



ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 8

*Προκαταρκτική αναλυτική και αριθμητική διερεύνηση
χρήσης εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 8.1:

*Τεχνική έκθεση προκαταρκτικής αναλυτικής και αριθμητικής
διερεύνησης χρήσης εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους
αγωγούς*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENergy related Steel
STRuctures using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: Prof. C. GANTES

WORK PACKAGE (W.P.) 8

*Preliminary analytical and numerical investigation of flexible
joints for underground pipelines*

DELIVERABLE 8.1:

*Technical report of the preliminary analytical and numerical
investigation of flexible joints for underground pipelines*

2015



European Union
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND

Summary

I. Introduction

Within the framework of deliverable EE8 the possibility of using existing analytical and numerical simulation procedures to assess the response of buried pipelines with flexible joints between the adjacent steel pipe parts due to faulting was investigated.

The literature review revealed that the existing analytical methodologies are not applicable in the preliminary investigation regarding the requirements of the flexible joints to be fulfilled, in order to have beneficial effect on the pipeline developing strains. On the other hand, the available numerical methodologies can sufficiently model the response of buried pipelines subjected to large ground movements resulting from active fault rupture, and the behavior of commercially available flexible joints.

II. Numerical Analyses to Investigate the Effect of Flexible Joints to Pipeline Structural Response

Numerical parametric analyses using the finite element method have been carried out using 3D elastoplastic models to investigate the effects of flexible joints to pipeline structural response. Specifically, the pipeline was meshed with 2-node, isoparametric, three-dimensional, beam-type finite elements. Two cases were particularly examined:

(a) A buried pipeline with diameter 114.3 mm and wall thickness 3 mm was subjected to half strike-slip rupture. The pipe model length was selected as the one until the crossing point, where half of the fault offset was imposed. Pipe - soil interaction was modeled through two translational elastoplastic springs: in the pipe longitudinal direction and transverse horizontally with respect to the pipeline axis. Vertical springs were ignored given that fault movement took place within the horizontal plane. Finally, flexible joints were modeled as internal hinges equipped with a rotational spring of adequate stiffness.

(b) A buried pipeline with diameter 914.4 mm and wall thickness 11.9 mm was subjected to normal, reverse and strike-slip faulting. The fault plane was assumed vertical and planar with zero thickness, while the pipeline intercepted the fault plane perpendicularly. Pipe – soil interaction was modeled through four translational elastoplastic spings in the pipe longitudinal direction, transverse horizontally with respect to the pipeline axis and two in the vertical direction. Finally, flexible joints were modeled as internal hinges equipped with a rotational spring of adequate stiffness.

III. Investigation of Continuous Pipeline Local Buckling

Numerical analyses were performed to investigate the local buckling development in continuous pipelines and determine the flexible joints positions. The pipeline was meshed with shell elements that allow the assessment of local buckling. The pipeline under investigation was in accordance to the experimental investigation that will be carried out. The pipeline was assumed to be a clamped-clamped beam with external diameter of 114.3 mm and wall thickness of 3 mm, while the imposed displacement in the middle span was equal to one time the pipe external diameter.

IV. Conclusions

Interesting conclusions were extracted from the preliminary numerical analyses that were carried out:

1. The introduction of flexible joints with low rotational stiffness between adjacent steel pipe parts can lead to significant reduction of developing longitudinal strains, when the pipeline is subjected to fault offset.

The preliminary numerical results, where half of the fault offset was imposed, revealed an 80% reduction of strains due to the introduction of a suitably located flexible joint on both sides of the fault. The introduction of two joints on each side of the fault increases the strain reduction to 90%. However, if a flexible joint is introduced quite far away from the fault crossing, then strain reduction is insignificant (about 4%), while the resulting axial force increase is important (about 67%). These results highlight the importance of the optimization procedure for flexible joints number and locations.

Within the preliminary numerical analyses of pipelines subjected to fault offset, three flexible joints are integrated into the pipeline: one on the fault, one in the footwall part and the third in the hanging wall part of the fault. The flexible joint location on each side of the fault is selected based on the distributions of bending moment of the continuous pipeline. Thus, joints are introduced on the maximum bending moment location. Numerical results demonstrate the strain reduction by 4 times in case of normal or reverse faulting, while in case of strike-slip faulting a reduction by 10 times is achieved. In all cases under investigation, reduction of bending moment was revealed, while a minor increase of axial force was reported. Furthermore, comparing the flexible joint location on the pipeline

with reference to the distance from crossing point, in case of strike-slip the distance was three times smaller than in case of normal or reverse fault type.

2. Another important conclusion is that, unlike the slip joints investigated by O'Rourke & Liu (1994), the spatial misplacement of flexible joints (e.g. due to fault location uncertainty) does not lead to significant unfavorable developing pipe deformation, which would have been dissuasive to the use of flexible joints in pipe - fault crossings.
3. The so far formulated requirement for flexible joints, as part of the planned experimental investigation, is that the minimum angular movement that the joint can accommodate is at least 11° . Furthermore, internal pressure resistance is not necessary, as pipe specimens will be unpressurized (e.g. a 6.0 atm internal pressure resistance is adequate).
4. When a continuous pipeline is subjected to faulting, local buckling is usually the dominant failure mode. The areas where local buckling is developed are the most suitable to introduce the flexible joints, which aim at concentrating strains and retain the pipeline steel parts virtually undeformed and unstressed.

The obtained preliminary numerical results indicate that three groups of experiments should be carried out to identify the effects of flexible joints in pipeline mechanical behavior:

- 1st group: A continuous pipeline will be investigated and the measured strains will be used as benchmark for evaluating the joints' efficiency.
- 2nd group: A pipeline with four flexible joints will be investigated to experimentally demonstrate the effectiveness of flexible joints in terms of reducing longitudinal strains.
- 3rd group: The flexible joints stiffness will be experimentally investigated in order to calibrate the corresponding numerical models.

The above mentioned instructions formulate the general framework for the experimental investigation. The final experimental program will be configured during the experiments and with respect to the obtained measurements and the difficulties that might emerge.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
1. Εισαγωγή	4
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	7
2.1 Γενικά	7
2.2 Παθολογία σπονδυλωτών αγωγών (segmented pipes)	7
2.3 Αναλυτική προσομοίωση συμπεριφοράς σπονδυλωτών αγωγών έναντι διάρρηξης ρήγματος.....	10
2.4 Αριθμητική προσομοίωση	14
3. Αριθμητική Μεθοδολογία.....	20
3.1 Εισαγωγή	20
3.2 Προσομοίωμα αγωγού με μισή διάρρηξη ρήγματος.....	20
3.2.1 Γενικά	20
3.2.2 Ελατήρια προσομοίωσης εδάφους	21
3.3 Προσομοίωμα αγωγού με πλήρη διάρρηξη ρήγματος.....	22
3.3.1 Γενικά	22
3.3.2 Ελατήρια προσομοίωσης εδάφους	23
3.4 Προσομοίωση ελατηριωτού εδάφους	24
3.4.1 Αξονικά ελατήρια.....	24
3.4.2 Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια	25
3.4.3 Κατακόρυφα προς τα άνω ελατήρια.....	26
3.4.4 Κατακόρυφα προς τα κάτω ελατήρια	27
3.5 Προσομοίωση εύκαμπτων κόμβων	28
3.6 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων αγωγού χωρίς έδαφος.....	30
4. Προκαταρκτικές Αριθμητικές Αναλύσεις	32
4.1 Εισαγωγή	32

4.2	Αριθμητικές αναλύσεις αγωγού με μισή διάρρηξη ρήγματος	32
4.2.1	Γενικά	32
4.2.2	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	33
4.2.3	Συμπεράσματα	38
4.3	Αριθμητικές αναλύσεις αγωγού με πλήρη διάρρηξη ρήγματος	38
4.3.1	Γενικά	38
4.3.2	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	39
4.3.2.1	Κανονικό ρήγμα	39
4.3.2.2	Ανάστροφο ρήγμα	41
4.3.2.3	Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης	42
4.4	Αριθμητικές αναλύσεις αγωγού χωρίς έδαφος	44
4.4.1	Γενικά	44
4.4.2	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	45
5.	Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα	47
5.1	Εισαγωγή	47
5.2	Αριθμητικές αναλύσεις για τη μελέτη της επιρροής εύκαμπτων κόμβων στη συμπεριφορά του αγωγού	47
5.3	Αριθμητικές αναλύσεις για τη μελέτη του τοπικού λογισμού συνεχούς αγωγού	48
5.4	Συμπεράσματα	48
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	51

1

Εισαγωγή

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται υπό το γενικό συντονισμό του Καθηγητή κ. Χαράλαμπος Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 8**, με τίτλο:

«Αναλυτική και αριθμητική διερεύνηση χρήσης εδάκμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 8**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Θα μελετηθεί αναλυτικά και αριθμητικά με υφιστάμενες μεθόδους η απόκριση υπόγειων αγωγών με “τοπικούς” είτε “συνεχείς” εδάκμπτους κόμβους (π.χ. από εδάκμπτο, πολυμερές υλικό HDPE) μεταξύ διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων, σε περιπτώσεις ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων τα οποία διασχίζει ο αγωγός. Για τους εδάκμπτους κόμβους θα διατυπωθούν απαιτήσεις μεγάλων επιτρεπόμενων καμπτικών και αξονικών παραμορφώσεων, επαρκούς αντίστασης σε εσωτερική πίεση, αποφυγής διαρροής, χαμηλού βάρους και ανθεκτικότητας. Θα αξιολογηθούν οι απαιτήσεις μηχανικής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων εδάκμπτων κόμβων σε επίπεδο σχέσης φορτίου-παραμόρφωσης ή ροπής-στροφής. Θα γίνει προκαταρκτική επιλογή εναλλακτικών λύσεων οι οποίες θα ελεγχθούν πειραματικά στην ΕΕ9».

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση των υφιστάμενων αναλυτικών και αριθμητικών μεθοδολογιών για την προσομοίωση υπόγειων αγωγών με εδάκμπτους κόμβους.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά, εν απουσία κατάλληλων αναλυτικών μεθόδων, για την προσομοίωση του προβλήματος.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την προκαταρκτική διερεύνηση της χρήσης εύκαμπτων κόμβων για τη μείωση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό κατά την ενεργοποίηση σεισμικών ρηγμάτων.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της προκαταρκτικής αριθμητικής διερεύνησης σχετικά με τα αναμενόμενα οφέλη από την χρήση εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς καθώς και την βέλτιστη τεχνικο-οικονομικά κατανομή των εν λόγω κόμβων στην περιοχή της διαρρηξης.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- **Χαράλαμπος Γαντές**, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- **Γεώργιος Μπουκοβάλας**, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- **Αλέξανδρος Βαλαμής**, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- **Αθανάσιος Τριανταφύλλου**, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- **Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης**, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- **Στυλιανός Βερνάρδος**, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- **Παύλος Αστερίου**, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- **Αριστομένης Τσαντίλης**, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- **Γρηγορία-Πολυξένη Ζαράκη**, Πολιτικός Μηχανικός Δομικών Έργων
- **Michael O'Rourke**, Professor, Rensselaer Polytechnic Institute, U.S.A.
- **Thomas Denis O'Rourke**, Professor, Cornell U., U.S.A.

Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ Βασίλειο Μελισσιανό για τη συμβολή του.

Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Γενικά

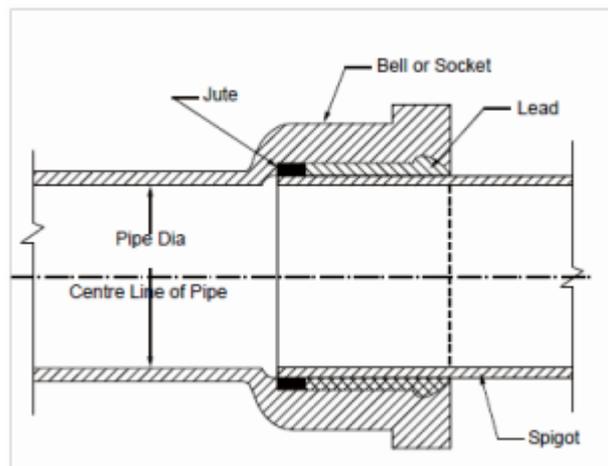
Η χρήση εύκαμπτων κόμβων για τον περιορισμό των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων σε υπόγειους αγωγούς, λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων, δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά μέχρι σήμερα, όπως προκύπτει και από τη σχετικά περιορισμένη υφιστάμενη διεθνή βιβλιογραφία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 του παραδοτέου 7.1 (EE 7). Κατά συνέπεια, με την εξαίρεση της αναλυτικής επίλυσης χρήσης εύκαμπτων κόμβων τύπου ολισθησης (slip joints) των O'Rourke & Liu (1994, 2012), δεν υπάρχουν σήμερα διαθέσιμες κάποιες ευρέως αποδεκτές, αναλυτικές ή/και αριθμητικές, αποτιμήσεις της απόκρισης υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους έναντι μεγάλων εδαφικών μετατοπίσεων.

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου γίνεται αρχικά επισκόπηση της παθολογίας των "σπονδυλωτών" αγωγών (segmented pipelines) υπό την επίδραση μεγάλων μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, και ακολουθεί η επισκόπηση των αναλυτικών επιλύσεων που έχουν προταθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους. Επιπλέον, εκτιμάται και σχολιάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των λύσεων για τις ανάγκες του παρόντος παραδοτέου και του ερευνητικού προγράμματος γενικότερα. Αντίστοιχα, γίνεται επισκόπηση των διαθέσιμων αριθμητικών μεθοδολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, και προκρίνεται η μεθοδολογία που τελικώς θα χρησιμοποιηθεί για τις προκαταρκτικές αναλύσεις του παρόντος Παραδοτέου.

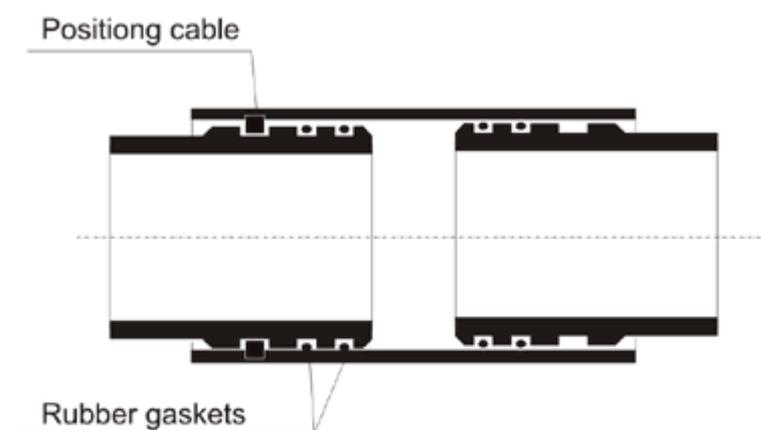
2.2 Παθολογία σπονδυλωτών αγωγών (segmented pipes)

Σπονδυλωτοί αγωγοί (segmented pipes) ονομάζονται οι αγωγοί που αποτελούνται από όμοια τμήματα τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με τρόπο που δεν εξασφαλίζει απόλυτα τη συνέχεια μεταξύ των τμημάτων, όπως γίνεται με τη συγκόλληση διαδοχικών τμημάτων του αγωγού. Όπως έχει αποδειχτεί πολλές φορές στο παρελθόν, π.χ. σε ιστορικά περιστατικά σεισμών (π.χ. Sun & Shien 1983, O'Rourke & Ballantyne 1992), οι ενώσεις αυτές αποτελούν ευαίσθητα σημεία του αγωγού και σχετίζονται με λειτουργικές ή/και δομικές αστοχίες. Παρόλο που η ακριβής τους διαμόρφωση εξαρτάται από τον κατασκευαστή των σωλήνων, ο συνηθέστερος τύπος

σύνδεσης είναι τηλεσκοπικής μορφής (bell and spigot joints), όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1α.



(α)



(β)

Σχήμα 2.1: Συνήθειες ενώσεις αγωγών: α) τηλεσκοπικής μορφής και β) με εξωτερικό χιτώνιο.

Figure 2.1: Common types of pipe joints: a) bell & spigot and b) sleeve coupling.

Σύμφωνα με τους O'Rourke & Ballantyne (1992) και O'Rourke & Liu (2012), τρεις είναι οι κύριες μορφές αστοχίας που παρατηρούνται σε σπονδυλωτούς αγωγούς (segmented pipelines): (α) αξονική εξόλκευση του αγωγού στη σύνδεση, (β) διάρρηξη της ίδιας της σύνδεσης και (γ) εμφάνιση κυκλικών ρηγματώσεων στον αγωγό μακριά από τη σύνδεση.

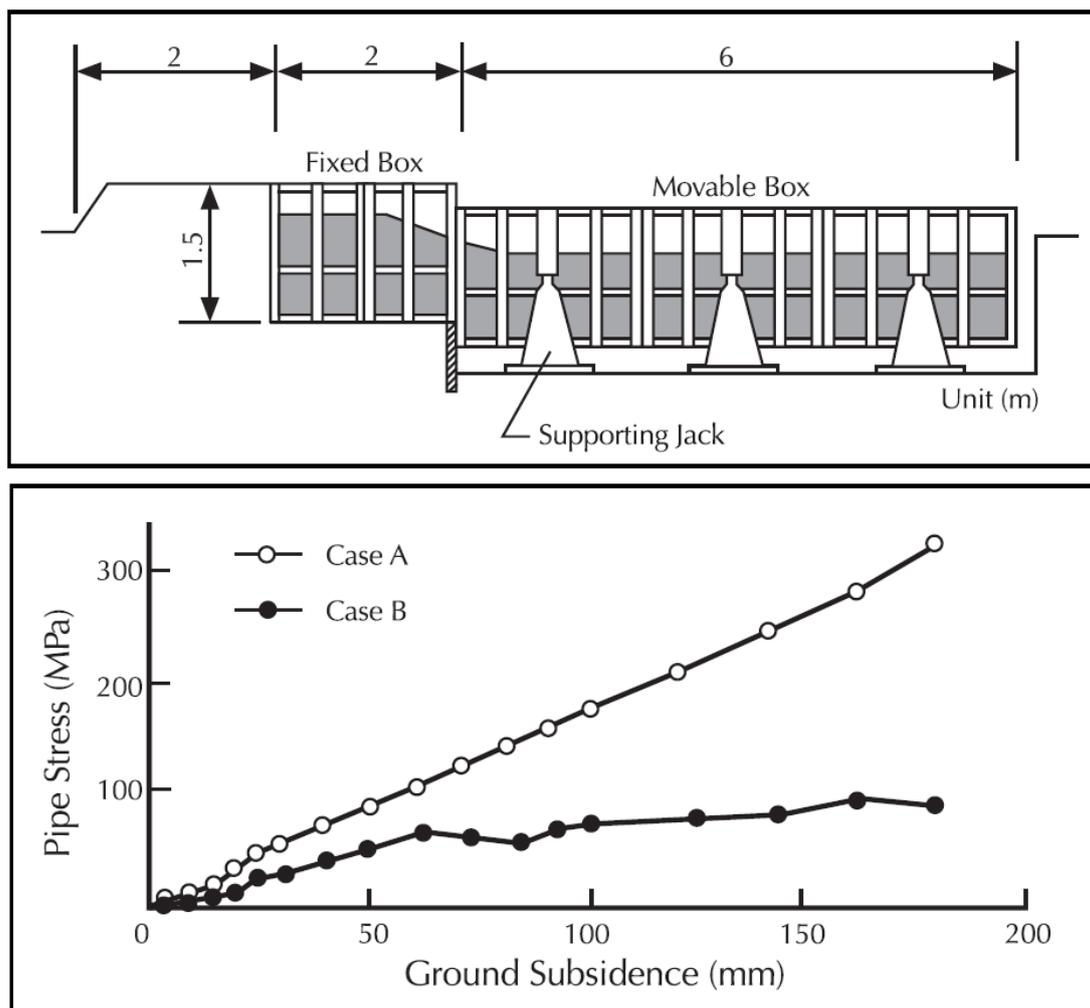
Η συμπεριφορά του σπονδυλωτού αγωγού σε μεγάλες επιβαλόμενες εδαφικές μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται από τη διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, εξαρτάται από τον τύπο της μετακίνησης (π.χ. κατά μήκος ή εγκάρσια στη διεύθυνση του αγωγού), από το μέγεθος της εδαφικής μετακίνησης, το πλάτος της περιοχής στην οποία επιβάλλεται η μετακίνηση και την κατανομή της μετακίνησης σε αυτό. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι όσο πιο κατανομημένη είναι η επιβαλόμενη εδαφική μετακίνηση κατά μήκος του αγωγού, τόσο μικρότερη είναι η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση σε κάθε σύνδεση και κατά συνέπεια τόσο μικρότερη και η πιθανότητα αστοχίας.

