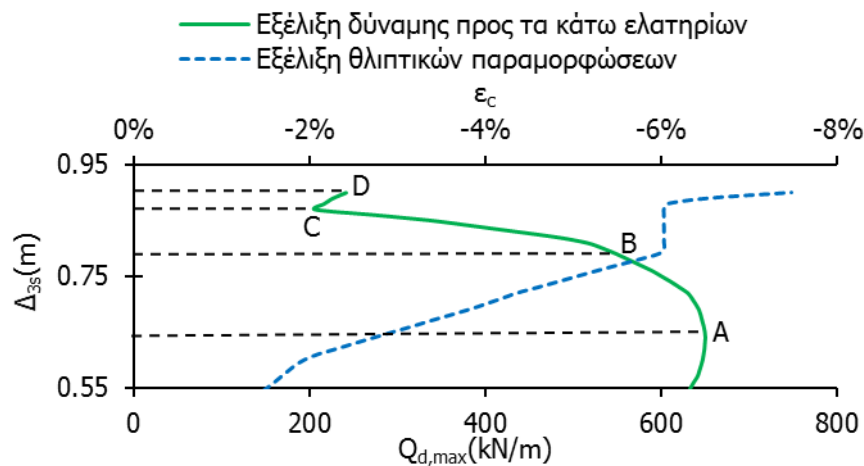
Σχήμα 5-50. Δρόμος ισορροπίας δύναμης κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων



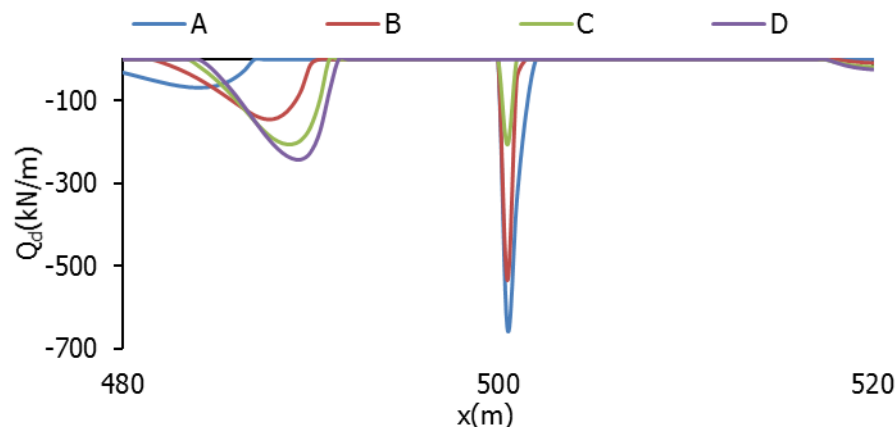
Σχήμα 5-51. Δρόμος ισορροπίας κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων



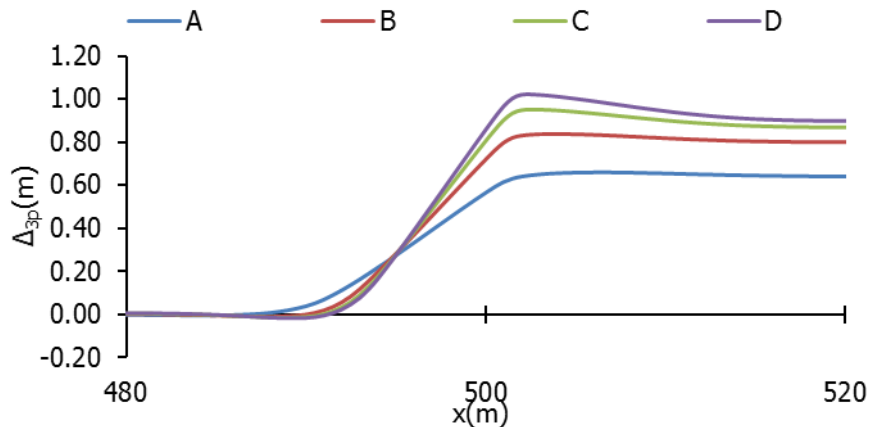
Σχήμα 5-52. Δρόμοι ισορροπίας παραμορφώσεων και δύναμης προς τα κάτω ελατηρίων



