



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.) 10

*Βαθμονόμησης προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων
υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους έναντι
πειραματικών αποτελεσμάτων*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 10.1:

*Τεχνική έκθεση βαθμονόμησης προσομοιωμάτων
πεπερασμένων στοιχείων υπόγειων αγωγών με εύκαμπτους
κόμβους έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





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.) 10

*Calibration of finite element models of underground pipelines
with flexible joints against experimental results*

DELIVERABLE 9.1:

*Technical report of calibration of finite element models of
underground pipelines with flexible joints against experimental
results*

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

Within the framework of deliverable 10.1 the validation of numerical models from the experimental results has been presented. Also, the upheaval buckling risk assessment of pipelines with flexible joints and the effect of native soil on the soil springs properties have been investigated. Finally, a numerical methodology for the analysis of buried pipelines with flexible joints has been presented.

The ADINA finite element analysis program is employed for the modeling, with both experimental specimens – the continuous one as well as the specimen with flexible joints – being modeled in such level of detail that two criteria are equally satisfied: non-linearity involved in materials and geometry being taken into account and reasonable computational resources being required for the analyses. Beam elements as well as shell elements are utilized for the pipe specimen in both cases, while rotational and translational springs are used to model the flexible joint. The material laws employed in the simulation match the original behavior obtained from the steel-coupon tests.

In addition, the verification of the employed numerical methods, algorithm and procedures is also carried out by creating numerical models whose results are compared to experimental results from the literature. To that effect, a pipe four-point bending test is numerically modeled and the obtained results are in good agreement with the published experimental results.

Utilizing the calibrated and verified numerical model, the upheaval buckling risk assessment of pipelines with flexible joints is then investigated in case the pipeline is subjected to reverse faulting. Upheaval buckling may be caused due to high axial compressive forces, like in case of reverse fault activation. However, no specific recommendations exist in the literature and relevant codes and standards regarding the evaluation of upheaval buckling in onshore buried pipelines, as for continuous pipelines other failure modes are certain to be more critical, such as local buckling, steel yielding or tensile fracture. Regarding, then, the pipeline with flexible joints, the question arises whether the introduction of joints reduces the global stiffness of the structures to such extent that global buckling may emerge as the dominant failure mode. Based on these considerations, within the framework of the present deliverable, the potential of upheaval buckling is numerically investigated. A continuous pipeline

and a pipeline with flexible joints are examined. Also, two different pipelines are considered with different diameter over thickness ratio (D/t) and burial depth. For comparison reasons, the pipelines were subjected to reverse faulting magnitude equal to one pipe diameter. Numerical results showed that there is no danger of pipe failure due to global buckling. Additionally, the introduction of joints, as it has been shown within the research program, leads to a dramatic decrease of developing strains along the pipeline. Specifically, the deeply buried continuous pipeline with high D/t ratio is expected to fail due to local buckling, while the corresponding pipe with flexible joints undergoes very small vertical displacement that cannot be associated with global buckling. On the other hand, the shallowly buried continuous pipeline with low D/t ratio is expected to fail due to steel yielding, while the corresponding pipe with flexible joints again undergoes very small vertical displacement that cannot be associated with global buckling. Finally, it is generally noted that the pipelines with flexible joints undergo very small vertical displacement in the trench due to severe rotation of the joints, which act as internal hinges.

The effect of native soil surrounding the pipe trench on the soil spring properties has also been investigated. The properties of the soil springs are commonly determined assuming that the pipeline is embedded in sand backfill that covers a very large area. However, in practice this is not the case, as trench dimensions are limited. Thus, using numerical simulations with finite differences, the effect of trench dimensions on lateral spring properties have been investigated. Additionally, before carrying out parametric studies, the numerical models have been validated with results from the literature. The numerical investigation paid attention to the effect of burial depth through analysis of pipe lateral displacement in the free field. The obtained results revealed that there are three types of soil failure with reference to the embedment depth (burial depth over pipe diameter ration). The parametric studies that followed have taken into account: (a) the effect of the reduction of the horizontal distance from the pipe center, after pipe's displacement, to the vertical trench wall and (b) the effect of the reduction of the vertical distance from the pipe bottom to the horizontal trench wall. Based on the obtained numerical results, correction factors have been proposed for the effect of the trench width and the horizontal distance between the pipe and the vertical trench wall.