Στο παρελθόν έγινε προσπάθεια αναλυτικής προσομοίωσης κατανεμημένης και τοπικής επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης τόσο παράλληλα προς τον αγωγό (π.χ. O'Rourke et al. 1995, ALA Guidelines 2005, O'Rourke & Liu 2012) όσο και εγκάρσια προς αυτόν (π.χ. O'Rourke & Nordberg 1991). Η συνήθης παραδοχή στις αντίστοιχες αναλύσεις, είναι ότι τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού είναι απολύτως άκαμπτα και χωρίς παραμόρφωση ($EA=\infty$, $EI=\infty$) και ότι όλες οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στις συνδέσεις. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στην πολύ μικρότερη δυσκαμψία και αντοχή που εμφανίζουν οι συνήθεις συνδέσεις έναντι των υπόλοιπων τμημάτων του αγωγού. Δεν είναι όμως αυτονόητο ότι θα ισχύσει και στην περίπτωση των εύκαμπτων κόμβων, με πεπερασμένη (υπολογίσιμη) ευκαμψία, που εξετάζονται στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, για την περίπτωση σπονδυλωτών αγωγών, οι επιβαλλόμενες εδαφικές μετακινήσεις κατά μήκος του αγωγού είναι εν γένει πιο επικίνδυνες από ότι αν οι ίδιες μετακινήσεις γίνουν εγκάρσια προς τον άξονα του αγωγού. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε αρχικά (Suzuki, 1988)) από μελέτη των αποσχιών σε αγωγούς κατά το σεισμό της Niigata 1964 και έχει επίσης υιοθετηθεί από τον ευρέως χρησιμοποιούμενο στην πράξη κανονισμό ALA Guidelines (ASCE, 2005).

Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος των αγωγών ύδρευσης κατασκευάζεται με σπονδυλωτούς αγωγούς, έγινε από νωρίς προσπάθεια πειραματικής διερεύνησης της συμπεριφοράς τους σε περίπτωση διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων. Συγκεκριμένα, ο Takada (1984) διερεύνησε πειραματικά τη συμπεριφορά δύο σπονδυλωτών αγωγών με διαφορετικό μήκος των συνεχών τμημάτων, σε περίπτωση διάρρηξης ορθού ρήγματος που τους διασχίζει κάθετα. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, οι τάσεις στον αγωγό ήταν σαφώς μικρότερες για την περίπτωση B (Case B) που ο αγωγός είχε κατασκευαστεί από πέντε (5) τμήματα έναντι της περίπτωσης A (Case A) που είχε κατασκευαστεί από τρία (3) μεγαλύτερα τμήματα, αποδεικνύοντας ότι για συνδέσεις που επιτρέπουν στροφή, οι μέγιστες καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στα ευθύγραμμα τμήματα του αγωγού είναι ανάλογες με το μήκος τους.

Πιο πρόσφατα, οι Kim et al. (2009) προσομοίωσαν ένα σπονδυλωτό αγωγό από οπλισμένο σκυρόδεμα σε κλίμακα 1:5. Παρά το γεγονός ότι στο πείραμα οι συνδέσεις ήταν γεμισμένες με ειδικό τσιμεντοκονίαμα, με αποτέλεσμα να είναι πιο ανθεκτικές και δύσκαμπτες από τις συνήθεις συνδέσεις, σχεδόν το σύνολο των παραμορφώσεων εντοπίστηκαν σε αυτές, επιβεβαιώνοντας έτσι την ορθότητα της παραδοχής ότι τα ενδιάμεσα τμήματα του αγωγού συμπεριφέρονται ως πρακτικώς άκαμπτα και απαραμόρφωτα.

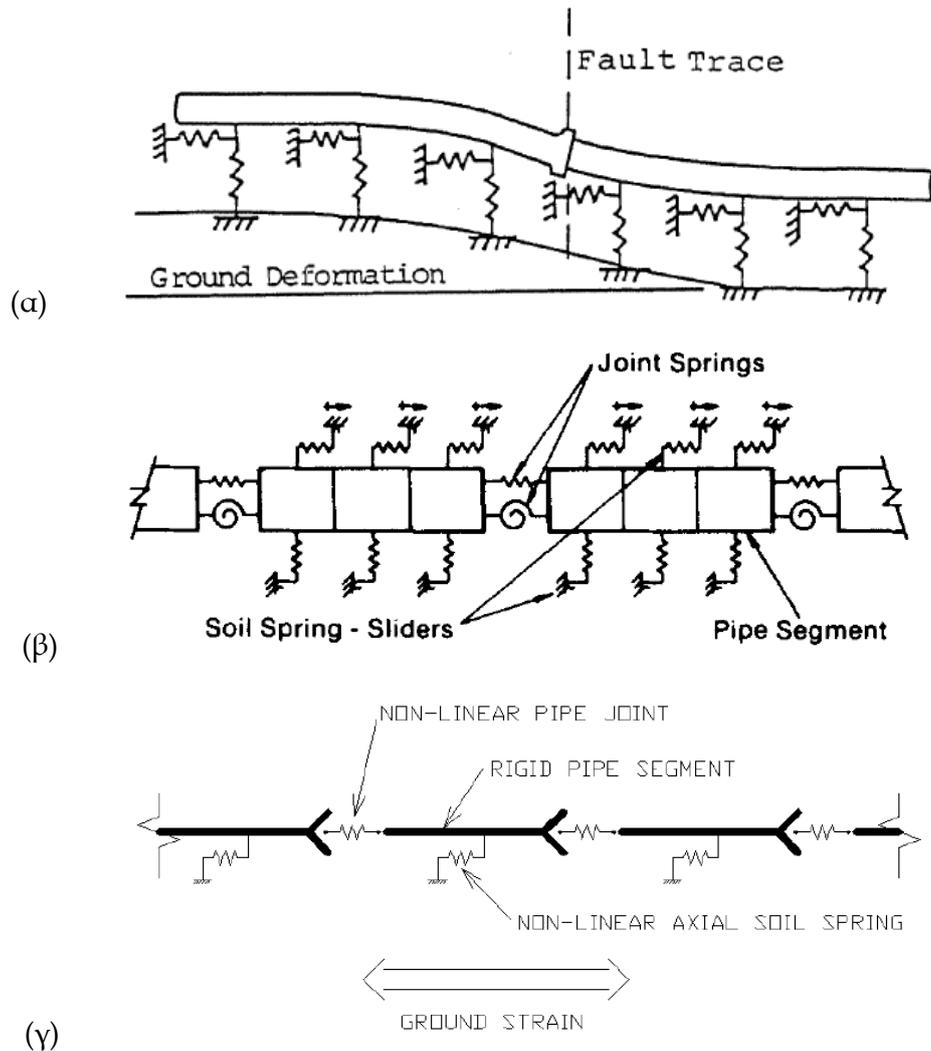


Σχήμα 2.2: Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα πειραμάτων Takada (1984).

Figure 2.2: Experimental apparatus and results from Takada (1984) experiments.

2.3 Αναλυτική προσομοίωση συμπεριφοράς σπονδυλωτών αγωγών έναντι διάρρηξης ρήγματος

Για την αναλυτική προσομοίωση των σπονδυλωτών αγωγών (segmented pipelines) γίνονται αντίστοιχες παραδοχές με την προσομοίωση των συνεχών αγωγών, δηλαδή το κάθε τμήμα του αγωγού θεωρείται ελαστική δοκός που εδράζεται σε ελαστοπλαστικά εδαφικά ελατήρια, στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση (ALA Guidelines 2001). Η ουσιαστική διαφορά είναι ότι τα τμήματα του αγωγού συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσεις (εύκαμπτους κόμβους) που έχουν τη δυνατότητα στροφής και σχετικής μετακίνησης. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αναλυτικά προσομοιώματα που χρησιμοποίησαν οι Takada (1984), Elhadi & O'Rourke (1990) και O'Rourke (2009) για τις αναλύσεις τους.



Σχήμα 2.3: Αναλυτικό προσομοίωμα σπονδυλωτού αγωγού σύμφωνα με (α) τον Takada (1984), (β) τους Elhmadi & O'Rourke (1990) και (γ) O'Rourke (2009).

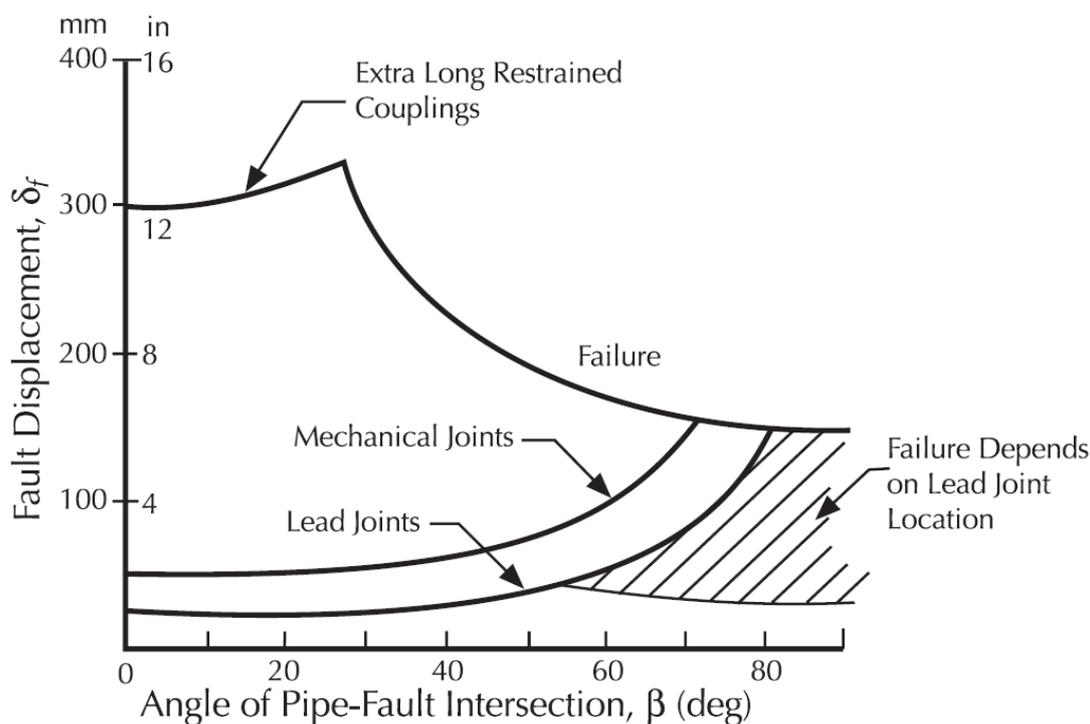
Figure 2.3: Analytical model of segmented pipeline simulation according to (a) Takada (1984), (b) Elhmadi & O'Rourke (1990) and (c) O'Rourke (2009).

Οι O'Rourke & Trautmann (1981) χρησιμοποίησαν την ανωτέρω μεθοδολογία, και επιπλέον την παραδοχή ότι οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στις συνδέσεις ενώ τα τμήματα του αγωγού παραμένουν απαραμόρφωτα, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη γωνία διασταύρωσης με το ρήγμα είναι αυτή στην οποία συμβαίνει ταυτόχρονα αξονική αστοχία, λόγω επιμήκυνσης της σύνδεσης, και εγκάρσια αστοχία, λόγω στροφής της σύνδεσης. Η γωνία αυτή υπολογίστηκε ίση με:

$$\beta_{optimal} = \arctan\left(\frac{\delta_l}{\delta_a}\right) \quad (2.1)$$

- όπου, β η γωνία διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα
 δ_a η παραμόρφωση κατά μήκος του αγωγού και
 δ_l η παραμόρφωση εγκάρσια προς τον αγωγό.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων που εξετάστηκαν, οι ερευνητές κατέληξαν στο διάγραμμα του Σχήματος 2.4 για την εκτίμηση της μέγιστης επιτρεπόμενης μετακίνησης του ρήγματος συναρτήσει της γωνίας διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό. Οι εκτιμήσεις αυτές δεν είναι περιοριστικές για την περίπτωση χρήσης εύκαμπτων κόμβων, όπως αυτοί που εξετάζονται στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού προγράμματος.



Σχήμα 2.4: Εκτίμηση μέγιστης επιτρεπόμενης μετακίνησης ρήγματος ως προς τη γωνία διασταύρωσης με τον αγωγό ανάλογα με το είδος των συνδέσεων του σπονδυλωτού αγωγού (O'Rourke & Trautmann, 1981).

Figure 2.4: Maximum allowable fault displacement relatively to the crossing angle of the fault and the segmented pipe joint type according to O'Rourke & Trautmann (1981).

Στον κανονισμό ALA Guidelines (ASCE 2005) έχει επίσης προβλεφθεί αναλυτική επίλυση για την περίπτωση οριζόντιας διάρρηξης ενεργού ρήγματος που διασταυρώνεται με σπονδυλωτό αγωγό. Η ανάλυση δέχεται ότι το ρήγμα διασταυρώνεται με τον αγωγό στη μέση ενός από τα τμήματα του αγωγού, ενώ οι συνδέσεις θεωρούνται ότι λειτουργούν ως αρθρώσεις, δηλαδή μπορούν να στρίψουν ελεύθερα και να μεταφέρουν μόνο τις τέμνουσες δυνάμεις. Σε αυτή την περίπτωση, επιβάλλονται οι παρακάτω αξονικές και γωνιακές μετατοπίσεις σε κάθε μία από τις δύο συνδέσεις:

$$\delta_{joint} = \frac{\delta}{2} \cos\beta \quad (2.2)$$

$$\gamma_{joint} = \arcsin\left(\frac{\delta}{L_p} \sin\beta\right) \quad (2.3)$$

όπου δ η μετακίνηση του ρήγματος

β η γωνία διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό και

L_p το μήκος του κάθε τμήματος του αγωγού μεταξύ των συνδέσεων.

Θεωρώντας ότι οι επιβαλόμενες από το έδαφος δυνάμεις έχουν φτάσει στη μέγιστή τους τιμή (ίση με p_u η οποία είναι η οριακή αντίσταση των εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων), η αναπτυσσόμενη ροπή και διατμητική τάση στη θέση διασταύρωσης με το ρήγμα, υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V = \frac{p_u L_p}{4} \quad (2.4)$$

$$M_{max} = \frac{p_u L_p^2}{32} \quad (2.5)$$

Όπως επισημαίνουν οι O'Rourke & Liu (2012), η συγκεκριμένη μεθοδολογία παραβλέπει την επιβαλόμενη αξονική παραμόρφωση στη σύνδεση λόγω της στροφής του τμήματος του αγωγού ανάμεσα στις συνδέσεις, η οποία είναι ίση με:

$$\delta_{rotational} = \frac{L_p}{2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{2} \sin\beta\right)^2} \quad (2.6)$$

και που προστίθεται ή αφαιρείται από την τιμή της Σχέσης 2.2 αναλόγως αν λόγω της στροφής δημιουργείται επιμήκυνση ή βράχυνση του αγωγού. Η αντίστοιχη σχετική στροφή γ_{joint} , θεωρώντας ότι η μετακίνηση δ είναι μικρή συγκριτικά με το μήκος των τμημάτων L_p , υπολογίζεται από την εξίσωση 2.3. Στην αρχική μεθοδολογία θεωρήθηκε ότι το ρήγμα διέρχεται από τη μέση ενός τμήματος του αγωγού, ενώ η δυσμενέστερη θέση είναι να διέρχεται από τη σύνδεση, οπότε η ροπή αυξάνεται σε:

$$M_{max} = \frac{p_u L_p^2}{8} \quad (2.7)$$

η αξονική παραμόρφωση λόγω μετατόπισης (αγνοώντας τις στροφές) αυξάνεται σε:

$$\delta_{joint} = \delta \cos\beta \quad (2.8)$$

και η σχετική στροφή των συνδέσεων αμέσως πριν και αμέσως μετά τη σύνδεση από την οποία διέρχεται το ρήγμα αυξάνεται σε:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\delta}{2L_p} \sin\beta\right) \quad (2.9)$$

Οι O'Rourke & Liu (2012) διαπίστωσαν ότι αυτές οι σχέσεις είναι μάλλον συντηρητικές συγκρινόμενες με τα πειράματα των Kim et al. (2009) και αποτελούν άνω όριο των αναμενόμενων παραμορφώσεων και στροφών, ανάλογα με τη θέση του ρήγματος.

Από την ανωτέρω σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση, διαπιστώνεται ότι τα διαθέσιμα αναλυτικά προσομοιώματα, και οι αντίστοιχες λύσεις, εστιάζουν στην καταπόνηση και την αστοχία των συνδέσεων και όχι των τμημάτων του αγωγού που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, χωρίς εκτενή διόρθωση και προσαρμογή για το πρόβλημα που εξετάζεται, όπου η χρήση συνδέσεων "ικανής" δυσκαμψίας και αντοχής, σε μεγάλη σχετικά απόσταση μεταξύ τους, δρα ευεργετικά για τον αγωγό αλλά δεν αποτρέπει τελικώς την αστοχία των τμημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ των συνδέσεων.

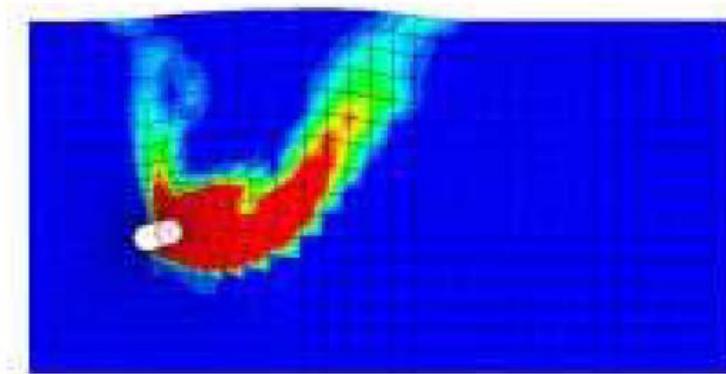
2.4 Αριθμητική προσομοίωση

Για την αριθμητική προσομοίωση υπόγειων αγωγών υποβαλλόμενων σε μεγάλες εδαφικές μετατοπίσεις έχουν εφαρμοστεί οι παρακάτω δύο βασικές μεθοδολογίες: η 2-διάστατη ανάλυση της διατομής του αγωγού και η 3-διάστατη ανάλυση μεγάλου μήκους αγωγού.

2-Διάστατη προσομοίωση. Αποτελεί την πιο απλή ανάλυση που μπορεί να πραγματοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των αγωγών υποβαλλόμενων σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Σε αυτού του είδους τις αναλύσεις προσομοιώνεται μία εγκάρσια τομή («φέτα») του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους, όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Ο αγωγός βρίσκεται αρχικά σε ισορροπία και στη συνέχεια επιβάλλεται σχετική μετακίνηση του αγωγού ως προς το έδαφος, προκειμένου να μελετηθούν οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις λόγω της εδαφικής αντίστασης και να επαληθευτούν οι σχέσεις δύναμης-μετακίνησης (καμπύλες p - y) των κατανεμημένων εδαφικών ελατηρίων που προτείνονται από τις κανονιστικές διατάξεις (π.χ. ALA Guidelines, ASCE 2001 & 2005).