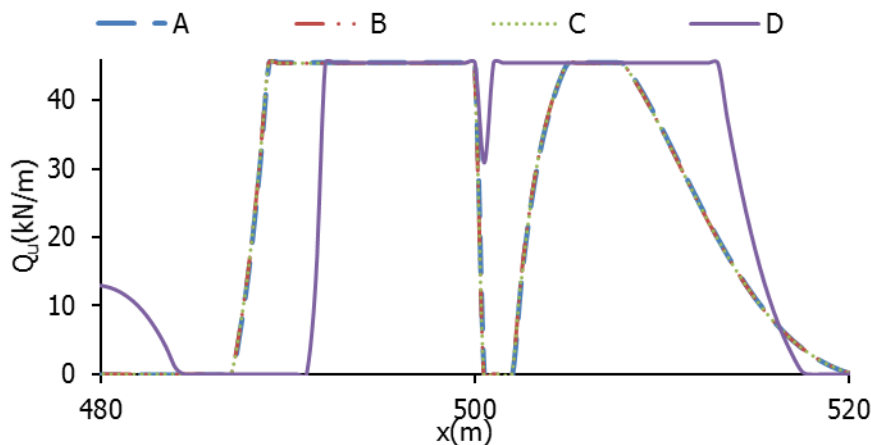
Σχήμα 5-53. Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας παραμορφώσεων και δύναμης προς τα κάτω ελατηρίων και ορισμός των υπό εξέταση θέσεων



Σχήμα 5-54. Λεπτομέρεια δύναμης προς τα κάτω ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στις υπό εξέταση θέσεις



Σχήμα 5-55. Λεπτομέρεια παραμόρφωσης αγωγού στις υπό εξέταση θέσεις



Σχήμα 5-56. Λεπτομέρεια δύναμης προς τα άνω ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού στις υπό εξέταση θέσεις

5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού που υποβάλλεται σε ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος από το οποίο διέρχεται. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αποτίμηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές αστοχίας από τις οποίες ο αγωγός μπορεί να κινδυνέψει. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται αναλυτικά αρχικά ένα παράδειγμα αγωγού μεγάλου λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος και σχετικά βαθιά θαμμένου σε χαλαρή άμμο, ο οποίος διέρχεται από ένα ανάστροφο ρήγμα με γωνία βύθισης $\psi=70^\circ$. Διατομές με τέτοια γεωμετρία είναι τυπικές για αγωγούς που μεταφέρουν καύσιμα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και ενδέχεται να διέρχονται από ρήγματα. Ο αγωγός είναι ελαστοπλαστικός και παράλληλα, για λόγους σύγκρισης, εξετάζεται και η περίπτωση του ελαστικού αγωγού.

Από τις μη-γραμμικές αναλύσεις που ακολουθούν προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αγωγός δεν κινδυνεύει να αστοχήσει από καθολικό λυγισμό, καθώς για μικρή στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος, ο αγωγός αστοχεί λόγω ανελαστικού τοπικού λυγισμού. Συγκεκριμένα, η πρώτη διαρροή του υλικού κατά μήκος του αγωγού που συμβαίνει για κατακόρυφη για κατακόρυφη επιβαλλόμενη μετακίνηση της τάξης των 30cm διαδέχεται άμεσα από υπέρβαση του κανονιστικού ορίου των θλιπτικών παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση του αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία δοκού δεν επιτρέπει άμεσα την παρατήρηση φαινομένων τοπικού λυγισμού, που θα

απαιτούσε χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, με συνέπεια η αστοχία από τοπικό λυγισμό να θεωρείται για τις ανάγκες αυτής της εργασίας η στιγμή που υπερβαίνεται το κανονιστικό όριο των μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων των οδηγίων της ASCE-ALA. Για τη στάθμη κατακόρυφης επιβαλλόμενης μετακίνησης στην οποία εκδηλώνεται ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός, υπολογίζεται η διαφορική μετακίνηση εδάφους – αγωγού $\delta\Delta_3$, η οποία προκύπτει πρακτικώς μηδενική και επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο καθολικός λυγισμός για το συγκεκριμένο παράδειγμα αγωγού, με τη δεδομένη γεωμετρία, δεν αποτελεί ενδεχόμενη μορφή αστοχίας.