Within the research carried out in the research program and the results presented in the deliverables, the available numerical methods for the analysis of buried pipelines with flexible joints have been examined, which are (a) the continuum model and (b) the beam-type model resting on soil springs. The beam-type model is selected because:

- The continuum model can incorporate more detailed soil material laws, trench dimensions, while local buckling can be directly estimated. However, adopting the continuum model increases dramatically the complexity of the simulation and the computational cost (solution time, convergence difficulties, need for contact elements between the pipeline and the soil, very large number of finite elements and corresponding degrees of freedom). Additionally, there is difficulty regarding the

modeling of the flexible joint. Moreover, the implementation of the continuum model is not appropriate in case the pipeline crosses several faults along its path.

- The beam-type model is simpler, it is adopted by pertinent standards, codes and provisions and allows the calculation of stresses and strains on cross-sections along the pipeline. It is also appropriate for modeling the joint as a rotational spring.

The basic aspects of the numerical modeling of the pipeline with flexible joints using the beam-type mode are:

- The pipeline is meshed with pipe elements that are two-node Hermitian beam elements with extra degrees of freedom to account for the additional stress caused by cross-section ovalization. Pipe elements allow the calculation of stresses and strains along the pipelines. The use of pipe elements allows also to perform geometrically and materially nonlinear analysis.
- The surrounding soil is modeled with nonlinear translational springs: (a) in the longitudinal direction to model pipe - soil friction, (b) transverse horizontal (lateral) spring to model soil resistance to any pipe lateral movement and (c) vertical upward and downward springs to model soil resistance to any pipe vertical movement in the trench.
- Boundary conditions and loading: the ground nodes of the springs on the fault footwall are fixed, while the fault displacement is applied as imposed displacement on the springs' ground nodes on the fault hanging wall.

The hinged flexible joints are modeled as rotational springs without considering their length, while the pertinent torsional, axial and lateral displacements between their edges are constrained through appropriate numerical equations.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	6
2. Βαθμολόγηση Αριθμητικών Προσομοιώματων.....	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Αριθμητικό προσομοίωμα	8
2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης.....	10
2.3.1 Συνεχές δοκίμιο.....	10
2.3.2 Δοκίμιο με εύκαμπτους κόμβους	10
2.4 Προχωρημένη αριθμητική προσομοίωση.....	11
3. Πιστοποίηση Αριθμητικών Προσομοιώματων.....	16
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.2 Αριθμητική προσομοίωση	17
4. Αξιολόγηση Κινδύνου Καθολικού Λυγισμού	22
4.1 Εισαγωγή.....	22
4.2 Αριθμητική προσομοίωση αγωγού.....	23
4.3 Προσομοίωση ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος.....	23
4.4 Καθολικός λυγισμός αγωγού.....	24
4.5 Κίνδυνος καθολικού λυγισμού	25
5. Επιρροή Περιμετρικού Εδάφους στα Χαρακτηριστικά των Εδαφικών Ελατηρίων...30	

5.1	Εισαγωγή.....	30
5.2	Αριθμητική προσομοίωση	31
5.3	Παραμετρικές αναλύσεις	32
5.4	Προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις.....	33
5.4.1	Επίδραση πλάτους της τάφρου (απόσταση “x”).....	33
5.4.2	Επίδραση απόστασης “d’ από το οριζόντιο σύνορο της τάφρου.....	34
6.	Αριθμητική Μεθοδολογία Επίλυσης Αγωγών με Εύκαμπτους Κόμβους.....	36
6.1	Εισαγωγή.....	36
6.2	Επιλογή αριθμητικής μεθοδολογίας.....	37
6.3	Προσομοίωση εύκαμπτου κόμβου.....	38
6.3.1	Προσομοίωση διάρρηξης ρήγματος.....	39
7.	Εκτενής Περίληψη - Συμπεράσματα.....	40
7.1	Εισαγωγή.....	40
7.2	Βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων.....	40
7.3	Πιστοποίηση αριθμητικών προσομοιωμάτων	40
7.4	Αξιολόγηση κινδύνου καθολικού λυγισμού	41
7.5	Επιρροή περιμετρικού εδάφους στα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων.....	41
7.6	Αριθμητική μεθοδολογία επίλυσης αγωγών με εύκαμπτους κόμβους.....	42
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	44

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 κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι δράσεις που προδιαγράφονται στην Ενότητα Εργασίας Ε.Ε. 10, με τίτλο:

«Βαθμονόμηση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων υπόγειων αγωγών με εδάμπτους κόμβους έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων»