Το συνηθέστερο πρόβλημα στο οποίο εφαρμόζονται τέτοιου είδους αναλύσεις είναι η μελέτη φαινομένων ανάδυσσης αγωγών (π.χ. Yimsiri et al. 2004, White et al. 2008, Cheuk et al. 2008), αλλά χρησιμοποιούνται επίσης και για την επαλήθευση των εδαφικών ελατηρίων λόγω μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, όπως αυτές που προκαλούνται από διάρρηξη ρηγμάτων (π.χ. Yoshizaki & Sakanoue 2004, Kouretzis et al. 2013).

Αν και τέτοιου είδους 2-Δ αναλύσεις μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό των περιφερειακών (hoop) τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται εντός της διατομής του αγωγού, η πρακτική τους εφαρμογή για τον σχεδιασμό αγωγών είναι περιορισμένη, δεδομένου ότι αγνοούν την διαμήκη διάσταση του αγωγού, η οποία και αποτελεί κομβικό στοιχείο των υπολογισμών.



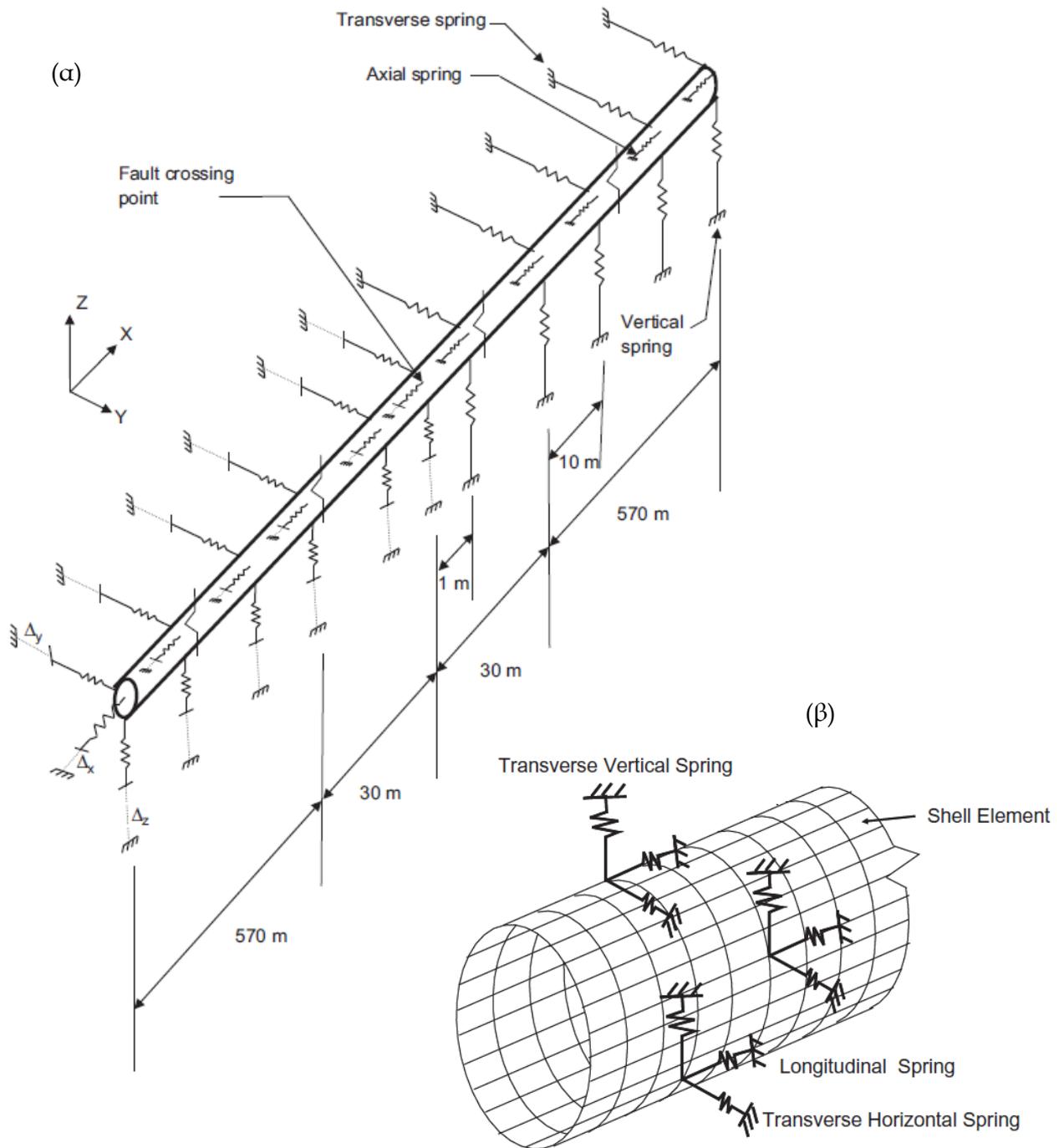
Σχήμα 2.5: Κατανομή παραμορφώσεων από την 2-Διάστατη ανάλυση των Yoshizaki & Sakanoue (2004) για την εκτίμηση των καμπυλών p-y του εδάφους.

Figure 2.5: Strain distribution from the 2-D model of Yoshizaki & Sakanoue (2004) for the evaluation of ground p-y curves.

3-Διάστατη προσομοίωση. Η 3-Διάστατη προσομοίωση χρησιμοποιείται για την πλήρη αποτύπωση του αγωγού, του περιβάλλοντος εδάφους και της μετακίνησης του ρήγματος. Στη διεθνή βιβλιογραφία, οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τη 3-Διάστατη προσομοίωση του προβλήματος διαφοροποιούνται κυρίως ως προς τη μέθοδο με την οποία προσομοιώνεται ο αγωγός και το περιβάλλον έδαφος.

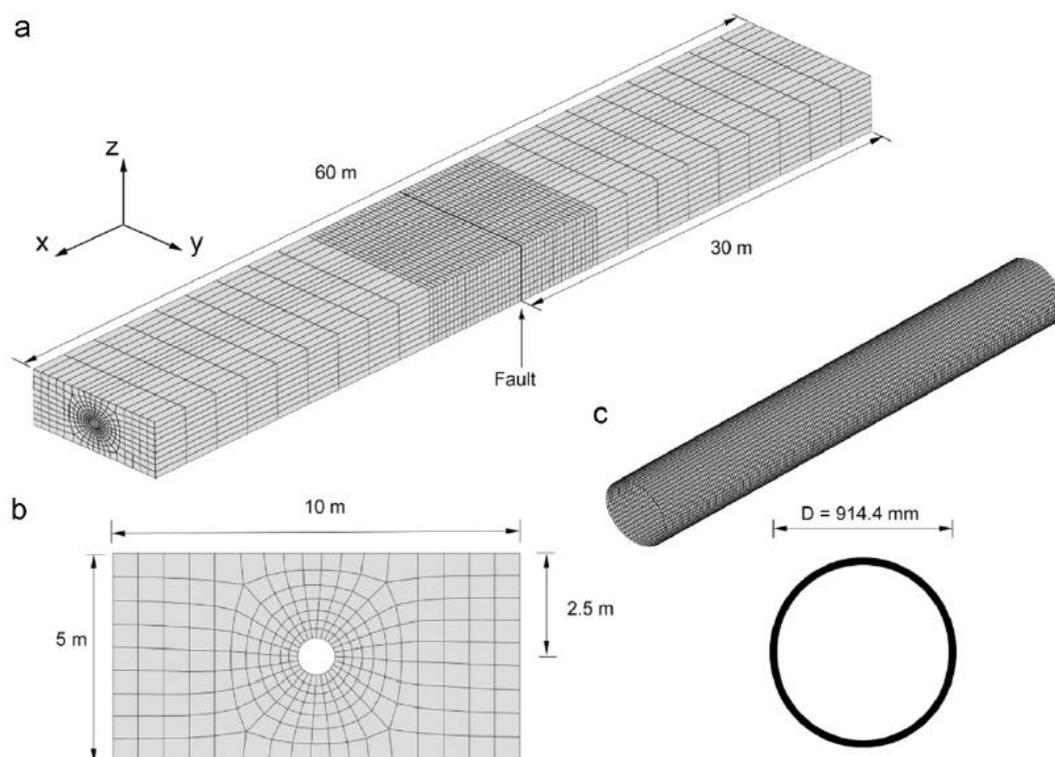
Πιο συγκεκριμένα το περιβάλλον έδαφος μπορεί να προσομοιωθεί είτε με ελατήρια που ακολουθούν μη-γραμμικό (ελαστοπλαστικό) νόμο φορτίου-μετατόπισης όπως αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6 (π.χ. Odina et al. 2009, Gu & Zhang 2009, Arifin et al. 2010, Joshi et al. 2011, Karamitros et al. 2011, Xie et al. 2011), είτε με πλήρη προσομοίωση του εδάφους με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία όπως αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7 (π.χ. Vazouras et al. 2010, Daiyan et al. 2010, Vazouras et al. 2012, Roudsari et al. 2013, Xie et al. 2013).

Η προσομοίωση του αγωγού μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με στοιχεία δοκού (ή σωλήνα), δηλαδή γραμμικά στοιχεία με συνολικά έξι (6) βαθμούς ελευθερίας (π.χ. Odina et al. 2009, Joshi et al. 2011, Karamitros et al. 2011), είτε με στοιχεία κελύφους (π.χ. Takada et al. 1998, Vazouras et al. 2010, Xie et al. 2011, Vazouras et al. 2012, Xie et al. 2013, Roudsari et al. 2013). Παραδείγματα αυτών των δύο τρόπων προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.6 και 2.7. Επιπροσθέτως υπάρχει μία σειρά από δημοσιεύσεις που χρησιμοποιούν έναν υβριδικό συνδυασμό των δύο τρόπων προσομοίωσης του αγωγού, δηλαδή με στοιχεία κελύφους στην περιοχή ενδιαφέροντος και με στοιχεία δοκού πιο μακριά (π.χ. Takada et al. 2001, Koumoussis et al. 2002, Yoshizaki & Sakanoue 2004, Karamitros et al. 2007, Gantes et al. 2008, Liu et al. 2008), όπως το αριθμητικό προσομοίωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.6: Αριθμητικά προσομοιώματα με ελατήρια για την προσομοίωση του εδάφους και (α) στοιχεία δοκού (Joshi et al. 2011) και (β) στοιχεία κελύφους (Xie et al. 2011) για την προσομοίωση του αγωγού.

Figure 2.6: Numerical models for the simulation of the ground with (a) beam elements (Joshi et al. 2011) and (b) shell elements (Xie et al. 2011) for the simulation of the pipe.

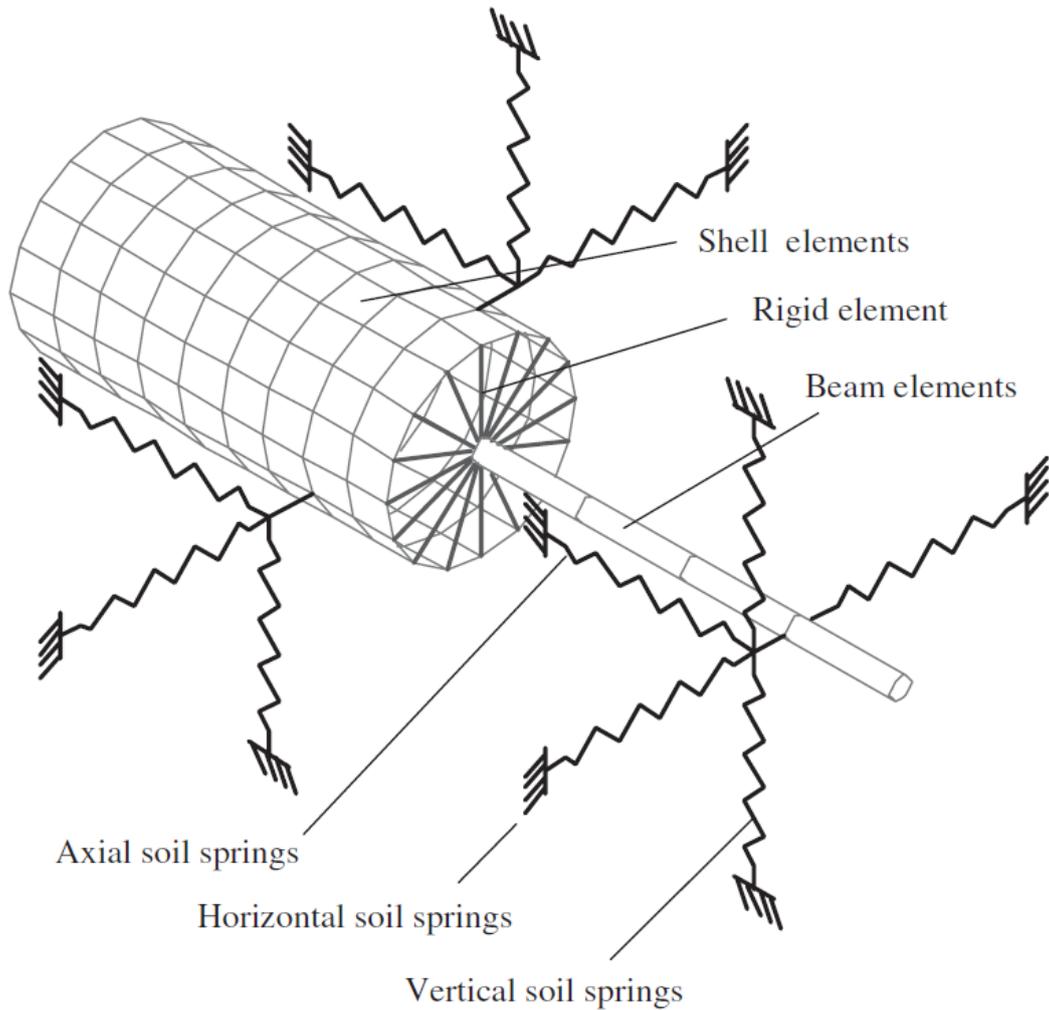


Σχήμα 2.7: Αριθμητικό προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία για το έδαφος και με στοιχεία κελύφους για τον αγωγό (Vazouras et al. 2010).

Figure 2.7: Numerical model with finite elements for the simulation of the ground and shell elements for the simulation of the pipe (Vazouras et al. 2010).

Τα πλήρη 3-Διάστατα προσομοιώματα (με διακριτοποίηση του εδάφους σε τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία -solid elements- και του αγωγού σε στοιχεία κελύφους -shell elements) δίνουν τη δυνατότητα αξιόπιστης απεικόνισης της συμπεριφοράς αγωγών που υπόκεινται σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις, όπως αυτές που προκαλούνται από διάρρηξη ρηγμάτων, και μπορούν να προσφέρουν αναλυτική απεικόνιση της κατάστασης του τοιχώματος του αγωγού. Αν και η συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτελεί την πλέον συστηματική προσομοίωση, έχει τεράστιο υπολογιστικό κόστος, ενώ απαιτείται η αναλυτική προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους και του χάλυβα, της ολίσθησης στη διεπιφάνεια εδάφους και αγωγού, και της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών μεταξύ του φυσικού εδάφους και της επίχωσης.

Η προσομοίωση του αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους και του εδάφους με μη-γραμμικά ελατήρια Winkler προσαρμοσμένα περιμετρικά στον αγωγό αποτελεί πολύ ακριβή, αξιόπιστη και ελεγχόμενη επίλυση του προβλήματος, με αρκετά μικρότερο υπολογιστικό κόστος από την προηγούμενη. Πέραν των τάσεων και παραμορφώσεων στον αγωγό λόγω επιμήκυνσης, κάμψης και στροφής με βάση αυτή τη μεθοδολογία μπορούν έμμεσα να προβλεφθούν και φαινόμενα τοπικού λυγισμού του κελύφους συγκρίνοντας τις υπολογιζόμενες παραμορφώσεις στα σημεία αριθμητικής ολοκλήρωσης των στοιχείων δοκού με τα κανονιστικά όρια.



Σχήμα 2.8: Υβριδικό προσομοίωμα με ελατήρια για την προσομοίωση του εδάφους και ταυτόχρονη χρήση στοιχείων δοκού και κελύφους (Koumoussis et al 2002, Karamitros et al. 2007, Gantes et al. 2008) για την προσομοίωση του αγωγού.

Figure 2.8: Hybrid model with springs for the simulation of the ground and use of both beam and shell elements (Koumoussis et al 2002, Karamitros et al. 2007, Gantes et al. 2008) for the simulation of the pipe.

Από τη μακρά εμπειρία της ερευνητικής ομάδας σε 3-Δ αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει όμως ότι και τα απλούστερα 3-Διάστατα προσομοιώματα, με στοιχεία δοκού ή στοιχεία σωλήνα και ελαστοπλαστικά εδαφικά ελατήρια Winkler, έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν με ακρίβεια τη γενική συμπεριφορά και τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον αγωγό (με εξαίρεση την άμεση πρόβλεψη φαινομένων τοπικού λυγισμού), ενώ το υπολογιστικό κόστος είναι σημαντικά μικρότερο από τις δύο προηγούμενες μεθοδολογίες. Σε αντίστοιχα συμπεράσματα έχουν καταλήξει πρόσφατα και άλλοι ερευνητές συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των επιλύσεων μεταξύ των διάφορων τρόπων προσομοίωσης του αγωγού και του

εδάφους, τόσο για ρήγματα επίπεδης μετακίνησης όσο και για ορθά ρήγματα (Xie 2008, Xie et al. 2011 & 2013).

Συνεπώς, για τις ανάγκες του συγκεκριμένου Παραδοτέου, οι παραμετρικές αναλύσεις για την προκαταρκτική αριθμητική διερεύνηση της ευεργετικής επιρροής των εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό θα πραγματοποιηθούν με τη μέθοδο δοκού (ή σωλήνα) επί ελατηριωτού εδάφους, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο ακόλουθο κεφάλαιο. Ταυτόχρονα, προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις αναλύσεις αγωγών χωρίς περιβάλλον έδαφος με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων θα πραγματοποιηθούν για να αναδείξουν τον τοπικό λυγισμό του τοιχώματος του αγωγού, ως παράμετρο καθορισμού των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης εύκαμπτων κόμβων.

3

Αριθμητική Μεθοδολογία

3.1 Εισαγωγή

Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA (2006). Ειδικότερα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μη-γραμμικότητα του προβλήματος, πραγματοποιήθηκαν μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού, ώστε να ληφθούν υπόψη αφενός φαινόμενα 2^{ας} τάξεως κατά την ανάλυση και αφετέρου η μη-γραμμικότητα του χάλυβα του αγωγού και η μη-γραμμικότητα του εδαφικού υλικού που εισάγεται μέσω του διαγραμμικού νόμου δύναμης – μετακίνησης των εδαφικών ελατηρίων.

3.2 Προσομοίωμα αγωγού με μισή διάρρηξη ρήγματος

3.2.1 Γενικά

Οι αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο δοκού επί ελατηριωτού εδάφους που παρουσιάζονται στην παρούσα Τεχνική Έκθεση πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να αξιολογηθεί προκαταρκτικά η ευεργετική επιρροή χρήσης εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό μαζί με μία προκαταρκτική επιλογή εναλλακτικών λύσεων χωροθέτησης των εύκαμπτων κόμβων.

Επιλέγεται αγωγός μήκους $L=7.20$ m με διατομή διαμέτρου $D=114.3$ mm και πάχος τοιχώματος $t=3$ mm. Ο αγωγός προσομοιώνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (pipe finite elements) τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων τόσο κατά μήκος του αγωγού, όσο και επί της διατομής. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 360 πεπερασμένα στοιχεία δοκού, καθώς ο φορέας διακριτοποιήθηκε ανά 0.02m, κατόπιν ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης.