Στη συνέχεια ακολουθούν παραμετρικές αναλύσεις για τη γωνία βύθισης ψ του ρήγματος, ώστε να ελεγχθεί το ενδεχόμενο ο καθολικός λυγισμός να αποτελέσει κρίσιμη μορφή αστοχίας, καθώς η μεταβολή της γωνίας βύθισης μεταβάλλει την αναλογία της αναπτυσσόμενης θλίψης και κάμψης στο αγωγό. Για τις έξι διαφορετικές γωνίες ρήγματος που επιλέγονται, τα χαρακτηριστικά του αγωγού και τα εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής λαμβάνονται κοινά με το πρώτο αριθμητικό παράδειγμα του κεφαλαίου που περιεγράφηκε προηγουμένως. Από τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων προκύπτει ότι ο μηχανισμός αστοχίας για τις έξι υπό εξέταση περιπτώσεις είναι ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός, καθώς ακόμα και στη μικρότερη τιμή της γωνίας του ρήγματος που εξετάστηκε, αυτής των 50° , η οποία επιβάλλει μεγαλύτερο ποσοστό οριζόντιας μετακίνησης Δ_{2s} για συγκεκριμένη τιμή επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης Δ_{3s} , η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος $\delta\Delta_3$ στη στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης που προκαλεί τον τοπικό λυγισμό προκύπτει πρακτικώς μηδενική.

Τέλος, γίνονται παραμετρικές αναλύσεις ως προς το λόγο της διαμέτρου του αγωγού προς το πάχος του τοιχώματος του (D/t), ώστε να αξιολογηθεί το ενδεχόμενο ο καθολικός λυγισμός να αποτελέσει την κρίσιμη μορφή αστοχίας με την σταδιακή μείωση του λόγου αυτού. Το συμπέρασμα αυτό έχει προκύψει και από παλιότερες αντίστοιχες εργασίες, όπως αυτή των Yun και Kyriakides [1-4]. Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου D/t επιλέγονται έξι τυπικές διατομές, οι οποίες έχουν σταθερό πάχος και μειούμενη διάμετρο, με αποτέλεσμα να προκύπτει και μειούμενος ο λόγος D/t . Η γωνία του ρήγματος και τα υπόλοιπα εδαφικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται ίδια με το πρώτο αναλυτικό αριθμητικό παράδειγμα του παρόντος κεφαλαίου, ενώ, για λόγους σύγκρισης, το βάθος ταφής του μέχρι τον άξονα του αγωγού H επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο λόγος βάθους ταφής προς τη διάμετρο του αγωγού (H/D) να προκύπτει ίδιος σε κάθε υπό εξέταση περίπτωση.

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων καθιστούν τον ανελαστικό καθολικό λυγισμό κρίσιμη μορφή αστοχίας για τους δύο μικρότερους υπό εξέταση λόγους D/t , αποτέλεσμα που βρίσκεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα των προηγούμενων εργασιών. Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις πρώτες υπό εξέταση περιπτώσεις με τους μεγαλύτερους λόγους, αναδεικνύουν κρίσιμη μορφή αστοχίας τον ανελαστικό τοπικό λυγισμό, όπου η αντίστοιχη σχετική κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος $\delta\Delta_3$ είναι πρακτικώς μηδενική. Η περίπτωση με τον τέταρτο κατά σειρά μεγαλύτερο λόγο αναδεικνύει αστοχία από ανελαστικό τοπικό λυγισμό αλλά με αντίστοιχη διαφορική μετακίνηση εδάφους – αγωγού της τάξεως του 23% του βάθους επίχωσης H' ή του 33% της διαμέτρου του αγωγού, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συγκεκριμένος αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ότι αστοχεί παράλληλα και από καθολικό λυγισμό. Τέλος, για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις με τους μικρότερους λόγους D/t , ο τοπικός λυγισμός δεν εμφανίζεται ως μορφή αστοχίας, καθώς οι αναπτυσσόμενες μέγιστες θλιπτικές παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια. Αντίθετα, η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση ξεπερνά το 36% του βάθους επίχωσης στη μία περίπτωση και το 59% στην άλλη, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο ανελαστικός καθολικός λυγισμός - καθώς ο αγωγός διαρρέει και σε αυτές τις περιπτώσεις σε μικρότερη στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης - είναι η κρίσιμη μορφή αστοχίας. Σημειώνεται πάντως ότι, από πρακτικής άποψης, οι διάμετροι των αγωγών που αστοχούν από καθολικό λυγισμό είναι αρκετά μικρές και συνήθως δεν