Το αντικείμενο της Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 10, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Θα μορφωθούν προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων υπόγειων αγωγών με εδάμπτους κόμβους και θα βαθμονομηθούν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτά τα προσομοιώματα θα είναι τόσο λεπτομερή αποτελούμενα από στοιχεία κελύφους και στοιχεία επαφής, όπου απαιτούνται, όσο και προοδευτικά απλούστερα, αντικαθιστώντας τμήματα του αγωγού με στοιχεία δοκού και τους κόμβους με ισοδύναμα μη γραμμικά μεταφορικά και στροφικά ελατήρια, έτσι ώστε να διατηρείται ικανοποιητική ακρίβεια. Θα ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού, η οποία αναμένεται να περιορίζεται μόνο στους κόμβους. Επίσης θα ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα, προκειμένου να συμπεριληφθούν μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις του εδάφους. Θα αξιολογηθεί μεταξύ άλλων και ο κίνδυνος έναντι καθολικού λογισμού (universal buckling), που αναμένεται να είναι αυξημένος για αγωγούς με εδάμπτους κόμβους, μέσω γραμμικοποιημένων και μη γραμμικών αναλύσεων λογισμού. Επιπλέον, θα επανεξεταστούν τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων του εδάφους, προκειμένου να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το επιλεγμένο υλικό πλήρωσης των τάφρων τοποθέτησης του αγωγού δεν είναι άπειρης έκτασης, αλλά περιορίζεται περιμετρικά από το (πλέον σφιχτό) φυσικό έδαφος. Θα διατυπωθεί μία απλή

αλλά επαρκής μεθοδολογία αριθμητικής ανάλυσης για υπόγειους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους που υποβάλλονται με μεγάλες μετακινήσεις εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και τη διεύθυνση των προβλεπόμενων μετακινήσεων εδάφους, τη διατομή του αγωγού, καθώς και τη γεωμετρία της διέλευσής του».

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα αριθμητικά που μορφώθηκαν και βαθμονομήθηκαν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται προχωρημένες αριθμητικές αναλύσεις και σύγκριση των προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία για την επιβεβαίωση των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Έπειτα, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αριθμητικές αναλύσεις εκτίμησης του κινδύνου καθολικού λυγισμού υπόγειων αγωγών υποκείμενων σε ανάστροφη διάρρηξη, ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται θεωρητική και αριθμητική διερεύνηση της επιρροής του περιμετρικού φυσικού εδάφους στα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία επίλυσης για υπόγειους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους, ενώ στο τελευταίο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα συμπεράσματα του παρόντος παραδοτέου.

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
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Αλέξανδρος Βαλσαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- 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

Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στο Βασίλειο Μελισσιανό, Υ.Δ. της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, στο Γιάννη Χαλούλο, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και στους Πολιτικούς Μηχανικούς Σπύρο Ζερβό, Αλέξανδρο Ζάμπα και Άγγελο Καρβέλη για τη συμβολή τους.

Βαθμονόμηση Αριθμητικών Προσομοιωμάτων με Βάση τα Πειραματικά Αποτελέσματα

2.1 Εισαγωγή

Η βαθμονόμηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του παραδοτέου 9.1 παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο.

2.2 Αριθμητικό προσομοίωμα

Η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA [1]. Αρχικά μορφώθηκε η γεωμετρία των δοκιμίων με συνολικό μήκος 5568mm, διάμετρο 114.3mm και πάχος 2.8mm, το οποίο μετρήθηκε με ακρίβεια και βρέθηκε κατά 0.2mm μικρότερο από το ονομαστικό πάχος της διατομής. Ειδικότερα:

- Συνοριακές συνθήκες: Κατά την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών είχαν τοποθετηθεί επί των μετωπικών πλακών σύνδεσης του δοκιμίου με το πλαίσιο δοκιμών αποστασιόμετρα για την αποτόπωση της ενδεχόμενης ολίσθησης ή στροφής της μετωπικής πλάκας. Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν από τα μετρητικά όργανα έδειξαν ότι η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση της πλάκας ήταν 0.005mm και η μέγιστη εγκάρσια (σχετίζεται με τη στροφή) ήταν 0.13mm. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η σύνδεση είναι πρακτικά άκαμπτη και ως εκ τούτου υλοποιήθηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα ως πάκτωση.
- Φόρτιση: Κατά την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών η επιβαλλόμενη μετακίνηση μέσω του υδραυλικού εμβόλου επιβλήθηκε με επαρκώς αργό ρυθμό για την προσομοίωση της στατικής φύσης του προβλήματος. Έτσι, στο αριθμητικό προσομοίωμα ασκείται επιβαλλόμενη μετακίνηση στο μέσον του δοκιμίου και επιλέγεται στατική ανάλυση.
- Υλικό: Ο χάλυβας των δοκιμίων υποβλήθηκε σε δοκιμές εφελκυσμού, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραδοτέου 9.1 και ο νόμος υλικού που προέκυψε

μετατράπηκε σε διγραμμική μορφή και χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική προσομοίωση.