Ο υπό μελέτη αγωγός είναι από χάλυβα ποιότητας S355 με χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa, λόγος Poisson $\nu=0.30$, τάση διαρροής $f_y=355$ MPa, τάση θραύσης $f_u=510$ MPa και ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης $\epsilon_u=22\%$.

Ο υπό μελέτη αγωγός αποτελεί το μισό πρόβλημα της διέλευσης αγωγού από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Προκειμένου να δοθεί έμφαση στις καμπτικές παραμορφώσεις στο σημείο τομής του αγωγού με το ρήγμα, το άκρο του αγωγού θεωρήθηκε ελεύθερο και όχι με κυλιόμενη πάκτωση, προκειμένου να μειωθούν οι αξονικές

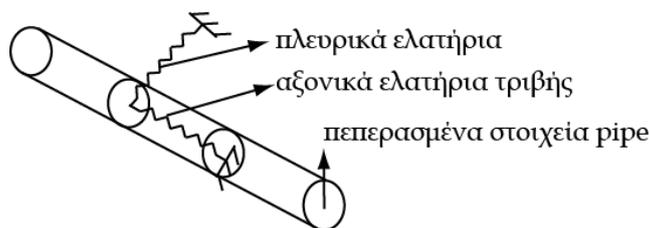
παραμορφώσεις οι οποίες δρουν ευεργετικά στις κρίσιμες θλιπτικές παραμορφώσεις που επιβάλλονται λόγω κάμψης. Έτσι, το στατικό προσομοίωμα του αγωγού είναι αυτό του προβόλου. Στο ελεύθερο άκρο του αγωγού ασκείται η μισή μετακίνηση του ρήγματος που ισούται με $2D=228.6$ mm, η οποία επιβάλλεται ως στατική μετατόπιση σε βήματα κατά τη μη-γραμμική ανάλυση. Το άλλο άκρο του αγωγού είναι πακτωμένο καθώς βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το ρήγμα και αφενός η συνοριακή συνθήκη δεν επηρεάζει την απόκριση του αγωγού, αφετέρου τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην πάκτωση είναι πολύ μικρά.

3.2.2 Ελατήρια προσομοίωσης εδάφους

Για τις προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις, ο αγωγός θεωρείται ότι τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε βάθος 1.00 m. Το υλικό επίχωσης θεωρείται ότι βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον αγωγό και ότι αποτελείται από λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμο τοποθετημένη σε χαλαρή απόθεση (χωρίς συμπίεση) με τις ακόλουθες εδαφικές ιδιότητες:

Φαινόμενο βάρος:	$\gamma = 18$ kN/m ³
Εσωτερική γωνία τριβής:	$\phi = 36$ deg
Γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους:	$\delta = 24$ deg
Συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών:	$K_o = 0.50$

Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού προσομοιώνεται μέσω δύο ελαστοπλαστικών ελατηρίων ανά διατομή: ένα στην αξονική και ένα στην οριζόντια εγκάρσια διεύθυνση (Σχήμα 3.1), ενώ αγνοούνται τα ελατήρια στην κατακόρυφη εγκάρσια διεύθυνση, δεδομένου ότι προσομοιώνεται ρήγμα οριζόντιας διάρρηξης και κατά συνέπεια όλες οι μετακινήσεις εντοπίζονται στο οριζόντιο επίπεδο. Τα αξονικά και οριζόντια εγκάρσια ελατήρια έχουν διγραμμικό νόμο υλικού με ίδιες ιδιότητες σε θλίψη και εφελκυσμό. Τέλος, τα εδαφικά ελατήρια συνδέουν τους κόμβους του αγωγού με το "ground" του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο θεωρείται ακλόνητο.



Σχήμα 3.1: Σκαρίφημα αριθμητικής προσομοίωσης μισή διάρρηξης ρήγματος.

Figure 3.1: Sketch of numerical simulation model of half fault movement.

Τα οριακά φορτία και οι μετατοπίσεις διαρροής των ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις μισής διάρρηξης ρήγματος.

Table 3.1: Characteristics of the soil springs used for the numerical analyses of half fault movement.

Εξωτ. διάμετρος σωλήνα, D (mm)	114.3
<u>ΑΞΟΝΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ</u>	
Οριακό φορτίο, t_u (kN/m)	2.28
Μετατόπιση διαρροής, x_u (mm)	3.0
<u>ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ</u>	
Οριακό φορτίο, p_u (kN/m)	23.05 ($N_{qh}=10.6$)
Μετατόπιση διαρροής, y_u (mm)	20.3

3.3 Προσομοίωμα αγωγού με πλήρη διάρρηξη ρήγματος

3.3.1 Γενικά

Οι αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο δοκού επί ελατηριωτού εδάφους που παρουσιάζονται στην παρούσα Τεχνική Έκθεση πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να αξιολογηθεί προκαταρκτικά η ευεργετική επιρροή χρήσης εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό μαζί με μία προκαταρκτική επιλογή εναλλακτικών λύσεων χωροθέτησης των εύκαμπτων κόμβων.

Επιλέγεται αγωγός μήκους $L=1000$ m με διατομή διαμέτρου $D=914.40$ mm και πάχος τοιχώματος $t=11.90$ mm. Η συγκεκριμένη εμπορική διατομή (36 in) είναι τυπική για αγωγούς υψηλής πίεσης μεταφοράς φυσικού αερίου. Ο αγωγός προσομοιώνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία (pipe finite elements) τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων τόσο κατά μήκος του αγωγού, όσο και επί της διατομής. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 2000 πεπερασμένα στοιχεία δοκού, καθώς ο φορέας διακριτοποιήθηκε ανά 0.50m, κατόπιν ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης.

Ο υπό μελέτη αγωγός είναι από χάλυβα ποιότητας API5L-X65 με χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa, λόγος Poisson $\nu=0.30$, τάση διαρροής $f_y=448.50$ MPa, τάση θραύσης $f_u=531.00$ MPa και ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης $\epsilon_u=4\%$.

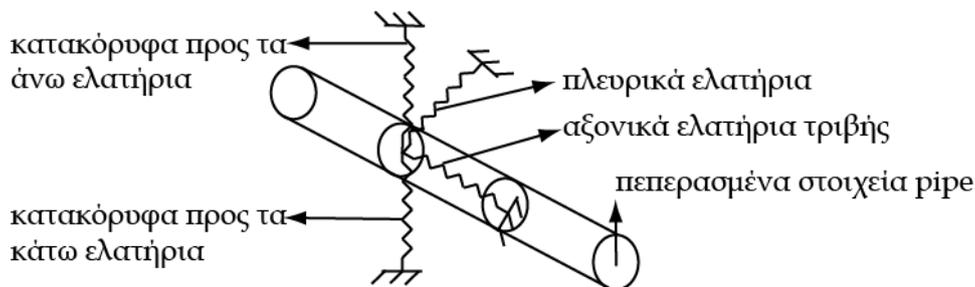
Ο υπό μελέτη αγωγός αποτελεί το πλήρες πρόβλημα της διέλευσης αγωγού από ρήγμα. Χάριν απλότητας τα ρήγματα θεωρούνται επίπεδα με γωνία βύθισης 90° και ο αγωγός τέμνει το επίπεδο του ρήγματος κάθετα. Έτσι, στην περίπτωση του κανονικού και του ανάστροφου ρήγματος, το τέμαχος κινείται κατακόρυφα κατά 1.00 m, ενώ στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης το τέμαχος κινείται οριζόντια κατά 1.00 m. Σε όλες τις περιπτώσεις ρηγμάτων που μελετώνται η μετακίνηση του ρήγματος επιβάλλεται ως στατική μετατόπιση σε βήματα κατά τη μη γραμμική ανάλυση. Σημειώνεται ότι το μήκος προσομοίωσης του αγωγού έχει επιλεγεί ώστε στα άκρα να μην αναπτύσσεται ένταση λόγω της ενεργοποίησης του ρήγματος και να θεωρούνται αυτά ως σημεία αγκύρωσης.

3.3.2 Ελατήρια προσομοίωσης εδάφους

Για τις προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις, ο αγωγός θεωρείται ότι τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε βάθος 1.30 m. Το υλικό επίχωσης θεωρείται ότι βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον αγωγό και ότι αποτελείται από λεπτόκοκκη χαλαζιακή άμμο τοποθετημένη σε χαλαρή απόθεση (χωρίς συμπίεση) με τις ακόλουθες εδαφικές ιδιότητες:

Φαινόμενο βάρος:	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
Εσωτερική γωνία τριβής:	$\phi = 36 \text{ deg}$
Γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους:	$\delta = 24 \text{ deg}$
Συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών:	$K_0 = 0.50$

Η αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού προσομοιώνεται μέσω τεσσάρων ελαστοπλαστικών ελατηρίων ανά διατομή: ένα στην αξονική, ένα στην οριζόντια εγκάρσια διεύθυνση και δύο στην κατακόρυφη διεύθυνση (Σχήμα 3.2). Τα αξονικά και οριζόντια εγκάρσια ελατήρια έχουν διγραμμικό νόμο υλικού με ίδιες ιδιότητες σε θλίψη και εφελκυσμό, ενώ τα κατακόρυφα ελατήρια έχουν διγραμμικό νόμο υλικού με μηδενική εφελκυστική αντοχή. Τέλος, τα εδαφικά ελατήρια συνδέουν τους κόμβους του αγωγού με το "ground" του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο θεωρείται ακλόνητο.



Σχήμα 3.2: Σκαρίφημα αριθμητικής προσομοίωσης πλήρους διάρρηξης ρήγματος.

Figure 3.2: Sketch of numerical simulation model of full fault movement.

Τα οριακά φορτία και οι μετατοπίσεις διαρροής των ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις πλήρους διάρρηξης ρήγματος.

Table 3.2: Characteristics of the soil springs used for the numerical analyses of full fault movement.

Εξωτ. διάμετρος σωλήνα, D (mm)	914.4
Αξονικά ελατήρια	
Οριακό φορτίο, t_u (kN/m)	40.72
Μετατόπιση διαρροής, x_u (mm)	5.00
Εγκάρσια ελατήρια	
Οριακό φορτίο, p_u (kN/m)	23.05 ($N_{qt}=11.072$)
Μετατόπιση διαρροής, y_u (mm)	23.03
Κατακόρυφα προς τα άνω ελατήρια	
Οριακό φορτίο, Q_u (kN/m)	45.47 ($(N_{qt}=1.572)$)
Μετατόπιση διαρροής, Δ_{qu} (mm)	2.30
Κατακόρυφα προς τα κάτω ελατήρια	
Οριακό φορτίο, Q_d (kN/m)	1494.61 ($N_c=50.86, N_q=37.75, N_\gamma=53.52$)
Μετατόπιση διαρροής, Δ_{qd} (mm)	91.44

3.4 Προσομοίωση ελατηριωτού εδάφους

3.4.1 Αξονικά ελατήρια

Οι οριακές αξονικές δυνάμεις των ελατηρίων αντιστοιχούν στην τριβή που ασκείται στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια κατά μήκος του αγωγού, και υπολογίζονται με βάση θεωρίες ανάλογες προς αυτές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της μεταφοράς φορτίων στις αξονικά φορτιζόμενες διεπιφάνειες πασσάλου-εδάφους. Για τις άμμους και άλλα μη συνεκτικά εδάφη (π.χ. αμμοχάλικο), οι εν λόγω δυνάμεις λαμβάνονται μετά την ολοκλήρωση των διατμητικών τάσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας αγωγού - εδάφους. Έτσι, για έναν πλήρως θαμμένο αγωγό η μέγιστη αξονική αντίσταση t_u ανά μονάδα μήκους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$t_u = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot (1 + K_o) \cdot \tan \delta \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.1)$$

όπου, K_o = συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών

H = απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού

D = εξωτερική διάμετρος αγωγού

γ = υπό άνωση ειδικό βάρος επίχωσης

δ = γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, η γωνία τριβής δ είναι ίση με το 50÷100% της γωνίας τριβής φ της επίχωσης. Για τα οριζόντια ελατήρια της αριθμητικής προσομοίωσης χρησιμοποιείται μία μέση τιμή γωνίας $\delta=2/3\varphi$.

Η μέγιστη αξονική αντίσταση επιτυγχάνεται αρχικά σε μία σχετική μετατόπιση x_u της τάξης των 2.5 έως 5.0 mm (0.1 έως 0.2 in), για πυκνή έως χαλαρή άμμο αντίστοιχα (Singhal, 1980).

3.4.2 Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια

Τα ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος σε οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Κατά συνέπεια, οι μηχανισμοί της αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού είναι παρόμοιοι με εκείνους των κατακόρυφων πλακών αγκύρωσης ή των θεμελίων που κινούνται οριζόντια σχετικά με το περιβάλλον έδαφος, ενεργοποιώντας έτσι ένα μηχανισμό παθητικής ώθησης γαιών.

Για τα μη συνεκτικά εδάφη, η σχέση μεταξύ της δύναμης p ανά μονάδα μήκους του αγωγού και της οριζόντιας μετατόπισης y , εκφράζεται από μια υπερβολική σχέση της μορφής (Trautmann and O'Rourke, 1983):

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.2)$$

$$\text{όπου, } A = 0.15 y_u / p_u$$

$$B = 0.85 / p_u$$

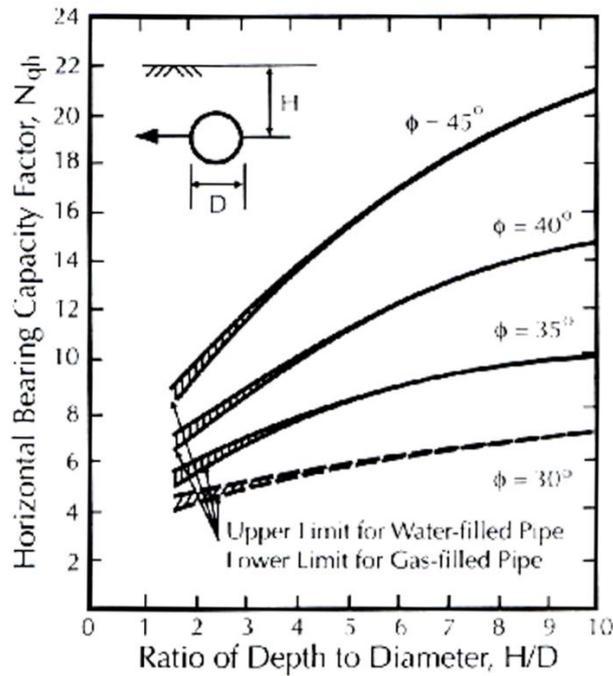
$$p_u = \gamma H N_{qh} D$$

N_{qh} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται συντηρητικά από το Σχήμα 3.2 (Trautmann & O'Rourke, 1983).

$$y_u = 0.07 \text{ to } 0.10 (H+D/2) \quad \text{για χαλαρή άμμο ή}$$

$$y_u = 0.02 \text{ to } 0.03 (H+D/2) \quad \text{για πυκνή άμμο}$$

Στην περίπτωση προσάρτησης δι-γραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξίσωση 3.2 για $p=0.5p_u$ όπως αυτή που κάνουμε στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου, οι προηγούμενες τιμές του y_u θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.26.



Σχήμα 3.2: Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τους Trautmann & O'Rourke (1983).

Figure 3.2: Lateral bearing capacity coefficient after Trautmann & O'Rourke (1983).

3.4.3 Κατακόρυφα προς τα άνω ελατήρια

Τα ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος στην προς τα άνω κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος. Ο υπολογισμός των ελατηρίων αυτών βασίζεται σε αποτελέσματα πειραμάτων μικρής κλίμακας και σε θεωρητικά μοντέλα. Για αυτό, ο λόγος του βάθους ταφής προς τη διάμετρο του αγωγού (H/D) στο εύρος εφαρμογής των σχέσεων.

Έτσι, η μέγιστη δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$Q_u = N_{cv} cD + N_{qv} \bar{\gamma} HD \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.3)$$

όπου, N_{cv} = συντελεστής ανόψωσης για άργυλο (0 για $c=0$)

N_{qv} = συντελεστής ανόψωσης για άμμο (0 για $\phi=0^\circ$)

με,

$$N_{cv} = 2(H/D) \leq 10 \text{ για } (H/D) \leq 10$$

$$N_{qv} = (\phi H/D) \leq N_q$$

Η σχετική μετακίνηση για την ανάπτυξη της δύναμης δίνεται από την Εξίσωση 3.4.

$$\Delta_{qu} = 0.01H \div 0.02H \text{ for dense to loose sands } < 0.1D$$

$$\Delta_{qu} = 0.1H \div 0.2H \text{ for stiff to soft clays } < 0.2D \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση προσάρτησης δι-γραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξίσωση 3.4, όπως αυτή που κάνουμε στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου, οι προηγούμενες τιμές του Δ_{qi} θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.13.

3.4.4 Κατακόρυφα προς τα κάτω ελατήρια

Τα ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος στην προς τα κάτω κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος και σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους.

Έτσι, η μέγιστη δύναμη Q_d δίνεται από την Εξίσωση 3.5 για σχετική μετακίνηση Δ_{qd} :

$$Q_d = N_c c D + N_q \bar{\gamma} H D + N_\gamma \gamma \frac{D^2}{2} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (3.5)$$

όπου, $N_c, N_q, N_\gamma =$ συντελεστές φέρουσας ικανότητας εδάφους

$$N_c = [\cot(\varphi + 0.001)] \left\{ \exp[\pi \tan(\varphi + 0.001)] \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi + 0.001}{2} \right) - 1 \right\}$$

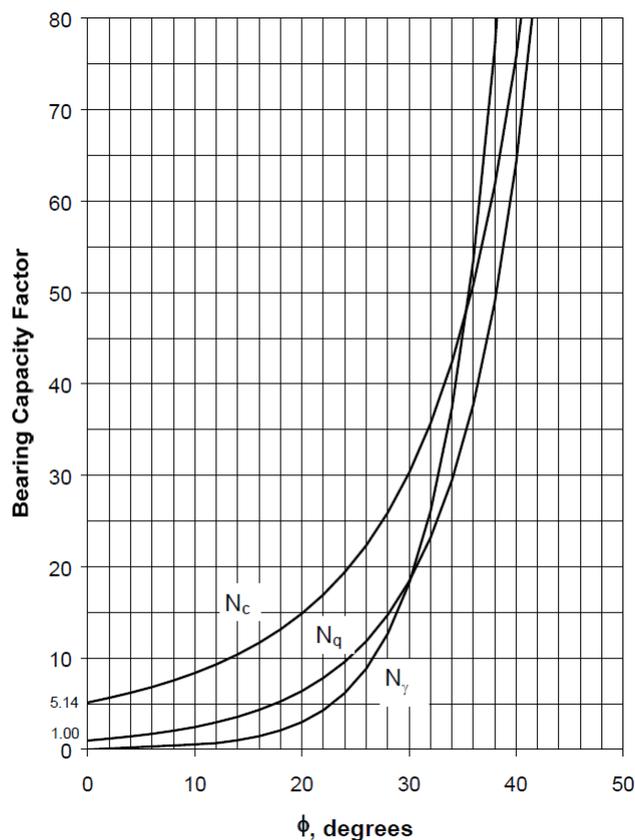
$$N_q = \exp(\pi \tan \varphi) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$N_\gamma = e^{(0.18\varphi - 2.5)} \quad (\text{καμπύλη με προσαρμογή στις τιμές του Σχήματος 3.3}).$$

$$\Delta_{qd} = 0.1D \quad \text{για μη συνεκτικά εδάφη}$$

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

Στην περίπτωση προσάρτησης δι-γραμμικής ελαστοπλαστικής σχέσης στην Εξίσωση 3.5, όπως αυτή που κάνουμε στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου, οι προηγούμενες τιμές του Δ_{qd} θα πρέπει να πολλαπλασιασθούν επί 0.13.