επιλέγονται σε περιοχές επιρρεπείς σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις, όπως είναι το ανάστροφο ρήγμα του παραδείγματος.

6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση του φαινομένου του καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών υποκειμένων σε ενεργοποίηση ανάστροφων σεισμικών ρηγμάτων από τα οποία διέρχονται.

Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά ελαστικής δοκού επί ελαστικού εδάφους ως μία πρώτη προσέγγιση για την προσομοίωση του καθολικού λυγισμού υπόγειων αγωγών. Εξετάστηκε η λυγισμική συμπεριφορά αμφιέριστων και αμφίπακτων δοκών πεπερασμένου μήκους επί εύκαμπτης ελαστικής θεμελίωσης υπό σταθερή αξονική θλιπτική δύναμη. Εξήχθησαν αναλυτικές σχέσεις περιγραφής του φαινομένου και ειδικότερα οι ιδιομορφές λυγισμού, οι τιμές των κρίσιμων φορτίων και τα όρια μετάθεσης των ιδιομορφών συναρτήσει της ελαστικής εδαφικής δυσκαμψίας. Ακολούθως τα αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων. Τέλος, ερευνήθηκε αριθμητικά η μεταλυγισμική απόκριση της δοκού μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες.

Στη συνέχεια, έγινε προσομοίωση ενός αγωγού που διέρχεται από ενεργοποιούμενο σεισμικό ρήγμα. Μελετήθηκαν αριθμητικά δύο τύποι ρήγματος, το κανονικό και το ανάστροφο. Παρουσιάστηκε αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αριθμητική προσομοίωση του αγωγού, του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και του ενεργοποιούμενου σεισμικού ρήγματος. Στόχος των αναλύσεων ήταν η εξαγωγή όλων των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών του μεταλλικού φορέα και των διαγραμμάτων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους, όπως η έκταση της πλαστικοποίησης της επίχωσης και του μητρικού εδάφους και η παραμόρφωση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εκτιμήθηκε ο κίνδυνος εκδήλωσης καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών λόγω ενεργοποίησης ανάστροφων σεισμικών ρηγμάτων που καταπονούν τον αγωγό κυρίως θλιπτικά και θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητά του. Ο κίνδυνος του καθολικού λυγισμού αξιολογήθηκε αριθμητικά έναντι των άλλων ενδεχόμενων μορφών αστοχίας, όπως είναι ο τοπικός λυγισμός και η θραύση των συγκολλήσεων λόγω μεγάλων εφελκυστικών παραμορφώσεων, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τη γεωμετρική μη-γραμμικότητα, όσο και τη μη-γραμμικότητα του χάλυβα και του εδάφους. Στη συνέχεια διερευνήθηκε παραμετρικά ο κίνδυνος εκδήλωσης καθολικού λυγισμού σε σχέση με τη γωνία του ρήγματος που επηρεάζει την αναλογία επιβαλλόμενων αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών στον αγωγό, καθιστώντας ενδεχομένως τον καθολικό λυγισμό ως κρισιμότερη

μορφή αστοχίας. Τέλος, διερευνήθηκε παραμετρικά ο κίνδυνος εκδήλωσης καθολικού λυγισμού σε σχέση με το λόγο διαμέτρου του αγωγού προς το πάχος του τοιχώματος του (D/t), με στόχο να επιβεβαιωθούν τα συμπεράσματα παλαιότερων μελετών, οι οποίες σχετίζουν την κρίσιμη μορφή αστοχίας υπόγειων μεταλλικών αγωγών με το λόγο (D/t).