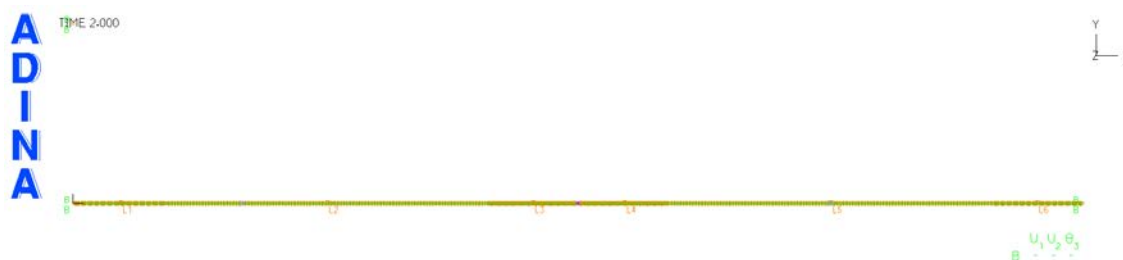
- Προσομοίωση: Η απουσία εμφανούς τοπικού λυγισμού στο συνεχές δοκίμιο επιτρέπει την προσομοίωση του δοκιμίου αρχικά με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι, για την προσομοίωση επιλέγονται τα δικομβικά στοιχεία δοκού (2-node Hermitian pipe elements), με επιπλέον βαθμούς ελευθερίας προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πρόσθετη ένταση λόγω ενδεχόμενης οβαλοποίησης της διατομής. Σχετικές δοκιμές ευαισθησίας επιβεβαίωσαν την επάρκεια της διακριτοποίησης. Επίσης, κάθε εύκαμπτος κόμβος προσομοιώθηκε με ένα στροφικό και δύο μετακινησιακά ελαστικά ελατήρια (ένα αξονικό και ένα εγκάρσιο).
- Ανάλυση: Η πλήρως μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή του μη γραμμικού αλγορίθμου Newton-Raphson με χρήση του ενεργειακού κριτηρίου σύγκλισης και θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων.

Βάσει των ανωτέρω για την προσομοίωση του συνεχούς δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν 1250 pipe elements και το τελικό προσομοίωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, ενώ για το δοκίμιο με κόμβους χρησιμοποιήθηκαν 1300 pipe elements και συνολικά 12 spring elements.



Σχήμα 2.1: Αριθμητικό προσομοίωμα συνεχούς δοκιμίου με πεπερασμένα στοιχεία δοκού

Figure 2.1: Finite-element model of continuous specimen with beam elements



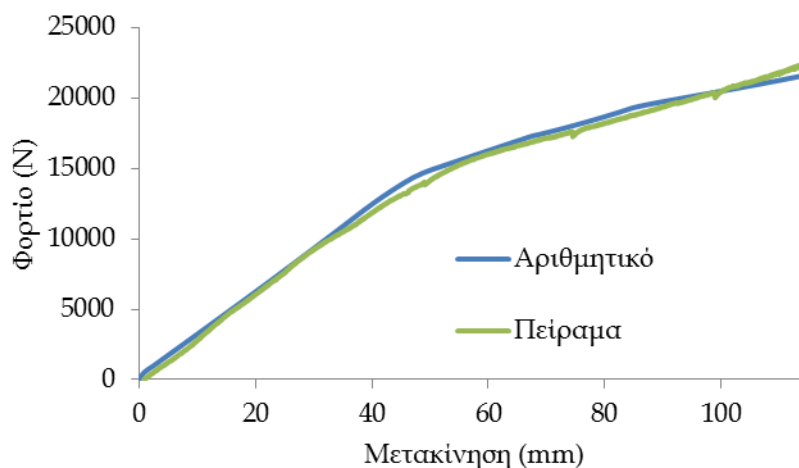
Σχήμα 2.2: Αριθμητικό προσομοίωμα δοκιμίου με εύκαμπτους κόμβους με πεπερασμένα στοιχεία δοκού

Figure 2.2: Finite-element model of specimen with flexible joints with beam elements

2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και προσομοίωσης

2.3.1 Συνεχές δοκίμιο

Το πείραμα διήρκεσε έως ότου η ασκούμενη δύναμη έφτασε τα 22.48kN και η αντίστοιχη μετατόπιση τα 115mm. Τα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης και του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3 (καμπύλη πειράματος, καμπύλη προσομοίωσης χωρίς ελατήριο).