Σχήμα 3.3: Συντελεστής φέρουσας ικανότητας (N_c , N_q , N_γ).

Figure 3.3: Bearing capacity factors (N_c , N_q , N_γ).

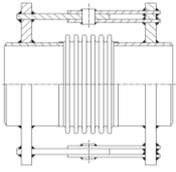
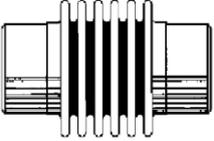
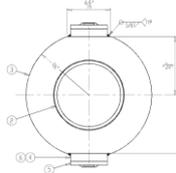
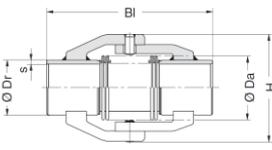
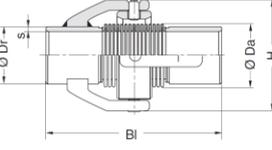
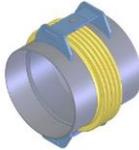
3.5 Προσομοίωση εύκαμπτων κόμβων

Όπως παρουσιάστηκε εκτενώς στο παραδοτέο 7.1 της Ε.Ε. 7, οι εμπορικά διαθέσιμοι εύκαμπτοι κόμβοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι τύπου “Bellows”. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κόμβων από τις προσφορές που συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια της Ε.Ε. 7.

Η αριθμητική προσομοίωση των εύκαμπτων κόμβων δύναται να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: (α) με τρία ελατήρια που προσομοιώνουν αντίστοιχα την αξονική, την εγκάρσια και τη στρωτική δυσκαμψία, όπου δεν απαιτείται η προσομοίωση του μήκους του κόμβου και (β) προσομοίωση του κόμβου ως ένα πεπερασμένο στοιχείο δοκού, του οποίου το μητρώο δυσκαμψίας προκύπτει από τις δυσκαμψίες των ελατηρίων που δίνουν οι κατασκευαστές των κόμβων, ενώ σε αυτήν περίπτωση απαιτείται η προσομοίωση του μήκους του κόμβου (Peng and Peng, 2009).

Πίνακας 3.3: Σύγκριση εμπορικά διαθέσιμων εύκαμπτων κόμβων, σύμφωνα με τις συγκεντρωμένες προσφορές στα πλαίσια του Παραδοτέου 7.1.

Table 3.3: Comparison of commercially available flexible joints, according to the collected offers from Deliverable 7.1.

A/A	ΠΡΟΣΦΟΡΑ	ΣΧΕΔΙΟ ΚΟΜΒΟΥ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ								
			P _{INT} Σχεδιασμού	Εσωτερική διάμετρος	Δυνατότητα στροφής	Στροφικό ελατήριο	Δυνατότητα αξον. μετακ.	Αξονικό ελατήριο	Δυνατότητα εγκ.μετ ακ.	Εγκάρσιο ελατήριο	Περιορισμός Μετακινήσεων
1	HKS-angular-expansion joint		1102.3 psi 76.0 bar 7.60 MPa	4.50 in (114.3 mm)	5°	146Nm/° 1292.2 lbin/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
2	US-BELLOWS Single Expansion joint		150 psi 10.3 bar 1.03 MPa	4.50 in (114.3 mm)	10°	4.7 Nm/° 42 lb in/°	1.05 in	92 kN/m 816 lb/in	0.30 in	161 kN/m 1429 lb/in	Κανένας
3	US-BELLOWS Hinged Expansion joint		150 psi 10.3bar 1.03MP a	4.50 in (114.3 mm)	20°	8.8 Nm/° 79 lb in/°	N/A	104 kN/m 920 lb/in	N/A	303 kN/m 2685 lb/in	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
4	BOA Group BKT-7510 joints		232 psi 16.0bar 1.60MP a	4.50 in (114.3 mm)	13.5°	8.0 Nm/° 71 lb in/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
5	BOA Group BKT-7610 joints		232 psi 16.0bar 1.60MP a	4.50 in (114.3 mm)	13.5°	8.0 Nm/° 71 lb in/°	N/A	N/A	N/A	N/A	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης
6	EAGLE- BURGMANN Hinged Expansion joint		145 psi 10.0 bar 1.00 Mpa	4.50 in (114.3 mm)	20°	4.0 Nm/° 35 lb in/°	N/A	118 kN/m 673.8 lb/in	N/A	584 kN/m 3335 lb/in	Περιορισμός αξονικής και εγκάρσιας μετακίνησης

Στις αριθμητικές αναλύσεις επελέγη ο πρώτος τρόπος προσομοίωσης του εύκαμπτου κόμβου, δηλαδή με δύο μετακινησιακά και ένα στροφικό ελατήριο. Από τους διαθέσιμους εμπορικούς εύκαμπτους κόμβους (bellows) για την εφαρμογή που μελετάται επιλέγεται ο τύπος “Hinged Expansion Joint”. Ο κόμβος αυτού του τύπου έχει πρακτικώς μόνο στροφική δυσκαμψία, ενώ η αξονική και η πλευρική δυσκαμψία είναι δεσμευμένες. Η επιλογή αυτή γίνεται διότι: (α) η εσωτερική πίεση των υπόγειων αγωγών είναι πολύ μεγάλη και παρόλο που οι εμπορικοί κόμβοι μπορούν να αναλάβουν μεγάλες πιέσεις υπάρχει το ενδεχόμενο η εσωτερική πίεση να παραμορφώσει τον κόμβο κατά το στάδιο λειτουργίας. Τούτο διότι οι εμπορικοί

κόμβοι προορίζονται για σωληνώσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων όπου ο αγωγός είναι ελεύθερος να μετακινηθεί, ενώ στην περίπτωση του υπόγειου αγωγού το έδαφος αντιστέκεται στην παραμόρφωση του αγωγού, (β) η αξονική και η πλευρική δυσκαμψία των απλών κόμβων (“Single Expansion Joints”) είναι πάρα πολύ μικρή για να αντισταθεί στις μεγάλες αναμενόμενες μετακινήσεις που θα υποστεί ο υπόγειος αγωγός, λόγω της ενεργοποίησης του ρήγματος από το οποίο διέρχεται. Έτσι, η τιμή της στροφικής δυσκαμψίας λαμβάνεται από πίνακες κατασκευαστών, ενώ η αξονική και η πλευρική δυσκαμψία των κόμβων θεωρούνται άπειρες μέσω δεσμεύσεων στο αριθμητικό προσομοίωμα (“constraint equations”). Η στροφική δυσκαμψία του εύκαμπτου κόμβου στα αριθμητικά προσομοιώματα ισούται με 0.0088 kNm/deg. Σημειώνεται ότι η τιμή της στροφικής δυσκαμψίας των bellows είναι πάρα πολύ μικρή σε σύγκριση με τη στροφική δυσκαμψία της διατομής του αγωγού, γεγονός που σημαίνει ότι ο κόμβος μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως εσωτερική άρθρωση στον αγωγό.

3.6 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων αγωγού χωρίς έδαφος

Οι προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις αγωγού χωρίς περιβάλλον έδαφος που παρουσιάζονται στην παρούσα Τεχνική Έκθεση έχουν ως απώτερο σκοπό να αναδείξουν: (α) την εμφάνιση τοπικού λυγισμού στο συνεχή αγωγό, λόγω των μεγάλων αναπτυσσόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων, (β) την ευεργετική επιρροή της τοποθέτησης εύκαμπτων κόμβων σε όρους αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό, (γ) την προκαταρκτική επιλογή των εναλλακτικών λύσεων για τους κόμβους που θα ελεγχθούν στη συνέχεια πειραματικά. Κατά συνέπεια το αριθμητικό προσομοίωμα βρίσκεται σε συμφωνία με το αντίστοιχο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους και σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι σε αναλογία με τα σχεδιαζόμενα πειράματα. Ως εκ τούτου, ο υπό μελέτη αγωγός έχει μήκος $L=2.70$ m με διατομή διαμέτρου $D=114.3$ mm και πάχους $t=3$ mm.

Ο αγωγός προσομοιώνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell finite elements) τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα «πρόβλεψης» και μελέτης του τοπικού λυγισμού. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 2000 επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, καθώς ο φορέας διακριτοποιήθηκε σε 100 και 20 στοιχεία κατά τη διαμήκη και την περιφερειακή διεύθυνση αντίστοιχα, κατόπιν ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διακριτοποίησης.

Ο υπό μελέτη αγωγός είναι σχετικά μικρής διαμέτρου και για αυτή τη διατομή δε διατίθενται στο εμπόριο αγωγοί με ποιότητα χάλυβα σύμφωνα με το πρότυπο API. Έτσι, προκειμένου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων και των δοκιμών που θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματα τις επόμενης ερευνητικής εργασίας, επελέγη ποιότητα χάλυβα S355 για τον αγωγό με διγραμμικό νόμο υλικού. Ειδικότερα, τα χαρακτηριστικά του χάλυβα S355 είναι: μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa, λόγος Poisson $\nu=0.30$, τάση διαρροής $f_y=355$ MPa, τάση θραύσης $f_u=510$ MPa και ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης $\epsilon_u=22\%$.

Όταν ο υπόγειος αγωγός υπόκειται σε ενεργοποίηση ρήγματος παραμορφώνεται σε σχήμα που προσομοιάζει το "S" θεωρούμενος ότι βρίσκεται αγκυρωμένος σε κάποια αρκετά μεγάλη απόσταση εκατέρωθεν του ρήγματος. Για αυτό το λόγο ο υπό μελέτη αγωγός χωρίς περιβάλλον έδαφος θα θεωρηθεί ως αμφίπακτη δοκός όπου το ένα άκρο είναι κυλιόμενη πάκτωση στην οποία επιβάλλεται μετακίνηση ίση με $2D=228.6$ mm ως στατική φόρτιση σε βήματα κατά τη μη-γραμμική ανάλυση.

4

Προκαταρκτικές Αριθμητικές Αναλύσεις

4.1 Εισαγωγή

Για να μελετηθεί η επιρροή των εύκαμπτων κόμβων στη συμπεριφορά υπόγειων αγωγών που υπόκεινται σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις λόγω διάρρηξης ρηγμάτων, πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις με βάση το προσομοίωμα δοκού επί ελατηριωτού εδάφους που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τόσο για μισή διάρρηξη ρήγματος όπου αμελούνται οι αξονική ένταση του αγωγού, όσο και για πλήρη διάρρηξη. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις συνεχούς αγωγού με προσομοίωμα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων για την ανάδειξη του τοπικού λυγισμού του τοιχώματος του αγωγού και τον προσδιορισμό των θέσεων τοποθέτησης των εύκαμπτων κόμβων. Σημειώνεται ότι το προσομοίωμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με την πειραματική διερεύνηση που θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη Ε.Ε. Τα στοιχεία και τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται διεξοδικά στις επόμενες παραγράφους.

4.2 Αριθμητικές αναλύσεις αγωγού με μισή διάρρηξη ρήγματος

4.2.1 Γενικά

Ο σκοπός των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν ήταν να αναδειχθεί η ευεργετική επίδραση των αρθρωτών κόμβων στην αναπτυσσόμενη ένταση του αγωγού κατά τη διάρρηξη του ρήγματος από το οποίο αυτός διέρχεται. Έτσι, πέραν της εκτίμησης της χρησιμότητάς τους πραγματοποιήθηκε και παραμετρική ανάλυση προκειμένου να εκτιμηθεί η βέλτιστη θέση τους κατά μήκος του αγωγού, ώστε να μην αναιρείται η ευεργετική επίδρασή τους. Επιπρόσθετα, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.5 οι εύκαμπτοι κόμβοι δρουν στην πράξη ως εσωτερικές αρθρώσεις στο χαλύβδινο αγωγό. Για αυτό το λόγο η χωροθέτησή τους κατά μήκος του αγωγού πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μείωση των μεγάλων καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό. Επίσης, η χρησιμότητα των κόμβων σε όρους αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών συγκρίθηκε με τα εντατικά μεγέθη ενός συνεχούς αγωγού χωρίς κόμβους.

Στο πλαίσιο των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν 6 αναλύσεις που παρατίθενται στον Πίνακα 4.1. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μήκος του υπό εξέταση αγωγού είναι $L=7.20$ m, η θέση των κόμβων κατά μήκος του αγωγού δίδεται ως απόσταση (λ_1) από το δεσμευμένο άκρο του, ενώ λ_2 είναι η απόσταση από το ρήγμα. Ως προς την ονοματολογία, οι αναλύσεις του συνεχούς αγωγού συμβολίζονται ως CP (continuous pipeline), ενώ εκείνες του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους ως FJ (flexible joint).

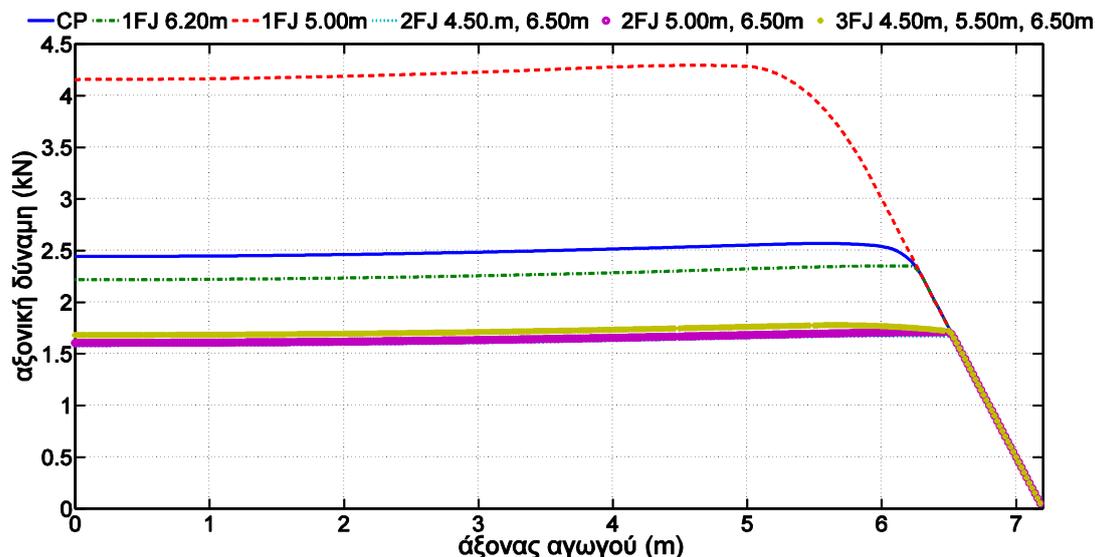
Πίνακας 4.1: Λίστα προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων με μισή διάρρηξη ρήγματος.

Table 4.1: List of preliminary numerical analyses with half fault movement.

A/A	αριθμός κόμβων	λ_1 (m)	λ_2 (m)	όνομα ανάλυσης
1	0	-	-	CP
2	1	6.20	1.00	1FJ 6.20m
3	1	5.00	1.20	1FJ 5.00m
4	2	5.00, 6.50	1.20, 0.70	2FJ 5.00m, 6.50m
5	2	4.50, 6.50	2.70, 0.70	2FJ 4.50m, 6.50m
6	3	4.50, 5.50, 6.50	2.70, 1.70, 0.70	3FJ 4.50m, 5.50m, 6.50m

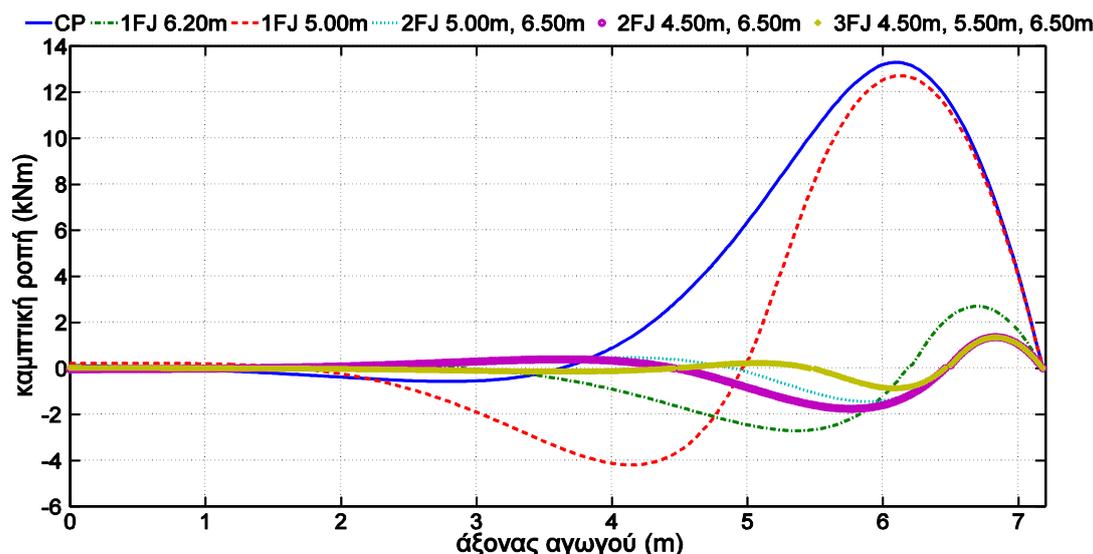
4.2.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 για τις αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις και στο Σχήμα 4.2 για τις αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 4.1: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού.

Figure 4.1: Axial force distribution along pipeline axis.



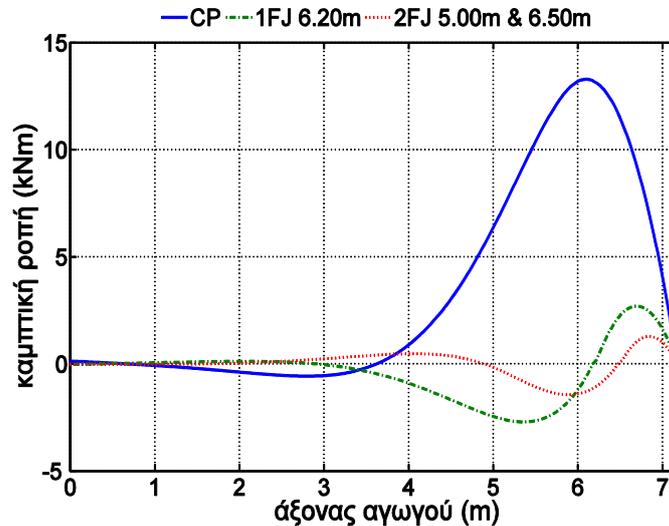
Σχήμα 4.1: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού.

Figure 4.1: Bending moment distribution along pipeline axis.