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη της λυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς αμφιέριστων και αμφίπακτων δοκών επί ελαστικού εδάφους προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για τη μετέπειτα μελέτη της συμπεριφοράς υπόγειων μεταλλικών αγωγών. Η αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος ανέδειξε τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τα αντίστοιχα σχήματα των ιδιομορφών, τα οποία ταυτίστηκαν απόλυτα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αριθμητικής γραμμικοποιημένης ανάλυσης λυγισμού μέσω προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Από τα διαγράμματα που συνδέουν την ελαστική εδαφική δυσκαμψία με τα κρίσιμα φορτία λυγισμού προέκυψε επιρροή της εδαφικής δυσκαμψίας στα φορτία αυτά. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας επηρεάζει το σχήμα της κρίσιμης ιδιομορφής λυγισμού, καθώς και αυξάνει το φορτίο που αντιστοιχεί στην εκάστοτε ιδιομορφή. Η επιρροή αυτή είναι σημαντικότερη για μικρότερες τη τάξει ιδιομορφές, με τις ανώτερες ιδιομορφές να μην επηρεάζονται σημαντικά από την εδαφική δυσκαμψία. Επίσης, και για την περίπτωση της αμφίπακτης δοκού, παρατηρήθηκε μετατροπή των σχημάτων των ιδιομορφών πέραν από τη μετάθεση της κρίσιμης ιδιομορφής με την αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας.

Όσον αφορά τη μεταλυγισμική συμπεριφορά των δοκών, αυτή μελετήθηκε μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GNIA). Τα σχήματα ατελειών που υιοθετήθηκαν ήταν γραμμικοί συνδυασμοί των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών της εκάστοτε περίπτωσης, με μέγιστες τιμές που προέκυψαν από οδηγίες κανονισμών. Οι προκύπτοντες δρόμοι ισορροπίας φορτίου – εγκάρσιας μετακίνησης σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση αναδεικνύουν την ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά τόσο της αμφιέριστης όσο και της αμφίπακτης δοκού επί ελαστικού εδάφους, με μικρή επιρροή των ατελειών στο οριακό φορτίο. Τέλος, η αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας συνεπάγεται μεγαλύτερη απόκλιση του οριακού φορτίου P_{max} , όπως προκύπτει σε κάθε περίπτωση από τη GNI ανάλυση, ως προς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όπως προκύπτει από τη γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (LBA).

Η προσομοίωση και η ανάλυση ενός αγωγού διερχόμενου από ενεργοποιούμενο σεισμικό ρήγμα είχε ως σκοπό την αποτίμηση της απόκρισης του αγωγού. Η προσομοίωση του αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία δοκού και του περιβάλλοντος εδάφους με μετακινησιακά μη-γραμμικά ελατήρια σε τρεις διαστάσεις προέκυψε από τις προτάσεις των περισσότερων σύγχρονων κανονισμών που περιλαμβάνουν το πρόβλημα του υπόγειου μεταλλικού αγωγού διερχόμενου από ρήγμα. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν δύο παραδείγματα, ενός ανάστροφου και ενός κανονικού επίπεδου ρήγματος γωνίας βύθισης $\psi=70^\circ$ και μηδενικού πάχους, που επιβάλλει μετακινήσεις σε έναν αγωγό που προσομοιώνεται σε μήκος 500m εκατέρωθεν του ρήγματος, με σκοπό την ανάδειξη της αναπτυσσόμενης έντασης του. Επομένως, επιβάλλοντας και στις δύο υπό εξέταση περιπτώσεις μετακινήσεις που συνάδουν με τη γεωμετρία του εκάστοτε προβλήματος, και για επίπεδη σχετική ολίσθηση των δύο αποχωριζόμενων τεμαχίων, προέκυψαν τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη που καταπονούν του αγωγούς των δύο παραδειγμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η αναπτυσσόμενη αξονική δύναμη N κατά μήκος του αγωγού, η καμπτική ροπή στις δύο διευθύνσεις M_y και M_z , η μέγιστη και η ελάχιστη τάση Von Mises σ_{max} και σ_{min} που αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα των προηγούμενων, καθώς επίσης και η μέγιστη και η ελάχιστη διαμήκης ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_{max} και ϵ_{min} . Τέλος, παρουσιάστηκαν οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις των εδαφικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού, απ' όπου προέκυψε η έκταση της πλαστικοποίησης