Τα πρώτα χρήσιμα συμπεράσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.1 και το Σχήμα 4.2 είναι πως η παρουσία εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό που υπόκειται σε διάρρηξη ρήγματος είναι άκρως ευεργετική σε όρους κυρίως αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών και δευτερευόντως αξονικών δυνάμεων, καθώς παρατηρείται μεγάλη μείωση της καμπτικής ροπής. Όμως, τα σχήματα αναδεικνύουν το γεγονός ότι η επιλογή της θέσης του κόμβου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότητά του. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της ανάλυσης 1FJ 5.00m, όπου ο κόμβος τοποθετείται σε απόσταση 5.00m από τη «στήριξη» του αγωγού και οδηγεί σε αύξηση της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης και ταυτόχρονα αμελητέα μείωση της καμπτικής ροπής. Επίσης, στην ανάλυση 3FJ 4.50m, 5.50m, 6.50m που έχουν επιλεγεί τρεις κόμβοι σε αποστάσεις 4.50m, 5.50m και 6.50m αντίστοιχα από τη «στήριξη» του αγωγού προκύπτει ότι η χρήση του κόμβου στη θέση των 4.50m, δηλαδή αρκετά μακριά από τη θέση του ρήγματος, δε συνεισφέρει αρκετά στην «ανακούφιση» των εντατικών μεγεθών και ως εκ τούτου δεν κρίνεται συμφέρουσα η επιλογή του. Τέλος, στην περίπτωση της ανάλυσης 2FJ 4.50m, 6.50m παρατηρείται αμελητέα διαφορά με την ανάλυση 2FJ 5.00m, 6.50m και προκύπτει ως μη συμφέρουσα η τοποθέτηση εύκαμπτου κόμβου στη θέση 4.50m καθώς βρίσκεται αρκετά μακριά από τη διάρρηξη του ρήγματος. Ως εκ τούτου, με βάση τα ανωτέρω οι επιλογές χωροθέτησης των κόμβων στις αναλύσεις 1FJ 5.00m, 2FJ 4.50m, 6.50m και 3FJ 4.50m, 5.50m, 6.50m απορρίπτονται, είτε λόγω της μειωμένης αποτελεσματικότητάς τους είτε λόγω της πλήρους αναποτελεσματικότητάς τους.

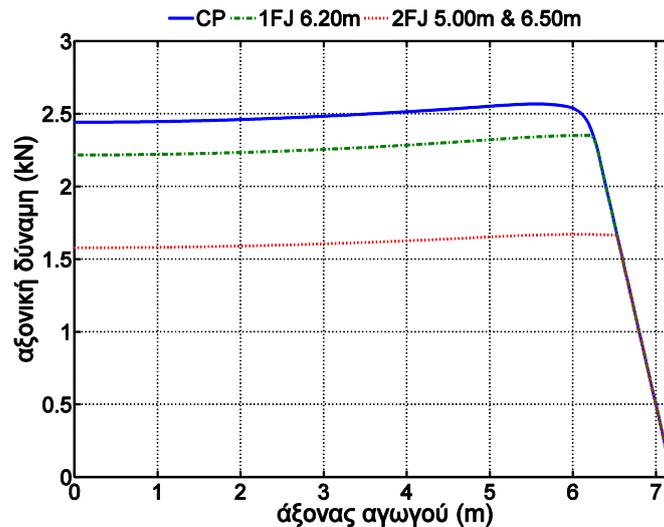
Ακολούθως, τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα αφορούν τις αναλύσεις CP, 1FJ 6.20m και 2FJ 5.00m, 6.50m, όπου στις δύο τελευταίες η χωροθέτηση των κόμβων έχει γίνει με γνώμονα οι θετικές και αρνητικές ροπές εκατέρωθεν των κόμβων να έχουν περίπου την ίδια μέγιστη απόλυτη τιμή. Έτσι, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού, όπου διαπιστώνεται συγκριτικά με το συνεχή αγωγό (CP) μείωση των ροπών κατά 80% στην περίπτωση

1FJ 6.20m και κατά 90% στην περίπτωση 2FJ 5.00m, 6.50m. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού, όπου διαπιστώνεται συγκριτικά με το συνεχή αγωγό (CP) μείωση της αξονικής κατά 9% στην περίπτωση 1FJ 6.20m και κατά 35% στην περίπτωση 2FJ 5.00m, 6.50m.



Σχήμα 4.3: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού.

Figure 4.3: Bending moment distribution along pipeline axis.

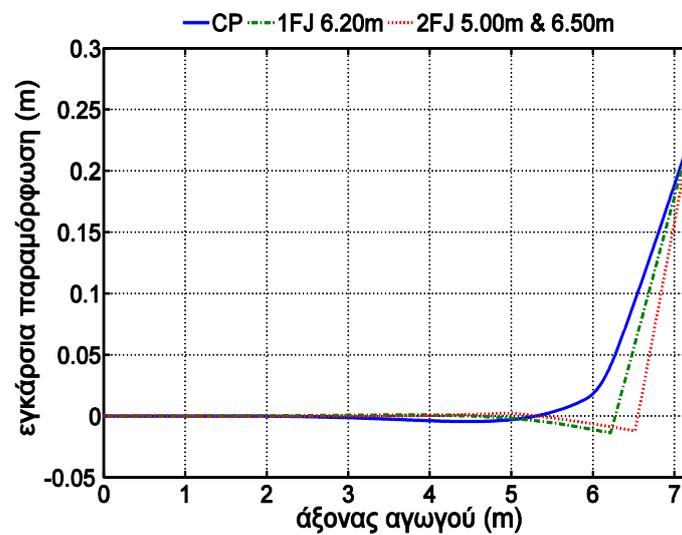


Σχήμα 4.4: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού.

Figure 4.4: Axial force distribution along pipeline axis.

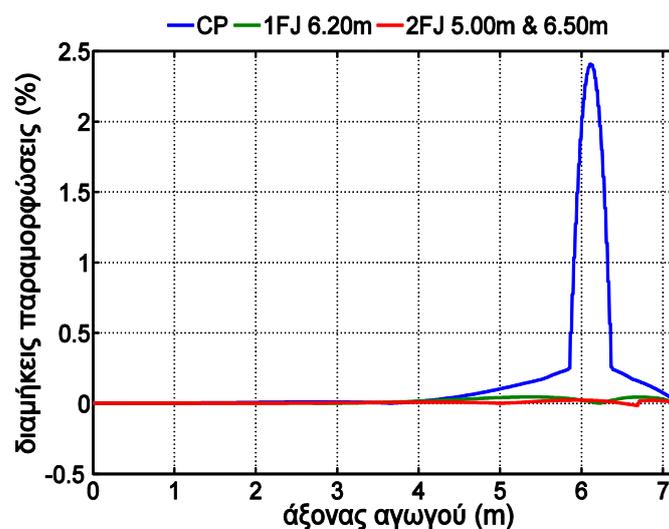
Εν συνεχεία, στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η εγκάρσια παραμόρφωση των αγωγών μετά την επιβολή του συνόλου της διάρρηξης εδάφους. Προκύπτει, λοιπόν, από τα παραμορφωμένα σχήματα των αγωγών ότι πράγματι οι εόκαμπτοι κόμβοι λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις στην κατασκευή, αποσκοπώντας στη συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε αυτούς, ώστε τα χαλύβδινα τμήματα του αγωγού να εμφανίζουν πολύ μικρές διαμήκεις παραμορφώσεις. Τούτο επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 4.6 και τη λεπτομέρεια αυτού στο Σχήμα 4.7 όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις (longitudinal

strains) κατά μήκος των αγωγών. Η μέγιστη διαμήκης παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην περίπτωση του 1FJ 6.20m είναι κατά 98% μικρότερη συγκριτικά με το συνεχή αγωγό, ενώ στην περίπτωση 2FJ 5.00m, 6.50m είναι κατά 99% μικρότερη. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ο σχεδιασμός των υπόγειων αγωγών έναντι μεγάλων μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, όπως είναι η διάρρηξη ρήγματος, γίνεται σε όρους ανηγμένων παραμορφώσεων, προκύπτει η αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Παράλληλα, η μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων που προσφέρουν οι εύκαμπτοι κόμβοι απομακρύνει τον κίνδυνο αστοχίας του υπόγειου αγωγού από τοπικό λυγισμό του τοιχώματος λόγω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων ή θραύση των ραφών συγκόλλησης μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού λόγω μεγάλων εφελκυστικών παραμορφώσεων.



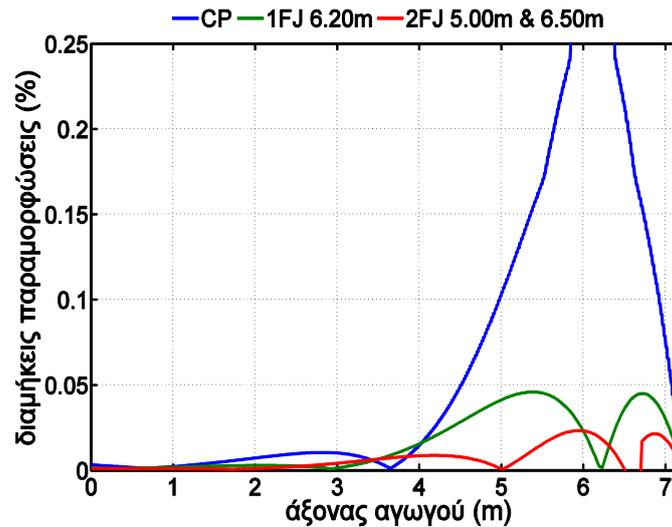
Σχήμα 4.5: Εγκάρσιες μετακινήσεις αγωγών.

Figure 4.5: Pipeline transverse displacements.



Σχήμα 4.6: Κατανομή μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού.

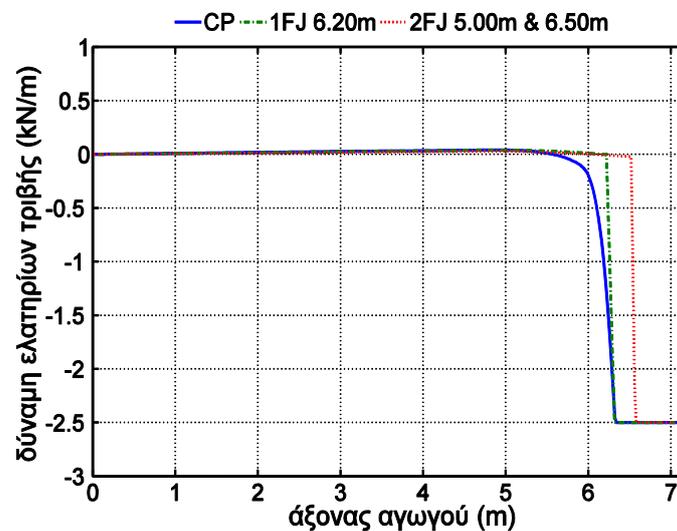
Figure 4.6: Distribution of longitudinal strains along pipeline axis.



Σχήμα 4.7: Λεπτομέρεια κατανομής ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού.

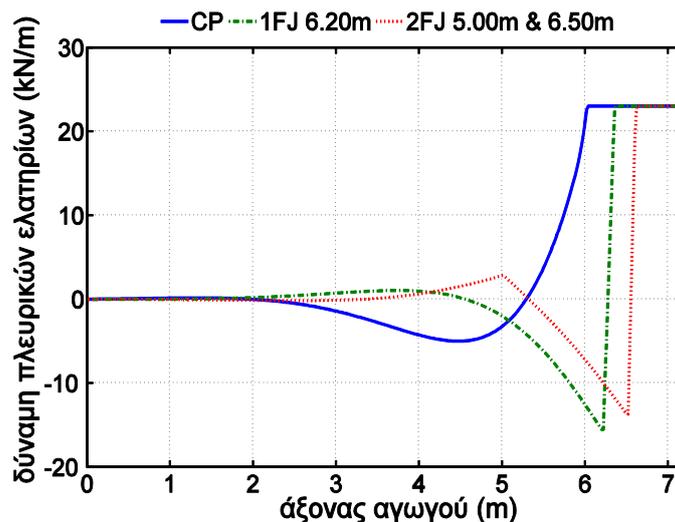
Figure 4.7: Detail of distribution of longitudinal strains along pipeline axis.

Τέλος, στο Σχήμα 4.8 και στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι κατανομές των δυνάμεων αξονικών ελατηρίων τριβής και πλευρικών ελατηρίων αντίστοιχα κατά μήκος του αγωγού. Η παρουσία εύκαμπτων κόμβων στους αγωγούς συγκριτικά με το συνεχή αγωγό δε μεταβάλλει ουσιαστικά την απόκριση του εδάφους, μιας και αυτή εξαρτάται από το μέγεθος της διάρρηξης του ρήγματος.



Σχήμα 4.8: Κατανομή δυνάμεων αξονικών ελατηρίων τριβής κατά μήκος του αγωγού

Figure 4.8: Distribution of axial friction spring forces along pipeline axis



Σχήμα 4.9: Κατανομή δυνάμεων πλευρικών ελατηρίων κατά μήκος του αγωγού.

Figure 4.9: Distribution of lateral spring forces along pipeline axis.

4.2.3 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων που παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2 αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης σε αγωγό που υπόκειται σε διάρρηξη ρήγματος. Ειδικότερα, η καμπτική ροπή και οι διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις εμφανίζουν μείωση της τάξης του 80% τουλάχιστον συγκριτικά με το συνεχή αγωγό. Αναδεικνύεται επίσης η κρισιμότητα της ορθής επιλογής της θέσης των κόμβων, καθώς η εσφαλμένη τοποθέτησή τους σε απόσταση από το ρήγμα δύναται να οδηγήσει σε αντίθετα από τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Τέλος, όσον αφορά την επίδραση των εύκαμπτων κόμβων στην απόκριση του περιβάλλοντος εδάφους, δε διαπιστώνεται κάποια σημαντική διαφορά, καθώς η απόκριση του εδάφους εξαρτάται από το μέγεθος της διάρρηξης του ρήγματος και της εγκάρσιας μετακίνησης που αυτό επιβάλλει στον αγωγό. Έτσι, σε κάθε περίπτωση παρατηρείται διαρροή του περιβάλλοντος εδάφους είτε λόγω της τριβής αγωγού - εδάφους, είτε λόγω της εγκάρσιας μετακίνησης του αγωγού.

4.3 Αριθμητικές αναλύσεις αγωγού με πλήρη διάρρηξη ρήγματος

4.3.1 Γενικά

Ο σκοπός των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν ήταν να αναδειχθεί η ευεργετική επίδραση των αρθρωτών κόμβων στην αναπτυσσόμενη ένταση του αγωγού κατά τη διάρρηξη του ρήγματος από το οποίο αυτός διέρχεται. Ειδικότερα, στις αριθμητικές αναλύσεις με πλήρη διάρρηξη ρήγματος εξετάσθηκε η αποτελεσματικότητα των κόμβων στην περίπτωση που ο υπόγειος αγωγός υπόκειται σε ενεργοποίηση και των τριών τύπων ρήγματος, ήτοι κανονικό, ανάστροφο και οριζόντιας ολίσθησης. Επιπρόσθετα, όπως περιγράφεται

στην ενότητα 3.5 οι εύκαμπτοι κόμβοι δρουν στην πράξη ως εσωτερικές αρθρώσεις στο χαλύβδινο αγωγό. Η επιλογή της χωροθέτησης των κόμβων έγινε με σκοπό τη μείωση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών. Έτσι, τοποθετήθηκαν ένας κόμβος εκατέρωθεν του ρήγματος στη θέση της μέγιστη κατ' απολυτή τιμή καμπτικής ροπής, καθώς και ένας κόμβος στη θέση του ρήγματος. Επίσης, η χρησιμότητα των κόμβων σε όρους αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών συγκρίθηκε με τα εντατικά μεγέθη ενός συνεχούς αγωγού χωρίς κόμβους.

Στο πλαίσιο των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν 6 αναλύσεις που παρατίθενται στον Πίνακα 4.2. Ως προς την ονοματολογία, οι αναλύσεις του συνεχούς αγωγού συμβολίζονται ως CP (continuous pipeline), εκείνες του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους ως FJ (flexible joint), ενώ ο τύπος της διάρρηξης συμβολίζεται με N για κανονικό ρήγμα, με R για ανάστροφο ρήγμα και με SS για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.2 είναι ότι για το ίδιο μέτρο μετακίνηση του ρήγματος, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των εγκάρσιων και των κατακορύφων ελατηρίων, οι μέγιστες ροπές στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης προκύπτουν σε υποτριπλάσια απόσταση από το ρήγμα σε σχέση με το κανονικό και το ανάστροφο ρήγμα. Έτσι, στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης οι θέσεις τοποθέτησης των κόμβων είναι σε πάρα πολύ μικρή απόσταση από τη θεωρητική θέση της διάρρηξης.

Πίνακας 4.2: Λίστα προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων με πλήρη διάρρηξης ρήγματος.

Table 4.2: List of preliminary numerical analyses of full fault movement.

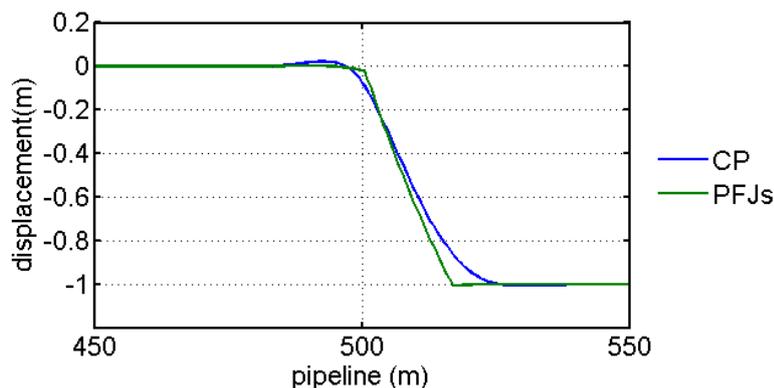
A/A	αριθμός κόμβων	τύπος ρήγματος	απόσταση κόμβων (m)	όνομα ανάλυσης
1	0	κανονικό	-	N-CP
2	3	κανονικό	17	N-3FJ
3	0	ανάστροφο	-	R-CP
4	3	ανάστροφο	18	R-3FJ
5	0	οριζόντιας ολίσθησης	-	SS-CP
6	3	οριζόντιας ολίσθησης	6	SS-3FJ

4.3.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται ακολούθως για κάθε τύπο διάρρηξης ρήγματος.

4.3.2.1 Κανονικό ρήγμα

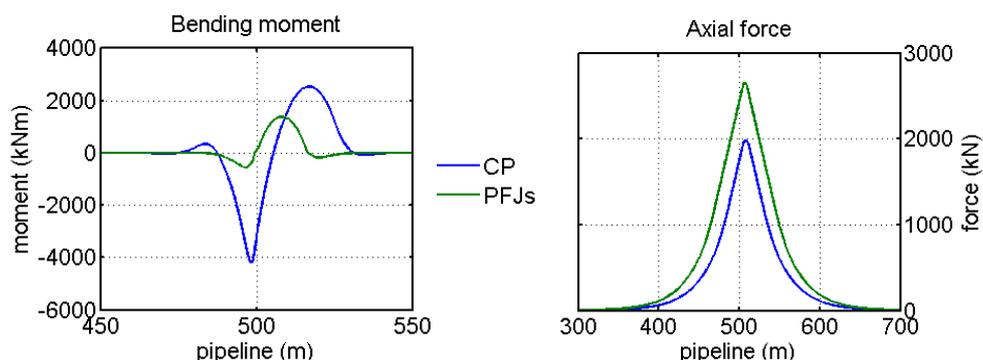
Για την περίπτωση που ο αγωγός υπόκειται σε διάρρηξη κανονικού ρήγματος ίση με 1.00 m το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει την εγκάρσια μετακίνηση του αγωγού. Η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων στο συνεχή αγωγό είναι εμφανές ότι μετατρέπει το συνεχές στατικό σύστημα του αγωγού σε σπονδυλωτό. Έτσι, ενώ η παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού προσομοιάζει το γράμμα "S", η παραμόρφωση του αγωγού με τους εύκαμπτους κόμβους είναι μία τεθλασμένη γραμμή.



Σχήμα 4.10: Εγκάρσια μετακίνηση αγωγού (κανονικό ρήγμα).

Figure 4.10: Pipeline transverse displacement (normal fault).

Ακολουθώς, στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών (bending moment) και των αξονικών δυνάμεων (axial force) κατά μήκος του αγωγού και ειδικότερα στην περιοχή κοντά στο ρήγμα. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι η εισαγωγή των κόμβων στο συνεχή αγωγό οδηγεί σε υποδιπλασιασμό της μέγιστης καμπτικής ροπής, ενώ παράλληλα σε μία αύξηση της αξονικής δύναμης. Τούτο είναι αναμενόμενο δεδομένων των ιδιοτήτων των κόμβων αφενός και αφετέρου δεδομένου του γεγονότος ότι θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία δυσκαμψίας στο σύστημα.

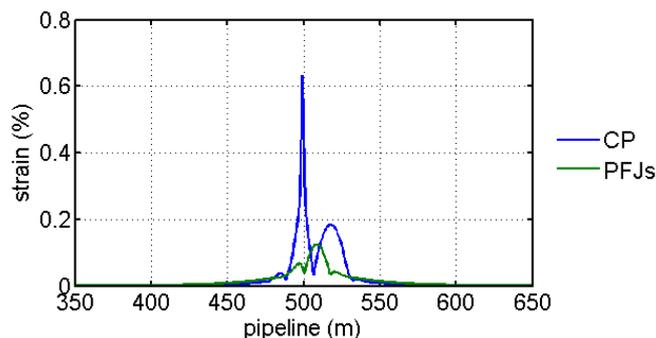


Σχήμα 4.11: Κατανομή καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων αγωγού (κανονικό ρήγμα).

Figure 4.11: Pipeline bending moment and axial force distribution (normal fault).

Το Σχήμα 4.12 παρουσιάζει την κατανομή των μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό οδηγεί σε υποτετραπλασιασμό των αναπτυσσόμενων διαμήκων παραμορφώσεων. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ο σχεδιασμός των υπόγειων αγωγών έναντι μεγάλων μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων, όπως είναι η διάρρηξη ρήγματος, γίνεται σε όρους ανηγμένων παραμορφώσεων, προκύπτει η αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Παράλληλα, η μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων που προσφέρουν οι εύκαμπτοι κόμβοι απομακρύνει τον κίνδυνο αστοχίας του υπόγειου αγωγού από τοπικό λυγισμό του τοιχώματος λόγω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων ή θραύση

των ραφών συγκόλλησης μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού λόγω μεγάλων εφελκυστικών παραμορφώσεων.

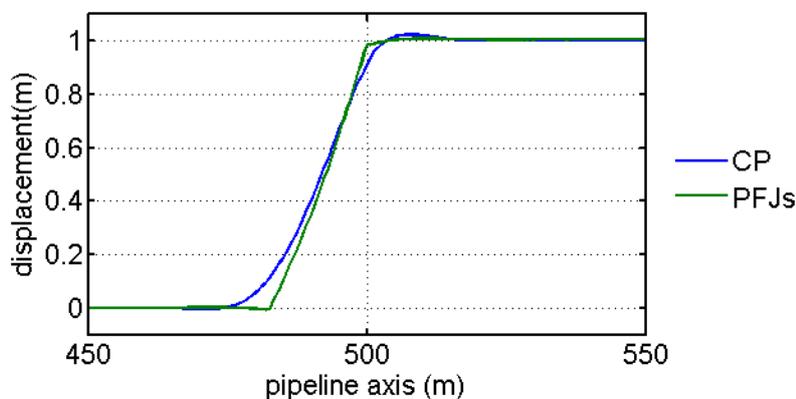


Σχήμα 4.12: Κατανομή μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού (κανονικό ρήγμα).

Figure 4.12: Distribution of maximum longitudinal strains along pipeline (normal fault).

4.3.2.2 Ανάστροφο ρήγμα

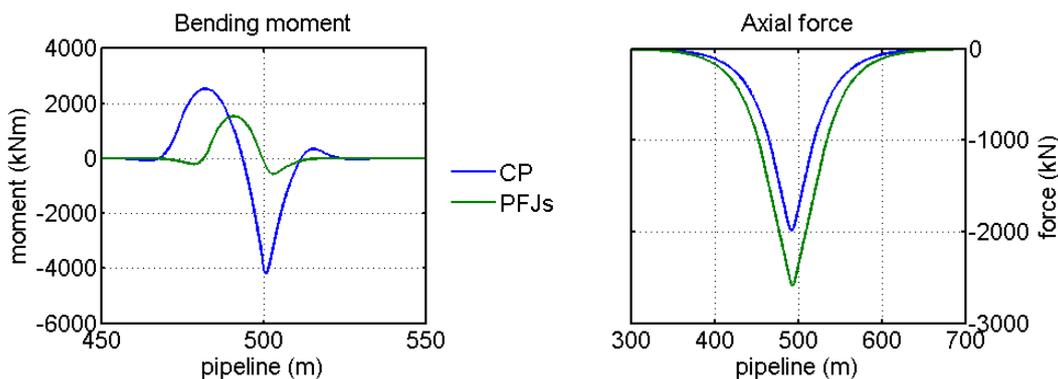
Για την περίπτωση που ο αγωγός υπόκειται σε διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος ίση με 1.00 m το Σχήμα 4.13 παρουσιάζει την εγκάρσια μετακίνηση του αγωγού. Η εισαγωγή των εδάκαμπτων κόμβων στο συνεχή αγωγό είναι εμφανές ότι μετατρέπει το συνεχές στατικό σύστημα του αγωγού σε σπονδυλωτό. Έτσι, ενώ η παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού προσομοιάζει το γράμμα “S”, η παραμόρφωση του αγωγού με τους εδάκαμπτους κόμβους είναι μία τεθλασμένη γραμμή.



Σχήμα 4.13: Εγκάρσια μετακίνηση αγωγού (ανάστροφο ρήγμα).

Figure 4.13: Pipeline transverse displacement (reverse fault).

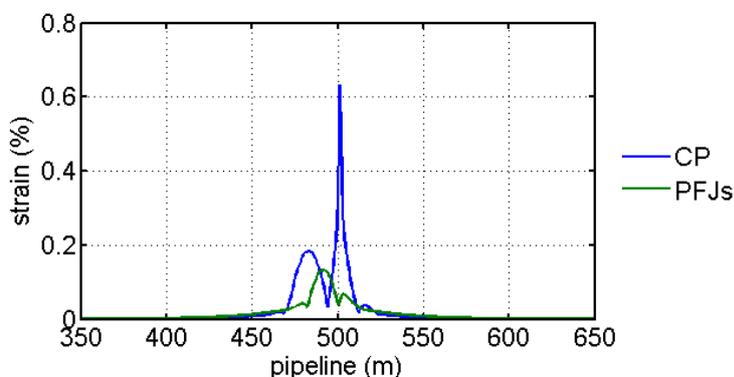
Ακολούθως, στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών (bending moment) και των αξονικών δυνάμεων (axial force) κατά μήκος του αγωγού και ειδικότερα στην περιοχή κοντά στο ρήγμα. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι η εισαγωγή των κόμβων στο συνεχή αγωγό οδηγεί σε υποδιπλασιασμό της μέγιστης καμπτικής ροπής, ενώ παράλληλα σε μία αύξηση της αξονικής δύναμης. Τούτο είναι αναμενόμενο δεδομένων των ιδιοτήτων των κόμβων αφενός και αφετέρου δεδομένου του γεγονότος ότι θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία δυσκαμψίας στο σύστημα.



Σχήμα 4.14: Κατανομή καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων αγωγού (ανάστροφο ρήγμα).

Figure 4.14: Pipeline bending moment and axial force distribution (reverse fault).

Το Σχήμα 4.15 παρουσιάζει την κατανομή των μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό οδηγεί σε υποτετραπλασιασμό των αναπυσομένων διαμήκων παραμορφώσεων. Η μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων που προσφέρουν οι εύκαμπτοι κόμβοι απομακρύνει τον κίνδυνο αστοχίας του υπόγειου αγωγού από τοπικό λυγισμό του τοιχώματος λόγω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων ή θραύση των ραφών συγκόλλησης μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού λόγω μεγάλων εφελκυστικών παραμορφώσεων.

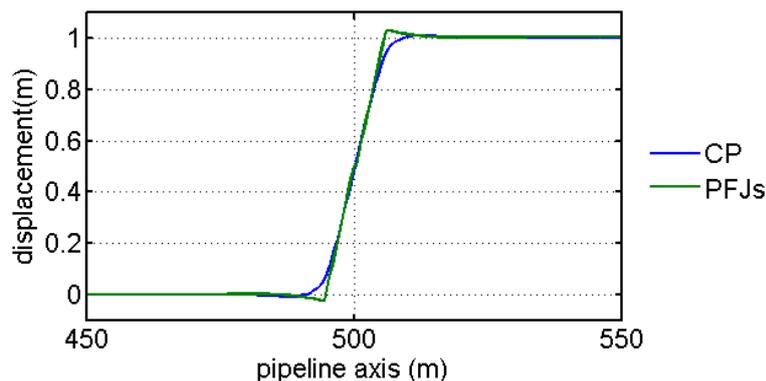


Σχήμα 4.15: Κατανομή μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού (ανάστροφο ρήγμα).

Figure 4.15: Distribution of maximum longitudinal strains along pipeline (reverse fault).

4.3.2.3 Ρήγμα οριζόντιας ολισθησης

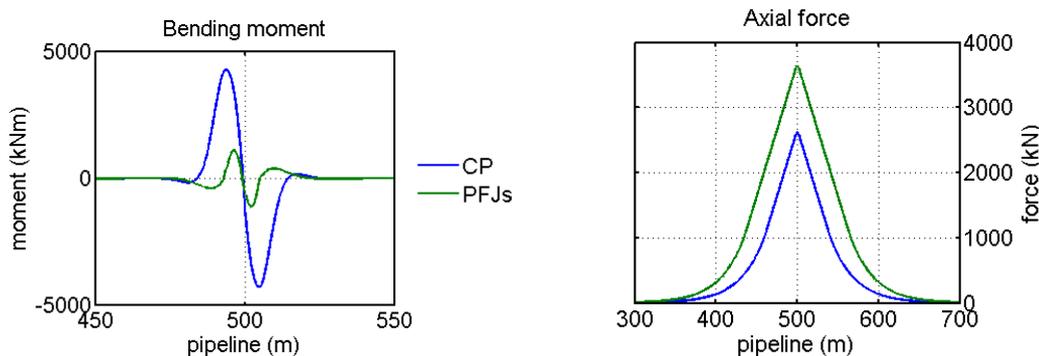
Για την περίπτωση που ο αγωγός υπόκειται σε διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας ολισθησης ίση με 1.00 m το Σχήμα 4.16 παρουσιάζει την εγκάρσια μετακίνηση του αγωγού. Η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων στο συνεχές αγωγό είναι εμφανές ότι μετατρέπει το συνεχές στατικό σύστημα του αγωγού σε σπονδυλωτό. Έτσι, ενώ η παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού προσομοιάζει το γράμμα "S", η παραμόρφωση του αγωγού με τους εύκαμπτους κόμβους είναι μία τεθλασμένη γραμμή.



Σχήμα 4.16: Εγκάρσια μετακίνηση αγωγού (ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης).

Figure 4.16: Pipeline transverse displacement (strike slip fault).

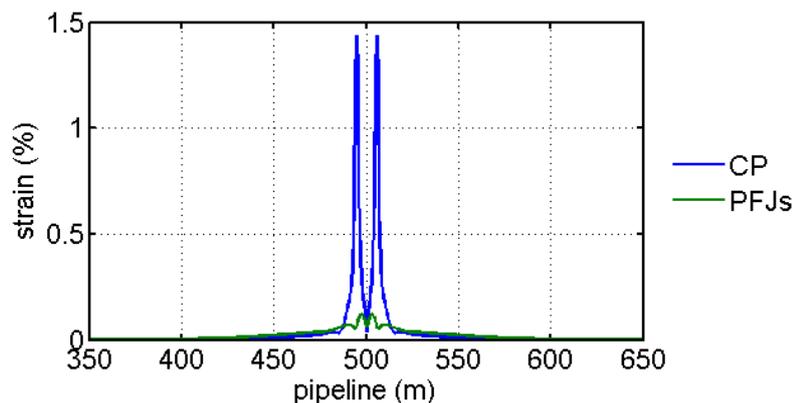
Ακολουθώς, στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών (bending moment) και των αξονικών δυνάμεων (axial force) κατά μήκος του αγωγού και ειδικότερα στην περιοχή κοντά στο ρήγμα. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι η εισαγωγή των κόμβων στο συνεχή αγωγό οδηγεί σε υποδιπλασιασμό της μέγιστης καμπτικής ροπής, ενώ παράλληλα σε μία αύξηση της αξονικής δύναμης. Τούτο είναι αναμενόμενο δεδομένων των ιδιοτήτων των κόμβων αφενός και αφετέρου δεδομένου του γεγονότος ότι θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία δυσκαμψίας στο σύστημα.



Σχήμα 4.17: Κατανομή καμπτικών ροπών και αξονικών δυνάμεων αγωγού (ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης).

Figure 4.17: Pipeline bending moment and axial force distribution (strike slip fault).

Το Σχήμα 4.18 παρουσιάζει την κατανομή των μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων στον αγωγό οδηγεί σε υποδεκαπλασιασμό των αναπτυσσόμενων διαμήκων παραμορφώσεων. Η μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων που προσφέρουν οι εύκαμπτοι κόμβοι απομακρύνει τον κίνδυνο αστοχίας του υπόγειου αγωγού από τοπικό λυγισμό του τοιχώματος λόγω μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων ή θραύση των ραφών συγκόλλησης μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού λόγω μεγάλων εφελκυστικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 4.18: Κατανομή μεγίστων ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού (ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης).

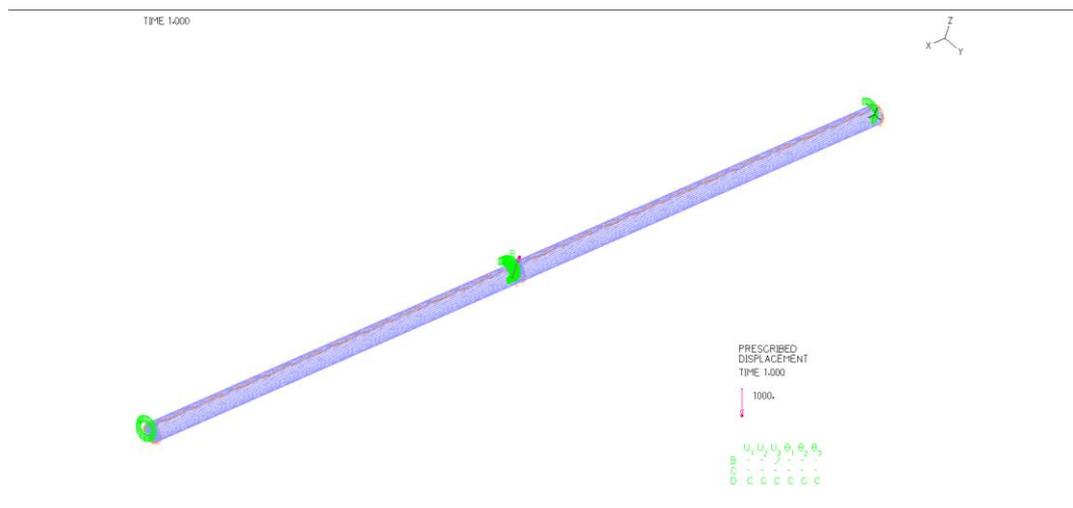
Figure 4.18: Distribution of maximum longitudinal strains along pipeline (strike slip fault).

Επιπρόσθετα, συγκριτικά με την περίπτωση του κανονικού και του ανάστροφου ρήγματος, όπου τα προς τα άνω και προς τα κάτω κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες, στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, όπου η μετακίνηση του αγωγού πραγματοποιείται εντός του οριζοντίου επιπέδου και τα εγκάρσια ελατήρια έχουν τις ίδιες ιδιότητες σε θλίψη και εφελκυσμό, παρατηρείται συμμετρία στην παραμόρφωση του αγωγού, στην αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή και αξονική δύναμη καθώς και στις διαμήκεις παραμορφώσεις ως προς το σημείο διάρρηξης (μέσον αγωγού). Ακόμα, η αποτελεσματικότητα των εόκαμπτων κόμβων στην περίπτωση οριζόντιας διάρρηξης είναι τουλάχιστον διπλάσια συγκριτικά με τις κατακόρυφες διαρρήξεις.

4.4 Αριθμητικές αναλύσεις αγωγού χωρίς έδαφος

4.4.1 Γενικά

Ο σκοπός των προκαταρκτικών αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων ήταν η ανάδειξη του τοπικού λυγισμού του συνεχούς και ο άμεσος προσδιορισμός της θέσης τοποθέτησης των εόκαμπτων κόμβων. Τούτο διότι ο τοπικός λυγισμός, λόγω συγκέντρωσης θλιπτικών παραμορφώσεων, είναι μία από τις κύριες μορφές αστοχίας των υπόγειων αγωγών λόγω ενεργοποίησης ρήγματος. Ο τοπικός λυγισμός του τοιχώματος συνδέεται άμεσα με την οβαλοποίηση της διατομής, την παρεμπόδιση της ροής του καυσίμου και ενδέχεται να οδηγήσει άμεσα σε διαρροή καυσίμου ή/και θραύση του τοιχώματος. Έτσι, στο πλαίσιο της αριθμητικής διερεύνησης του προβλήματος, η χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων είναι επιβεβλημένη για την «πρόβλεψη» του τοπικού λυγισμού. Το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19. Ειδικότερα, πρόκειται για αμφίπακτο αγωγό στο μέσον της οποίας επιβάλλεται μετατόπιση ίση με μία φορά τη διάμετρο του αγωγού. Σκοπός είναι η προσομοίωση του παραμορφωμένου σχήματος του αγωγού λόγω διάρρηξης ρήγματος, ήτοι του χαρακτηριστικού “S”. Στην προκειμένη περίπτωση η αναμενόμενη παραμόρφωση θα είναι δύο κατοπτρικά σχήματα “S”.

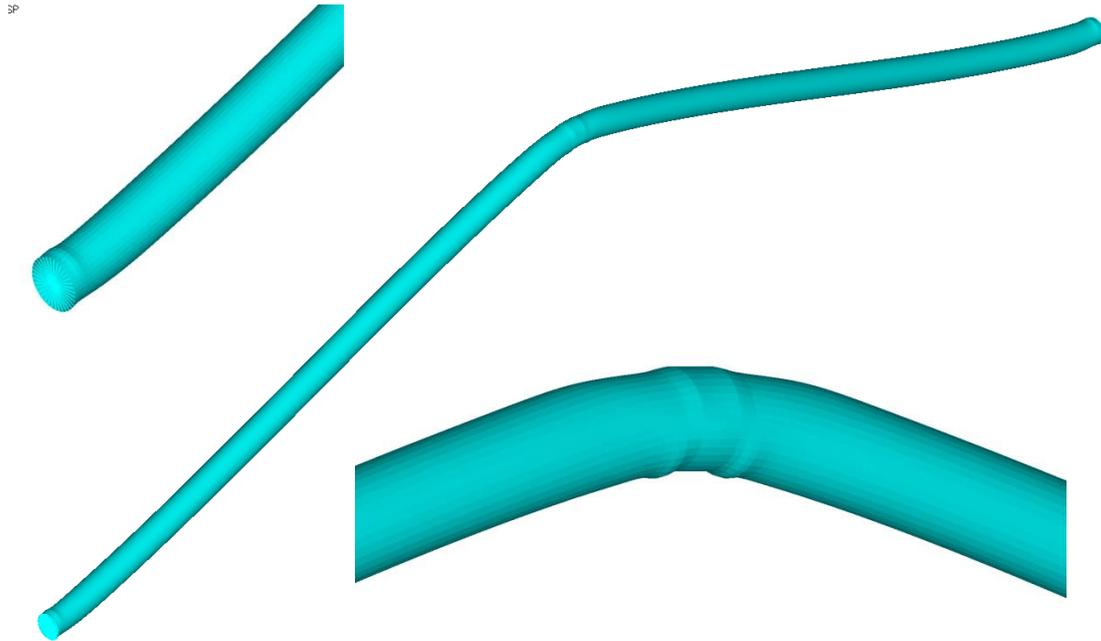


Σχήμα 4.19: Αριθμητικό προσομοίωμα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.