του εδάφους περίξ της θέσης του ρήγματος. Αξονική δύναμη αναπτύσσεται σε μήκος της τάξης των 300m εκατέρωθεν του ρήγματος και με διάγραμμα που προσομοιάζει το τριγωνικό σχήμα, ενώ καμπτικές ροπές και στους δύο άξονες αναπτύσσονται σε μήκος της τάξης των 100m. Τέλος, οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις αναδεικνύουν τον κίνδυνο μόνο του αγωγού που διέρχεται από ανάστροφο ρήγμα και όχι από το κανονικό, λόγω των μεγάλων αναπτυσσόμενων θλιπτικών δυνάμεων και κατ' επέκταση παραμορφώσεων σε συνδυασμό με τα αυστηρότερα όρια που απαιτούνται για την αποφυγή φαινομένων δευτέρας τάξεως.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα του ανάστροφου ρήγματος που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε μία περισσότερο λεπτομερής μη-γραμμική ανάλυση αγωγών διερχόμενων από ανάστροφα σεισμικά ρήγματα, με στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους. Πιο συγκεκριμένα, έγινε αποτίμηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές αστοχίας από τις οποίες ο αγωγός μπορεί να κινδυνεύει. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε αναλυτικά αρχικά ένα παράδειγμα ελαστοπλαστικού, και αντίστοιχα, για λόγους σύγκρισης, ελαστικού αγωγού μεγάλου λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος και σχετικά βαθιά θαμμένου σε χαλαρή άμμο, ο οποίος διέρχεται από ένα ανάστροφο ρήγμα με γωνία βύθισης $\psi=70^\circ$. Από τις μη-γραμμικές αναλύσεις που ακολούθησαν προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αγωγός δεν κινδυνεύει να αστοχήσει από καθολικό λυγισμό, καθώς για μικρή στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος, ο αγωγός αστοχεί λόγω ανελαστικού τοπικού λυγισμού. Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για τη γωνία βύθισης ψ του ρήγματος, ώστε να ελεγχθεί το ενδεχόμενο ο καθολικός λυγισμός να αποτελέσει κρίσιμη μορφή αστοχίας, καθώς η μεταβολή της γωνίας βύθισης μεταβάλλει την αναλογία της αναπτυσσόμενης θλίψης και κάμψης στο αγωγό. Από τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αναλύσεων προέκυψε ότι ο μηχανισμός αστοχίας για τις έξι υπό εξέταση περιπτώσεις είναι ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός.