Figure 4.19: Numerical model with shell finite elements.

4.4.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.20 για την παραμόρφωση του φορέα και στο Σχήμα 4.21 για την ανάπτυξη των παραμορφώσεων στο φορέα. Η παραμόρφωση του φορέα αναδεικνύει την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού και τη συγκέντρωση θλιπτικών παραμορφώσεων. Οι θέσεις αυτές ενδείκνυνται για την τοποθέτηση των εύκαμπτων αρθρωτών κόμβων με σκοπό την αποφυγή του λυγισμού και την εν γένει μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στο φορέα. Σημειώνεται ακόμα ότι δεδομένου ότι το στατικό προσομοίωμα του φορέα είναι αμφίπακτη δοκός, στον αγωγό επιβάλλεται εκτός από κάμψη και αξονική ένταση. Έτσι, η εν λόγω προκαταρκτική διερεύνηση βρίσκεται σε συμφωνία με τα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν. Η χρησιμότητά της έγκειται στη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των κόμβων που θα τοποθετηθούν στην πειραματική διερεύνηση, δεδομένου ότι στην πραγματικότητα η διάρρηξη ρήγματος οδηγεί στην ανάπτυξη καμπτικής και αξονικής έντασης στον αγωγό. Εν, τέλει με βάση το προκαταρκτικό αριθμητικό προσομοίωμα επιλέγεται για την πειραματική διερεύνηση η τοποθέτηση τεσσάρων (4) εύκαμπτων κόμβων. Η χωροθέτηση των κόμβων γίνεται στις περιοχές ανάπτυξης μεγάλων διαμήκων παραμορφώσεων, ήτοι κοντά στις ακραίες στηρίξεις του αγωγού και εκατέρωθεν του μέσου, όπου επιβάλλεται η μετακίνηση.



Σχήμα 4.20: Παραμόρφωση αγωγού και ανάπτυξη τοπικού λυγισμού.

Figure 4.20: Pipe deformation and local buckling development.



Σχήμα 4.21: Κατανομή ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων αγωγού.

Figure 4.21: Distributions of pipeline longitudinal strains.

5

Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα

5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης υφιστάμενων μεθόδων αναλυτικής και αριθμητικής προσομοίωσης για να μελετηθεί η απόκριση υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους μεταξύ διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων, σε περιπτώσεις ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων που διασταυρώνονται με τον αγωγό.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι οι υπάρχουσες αναλυτικές μεθοδολογίες δεν προσφέρονται για να χρησιμοποιηθούν στην προκαταρκτική διερεύνηση των απαιτήσεων που πρέπει να πληρούν οι εύκαμπτοι κόμβοι για να έχουν ευεργετική επιρροή στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις του αγωγού. Αντίθετα υπάρχουν διαθέσιμες αριθμητικές μεθοδολογίες που μπορούν επαρκώς να προσομοιώσουν επαρκώς τόσο την απόκριση υπόγειων αγωγών υποκείμενων σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις λόγω διάρρηξης ενεργών ρηγμάτων, όσο και τη συμπεριφορά των διαθέσιμων εμπορικά εύκαμπτων κόμβων.

5.2 Αριθμητικές αναλύσεις για τη μελέτη της επιρροής εύκαμπτων κόμβων στη συμπεριφορά του αγωγού

Οι παραμετρικές αναλύσεις με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της επιρροής των εύκαμπτων κόμβων έγιναν με τη βοήθεια 3-Διάστατων αριθμητικών ελαστοπλαστικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο αγωγός διακριτοποιήθηκε με 2-κομβικά, ισοπαραμετρικά, τρισδιάστατα, ελαστοπλαστικά, ευθύγραμμα πεπερασμένα στοιχεία δοκού (beam elements). Αναλύθηκαν δύο περιπτώσεις:

(α) Αγωγός διαμέτρου 114.3 mm και πάχους τοιχώματος 3 mm υποκείμενος σε μισή διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, δηλαδή το μήκος μέχρι τη διασταύρωση με το ρήγμα, στην οποία θέση επιβάλλεται η «μισή» μετακίνηση λόγω της διάρρηξης του ρήγματος. Η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού προσομοιώνεται μέσω δύο ελαστο-πλαστικών ελατηρίων ανά διατομή: ένα στην αξονική και ένα στην οριζόντια εγκάρσια διεύθυνση του αγωγού. Τα κατακόρυφα εγκάρσια εδαφικά ελατήρια αγνοούνται, εφόσον εξετάζεται ρήγμα οριζόντιας διάρρηξης και οι μετακινήσεις

εντοπίζονται αποκλειστικά στο οριζόντιο επίπεδο. Οι αρθρωτοί εύκαμπτοι κόμβοι προσομοιώθηκαν ως στροφικά ελατήρια με κατάλληλη δυσκαμψία.

(β) Αγωγός διαμέτρου 914.4 mm και πάχους τοιχώματος 11.9 mm υποκείμενος σε διάρρηξη κανονικού, ανάστροφου και ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο και κατακόρυφο, ενώ ο αγωγός τέμνει το ρήγμα κάθετα. Η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού προσομοιώνεται μέσω τεσσάρων ελαστοπλαστικών ελατηρίων ανά διατομή: ένα στην αξονική, ένα στην οριζόντια εγκάρσια διεύθυνση του αγωγού και δύο στην κατακόρυφη διεύθυνση. Οι αρθρωτοί εύκαμπτοι κόμβοι προσομοιώθηκαν ως στροφικά ελατήρια με κατάλληλη δυσκαμψία.

5.3 Αριθμητικές αναλύσεις για τη μελέτη του τοπικού λυγισμού συνεχούς αγωγού

Οι αριθμητικές αναλύσεις για τη μελέτη του τοπικού λυγισμού συνεχούς αγωγού και προσδιορισμού της θέσης τοποθέτησης των εύκαμπτων κόμβων έγινε με τη βοήθεια προσομοιωμάτων επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Ο αγωγός που αναλύθηκε, σε αντιστοιχία με τα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν σε επόμενο στάδιο, έχει εξωτερική διάμετρο $D=114.3$ mm και πάχος τοιχώματος $t=3$ mm. Το στατικό προσομοίωμα του αγωγού είναι αμφίπακτη δοκός, όπου στο μέσον επιβάλλεται μετακίνηση ίση με τη διάμετρο του αγωγού.

5.4 Συμπεράσματα

Με βάση τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώνονται τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα:

1. Η χρήση εύκαμπτων κόμβων, με μικρή στροφική δυσκαμψία, μεταξύ διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων, μπορεί να οδηγήσει σε αισθητή μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων και τάσεων στον αγωγό σε περιπτώσεις ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων που διασταυρώνονται με τον αγωγό.
2. Στις προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις επιβολής μισής διάρρηξης ρήγματος παρατηρείται μείωση κατά 80% περίπου στις αναπτυσσόμενες καμπτικές παραμορφώσεις του αγωγού, με χρήση ενός κόμβου κατάλληλα τοποθετημένου σε κάθε πλευρά του ρήγματος. Η χρήση δύο κόμβων σε κατάλληλες θέσεις σε κάθε πλευρά του ρήγματος μειώνει περαιτέρω σε 90% περίπου τις αναπτυσσόμενες καμπτικές παραμορφώσεις. Αντίθετα, αν τοποθετηθεί ένας κόμβος σχετικά μακριά από τη θέση διασταύρωσης του ρήγματος με τον αγωγό, οι αναπτυσσόμενες καμπτικές παραμορφώσεις μειώνονται ελάχιστα (κατά 4% περίπου), ενώ αυξάνονται παράλληλα οι αξονικές δυνάμεις (κατά 67% περίπου). Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η θέση που θα τοποθετηθούν οι κόμβοι καθώς και ο αριθμός αυτών.

3. Στις προκαταρκτικές αριθμητικές αναλύσεις επιβολής πλήρους διάρρηξης ρήγματος τοποθετούνται ένας κόμβος εκατέρωθεν του ρήγματος και ένας κόμβος στη θέση του ρήγματος. Η επιλογή της χωροθέτησης των κόμβων γίνεται με βάση το σημείο της ανάπτυξης της μέγιστης καμπτικής ροπής στο συνεχή αγωγό. Έτσι, παρατηρείται μείωση 4 φορές στις αναπτυσσόμενες διαμήκεις παραμορφώσεις στην περίπτωση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος, ενώ η μείωση φθάνει τις 10 φορές στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Σε όλες τις περιπτώσεις ρηγμάτων παρατηρείται μείωση της καμπτικής ροπής και μία μικρή αύξηση της αξονικής δύναμης. Επίσης, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο συνεχή αγωγό, άρα και η θέση τοποθέτησης των κόμβων, στην περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης βρίσκεται σε υποτριπλάσια απόσταση από το ρήγμα, συγκριτικά με την περίπτωση του κανονικού και του ανάστροφου ρήγματος.
4. Σημαντικό είναι επίσης το συμπέρασμα ότι, σε αντίθεση με τους κόμβους αξονικής παραμόρφωσης (slip joints) που είχαν μελετήσει οι O'Rourke & Liu (1994), η τοποθέτησή του κόμβου σε λανθασμένη θέση (π.χ. λόγω αβεβαιότητας της ακριβούς θέσης του ρήγματος) δεν οδηγεί σε σημαντικά δυσμενέστερες παραμορφώσεις του αγωγού, γεγονός που θα μπορούσε να είναι αποτρεπτικό για τη χρήση τέτοιων κόμβων στην πράξη.
5. Οι διαμορφωμένες απαιτήσεις για εύκαμπτους κόμβους, στα πλαίσια των σχεδιαζόμενων πειραμάτων της ερευνητικής εργασίας, είναι να έχουν δυνατότητα στροφικής παραμόρφωσης $>11^\circ$. Οι απαιτήσεις για αντοχή σε εσωτερική πίεση δεν είναι επι του παρόντος επιτακτικές (π.χ. αρκεί αντίσταση σε εσωτερική πίεση $>6.0\text{atm}$), δεδομένου ότι τα εν λόγω πειράματα θα πραγματοποιηθούν χωρίς εσωτερική πίεση.
6. Ο συνεχής αγωγός όταν υπόκειται σε σεισμική διάρρηξη αναπτύσσει συνήθως τοπικό λυγισμό. Οι περιοχές ανάπτυξης του τοπικού λυγισμού είναι οι κατάλληλες για την τοποθέτηση των εύκαμπτων κόμβων, προκειμένου να συγκεντρωθούν σε αυτούς οι παραμορφώσεις, όπως προκύπτει και από τις αριθμητικές αναλύσεις της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους, «αφήνοντας» τα χαλύβδινα τμήματα του αγωγού χωρίς ιδιαίτερη ένταση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω βασικά συμπεράσματα προτείνεται να πραγματοποιηθούν τουλάχιστον τρεις ομάδες πειραμάτων για την αποτίμηση της επίδρασης των εύκαμπτων κόμβων στη συμπεριφορά του αγωγού:

- Στην πρώτη ομάδα ο αγωγός θα είναι συνεχής (χωρίς κόμβους) και οι μετρήσεις θα αποτελέσουν τη βάση σύγκρισης και αξιολόγησης των επόμενων πειραμάτων.
- Στη δεύτερη ομάδα θα τοποθετηθούν τέσσερις κόμβοι στις θέσεις ανάπτυξης τοπικού λυγισμού στο συνεχή αγωγό για να διαπιστωθεί και πειραματικά η αποτελεσματικότητά τους.

- Στην τρίτη ομάδα θα γίνει πειραματικός έλεγχος των δυσκαμφιών των αρθρωτών κόμβων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη βαθμονόμηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων

Οι ανωτέρω οδηγίες διαμορφώνουν το γενικό πλαίσιο των πειραματικών επιμέρους εργασιών. Η τελική διαμόρφωση του πειραματικού προγράμματος θα διαμορφωθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ανάλογα με τις δυσκολίες που θα αντιμετωπισθούν και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

ADINA R & D Inc. (2006), "Theory and Modeling Guide. Volume I: ADINA, Report AD 08-7".

Arifin R.B., Shafrizal W.M., Wan B., Yusof M., Zhao P. & Bai Y. (2010), "Seismic analysis for the subsea pipeline system", Proceedings of the ASME 2010 29th international conference on ocean, offshore and arctic engineering, OMAE2010-20671, Shanghai, China.

American Lifeline Alliance -ALA/ASCE- (2001), "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe", ASCE, (with addenda through February 2005) 76p.

American Lifeline Alliance -ALA- (2005), "Design Guidelines for Seismic Resistant Water Pipeline Installations", FEMA, 255p.

Cheuk C.Y., White D.J. & Bolton M.D. (2008), "Uplift Mechanisms of Pipes Buried in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 2, February 1, ASCE.

Daiyan N., Kenny S., Phillips R. & Popescu R. (2010), "Numerical investigation of oblique pipeline/soil interaction in sand", Proceedings of the 8th international pipeline conference, IPC2010-31644. Calgary, Alberta, Canada.

ElHmadi K. & O'Rourke M.J. (1990), "Seismic damage to segmented buried pipelines", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp. 529-539.

Gantes C.J., Bouckovalas G.D. & Koumousis V.K. (2008), "Slope Failure Verification of Buried Steel Pipelines", 10th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation, Athens, Greece, May 27- 31.

Gu X. & Zhang H. (2009), "Research on a-seismatic measures of gas pipeline crossing a fault for strain-based design", Proceedings of the ASME 2009 pressure vessels and piping division conference, PVP2009-77987.

Karamitros D. K., Bouckovalas G. D. & Kouretzis G. P., (2007), "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27, pp. 200-211.

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Kouretzis G.P. & Gkesouli V. (2011), "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, pp. 1452-1464.

Kim J., Lynch J.P., Michalowski R.L., Green R.A., Pour-Ghaz M., Weiss W.J. & Bradshaw A. (2009), "Experimental Study on the Behavior of Segmented Buried Concrete Pipelines Subject to Ground Movements", Proceedings of the SPIE - The International Society of Optical Engineering, Vol. 7294.

Koumoussis V.K., Gantes C.J, Bouckovalas G.D., Dimou C.K. & Lemonis M.E. (2002), "Seismic Design of Thessaloniki-Skopia Oil Pipeline at Locations of Active Faults", 4th Greek National Conference on Steel Structures, Patra, May 24-25 (in Greek).

Kouretzis G.P., Sheng D. & Sloan S.W. (2013), "Sand-pipeline-trench lateral interaction effects for shallow buried pipelines", *Computers and Geotechnics* 54, pp. 53-59.

Liu M., Wang Y.Y. & Yu Z. (2008), "Response of pipelines under fault crossing", *Proceedings of the international offshore and polar engineering conference*, Vancouver, BC, Canada.

Joshi S., Prashant A., Deb A. & Jain S.K. (2011), "Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, pp. 930-940.

Odina L. & Tan R. (2009), "Seismic fault displacement of buried pipelines using continuum finite element methods", *Proceedings of the ASME 2009 28th international conference on ocean, offshore and arctic engineering*, OMAE2009-79739. Honolulu, Hawaii.

O'Rourke M.J. & Nordberg C. (1991), "Analysis Procedures for Buried Pipelines Subject to Longitudinal and Transverse Permanent Ground Deformation", *Proceedings of the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, San Francisco, California, Technical Report NCEER-91-0001, MCEER, Buffalo, New York, pp. 439-453.

O'Rourke M.J. & Ballantyne D. (1992), "Observations on Water System and Pipeline Performance in the Limon Area of Costa Rica Due to the April 22, 1991 Earthquake", Technical Report NCEER-92-0017, MCEER, Buffalo.

O'Rourke M.J. & Liu X. (1994), "Failure Criterion for Buried Pipe subject to Longitudinal PGD: Benchmark Case History", *5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design for Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction*, Technical Report NCEER-94-0026, MCEER, Buffalo, pp. 639-652.

O'Rourke M.J., Liu X.J. & Flores-Berrones, R. (1995), "Steel Pipe Wrinkling Due to Longitudinal Permanent Ground Deformation", *Journal of Transportation Engineering*, September/October, Vol. 121, No. 5, pp. 443-451.

O'Rourke M.J. (2009), "Analytical Fragility Relation for Buried Segmented Pipe", *Proceedings of 2009 TCLEE Conference: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, ASCE, California, pp. 771-780.

O'Rourke M.J. & Liu J.X. (2012), "Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines", *Monograph MCEER-12-MN04*, November 2012.

O'Rourke T.D. & Trautmann C.H. (1981), "Earthquake Ground Rupture Effects on Jointed Pipe", *Proceedings of the Second Specialty Conference of the Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, August, pp. 65-80.

Peng L.C. and Peng T.L. (2009), "Pipe Stress Engineering", ASME Press, New York, USA.

Roudsari T.M., Seif M.A. & Jamshidi K.H. (2013), "Numerical Study of Pipe-Soil Interaction Subjected to Strike-Slip Faulting", ICPTT 2013, ASCE pp. 695-704.

Singhal A. C. (1980). "Strength Characteristics of Buried Jointed Pipelines", report to the Engineering Foundation and ASCE, Grant No. RC-A-77-6A.

Sun S. & Shien L. (1983), "Analysis of Seismic Damage to Buried Pipelines in Tangshan Earthquake", Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, June, pp. 365-367.

Suzuki H. (1988), "Damage to Buried Pipes Caused by Large Ground Displacement", Proceedings of the First Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, Tokyo, Japan, pp. 127-132.

Takada S. (1984), "Model Analysis and Experimental Study on Mechanical Behavior of Buried Ductile Iron Pipelines Subjected to Large Ground Deformations", Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, Vol. VII, pp. 255-262.

Takada S., Liang J-W. & Li T. (1998), "Shell-Mode Response of Buried Pipelines to Large Fault Movements", Journal of Structural Engineering Vol. 44a (March 1998), JSCE, pp. 1637-1646.

Takada S., Hassani N. & Fukuda K. (2001), "A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults", Earthquake Engineering and Structural Dynamics 30, p. 1243-57.

Trautmann C. H. & O'Rourke T.D. (1983), "Behavior of pipe in dry sand under lateral and uplift loading", Geotechnical Engineering Report 83-7, Cornell University.

Vazouras P., Karamanos S.A. & Dakoulas P. (2010), "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30 (11), pp. 1361-76.

Vazouras P., Karamanos S.A. & Dakoulas P. (2012), "Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 41, pp. 164-180.

White D.J., Cheuk C.Y. & Bolton M.D. (2008), "The uplift resistance of pipes and plate anchors buried in sand", Geotechnique 58, No. 10, pp. 771-779.

Xie X. (2008), "Numerical Analysis and Evaluation of Buried Pipeline Response to Earthquake-Induced Ground Fault Rupture", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.

Xie X., Symans M. D., O'Rourke M. J., Abdoun T. H., O'Rourke T. D., Palmer M. C. & Stewart H. E. (2011), "Numerical modeling of buried HDPE Pipelines subjected to strike-slip faulting", Journal of Earthquake Engineering 15, pp. 1273-1296.

Xie X., Symans M.D., O'Rourke M.J., Abdoun T.H., O'Rourke T.D., Palmer M.C. & Stewart H.E. (2013). "Numerical Modeling of Buried HDPE Pipelines Subjected to Normal Faulting: A Case Study", *Earthquake Spectra*, Volume 29, No. 2, pages 609-632, May 2013, Earthquake Engineering Research Institute.

Yimsiri S., Soga K., Yoshizaki K., Dasari G.R. & O'Rourke T.D. (2004) "Lateral and Upward Soil-Pipeline Interactions in Sand for Deep Embedment Conditions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 8, August 1, ASCE.

Yoshizaki K. & Sakanoue T. (2004), "Analytical Study on Soil-Pipeline Interaction due to Large Ground Deformation", Paper No. 1402, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.