Τέλος, έγιναν παραμετρικές αναλύσεις ως προς το λόγο της διαμέτρου του αγωγού προς το πάχος του τοιχώματος του (D/t), ώστε να αξιολογηθεί το ενδεχόμενο ο καθολικός λυγισμός να αποτελέσει την κρίσιμη μορφή αστοχίας με την σταδιακή μείωση του λόγου αυτού. Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων κατέστησαν τον ανελαστικό καθολικό λυγισμό κρίσιμη μορφή αστοχίας για τους δύο μικρότερους υπό εξέταση λόγους D/t . Οι τρεις πρώτες υπό εξέταση περιπτώσεις με τους μεγαλύτερους λόγους ανέδειξαν κρίσιμη μορφή αστοχίας τον ανελαστικό τοπικό λυγισμό, όπου η αντίστοιχη σχετική κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος $\delta_{\Delta z}$ ήταν πρακτικώς μηδενική. Η περίπτωση με τον τέταρτο κατά σειρά μεγαλύτερο λόγο ανέδειξε αστοχία από ανελαστικό τοπικό λυγισμό αλλά με αντίστοιχη διαφορική μετακίνηση εδάφους – αγωγού της τάξεως του 23% του βάθους επίκωσης H' ή του 33% της διαμέτρου του αγωγού, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συγκεκριμένος αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ότι αστοχεί παράλληλα και από καθολικό λυγισμό. Σημειώνεται πάντως ότι, από πρακτικής άποψης, οι διάμετροι των αγωγών που αστοχούν από καθολικό λυγισμό ήταν αρκετά μικρές και συνήθως δεν επιλέγονται σε περιοχές επιρρεπείς σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις, όπως είναι το ανάστροφο ρήγμα του παραδείγματος.

6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Ο καθολικός λυγισμός αγωγών είναι μία μορφή αστοχίας που απασχολεί συχνά τους ερευνητές, ειδικά λόγω της κρισιμότητας του φαινομένου σε υποθαλάσσιους αγωγούς. Για την ακριβέστερη μελέτη της συμπεριφοράς των αγωγών, καθώς και για την αποτίμηση του κινδύνου του καθολικού λυγισμού σε σχέση με υπόλοιπες μορφές αστοχίας, απαιτείται η πιο λεπτομερής προσομοίωση του φυσικού προβλήματος. Ο αγωγός, ειδικά περίξ της περιοχής του ρήγματος, οφείλει να προσομοιαστεί με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία επιτρέπουν την άμεση παρατήρηση φαινομένων τοπικού λυγισμού. Επιπλέον, το έδαφος δύναται να προσομοιαστεί με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, αντί για τα μετακινησιακά μη-γραμμικά ελατήρια σε τρεις διαστάσεις. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την

ακριβέστερη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού – περιβάλλοντος εδάφους, αλλά παράλληλα θα απαιτήσει σημαντικά μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο για την περαίωση των αναλύσεων.

Όσον αφορά τους χερσαίους αγωγούς που διέρχονται από σεισμικά ρήγματα, ο καθολικός λυγισμός μπορεί να γίνει κρίσιμη μορφή αστοχίας για μικρές διαμέτρους, όπως προέκυψε από τις παραμετρικές αναλύσεις ως προς το λόγο D/t του τελευταίου κεφαλαίου. Παρόλα αυτά, τέτοιες διατομές θεωρείται απίθανο να επιλεγούν σε περιοχές ρηγμάτων, με αποτέλεσμα ο τοπικός λυγισμός να αποτελεί στη συντριπτική πλειοψηφία την κρίσιμη μορφή αστοχίας στα συγκεκριμένα προβλήματα.

Μία πρόσφατη μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος υπόγειων χερσαίων μεταλλικών αγωγών διερχόμενων από σεισμικά ρήγματα, ούτως ώστε αποφευχθεί η αστοχία από τοπικό λυγισμό ή θραύση των συγκολλήσεων σε μικρή στάθμη επιβαλλόμενης μετακίνησης, είναι η τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων, με σκοπό οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις να συγκεντρωθούν σε αυτούς και τα χαλύβδινα τμήματα του αγωγού να αναπτύσσουν μικρή ένταση. Οι εύκαμπτοι κόμβοι, όμως, δρουν ως εσωτερικές αρθρώσεις και μετατρέπουν το συνεχή αγωγό σε σπονδυλωτό. Τούτο έχει ως συνέπεια τη μείωση της καθολικής δυσκαμψίας της κατασκευής. Έτσι, στην περίπτωση που ο αγωγός με εύκαμπτους κόμβους υποβληθεί σε ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος, υπάρχει ο κίνδυνος να αποδειχθεί ως κρίσιμότερη μορφή αστοχίας ο καθολικός λυγισμός, ακόμα και για σχετικά βαθιά θαμμένους αγωγούς με μεγάλο λόγο διαμέτρου προς πάχος.