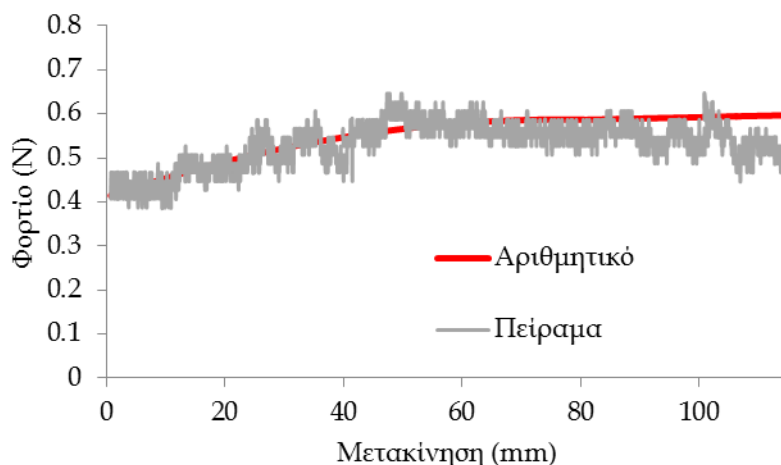
Σχήμα 2.3: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης - μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης και του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της αριθμητικής προσομοίωσης για το συνεχές δοκίμιο

Figure 2.3: Comparison of force - displacement curves from the test's hydraulic actuator and the simulation's loaded node of the continuous specimen

Παρατηρείται πολύ καλή «ταύτιση» της πειραματικής καμπύλης συγκριτικά με την καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης, όσον αφορά κυρίως την αρχική δυσκαμψία του φορέα. Βέβαια, η αλλαγή κλίση του διαγράμματος που σχετίζεται με την πλαστικοποίηση των ακραίων διατομών (θέσεις συγκόλλησης του δοκιμίου με τις μετωπικές πλάκες) επέρχεται για ελαφρώς μικρότερη μετακίνηση και ελαφρώς μεγαλύτερο φορτίο στην περίπτωση της αριθμητικής προσομοίωσης σε σχέση με το πειραματικό αποτέλεσμα. Επιπροσθέτως, το μέγιστο φορτίο της αριθμητικής προσομοίωσης είναι περίπου 5% μικρότερο από το πειραματικό.

2.3.2 Δοκίμιο με εύκαμπους κόμβους

Το πείραμα διήρκεσε έως ότου η ασκούμενη δύναμη έφτασε τα 0.65kN και η αντίστοιχη μετατόπιση τα 115mm. Τα διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης και του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 (καμπύλη πειράματος, καμπύλη προσομοίωσης χωρίς ελατήριο).



Σχήμα 2.3: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης - μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης και του κόμβου εφαρμογής μετακίνησης της αριθμητικής προσομοίωσης για το δοκίμιο με εύκαμπτους κόμβους

Figure 2.4: Comparison of force - displacement curves from the test's hydraulic actuator and the simulation's loaded node of the specimen with flexible joints

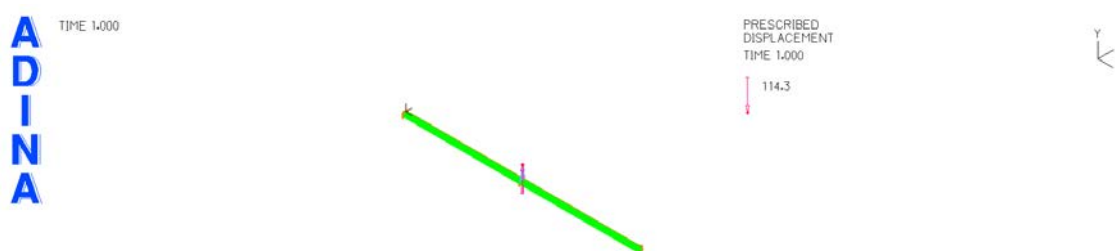
Παρατηρείται αρκετά καλά «ταύτιση» της πειραματικής καμπύλης συγκριτικά με την καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, όπως περιεγράφηκε στα πειραματικά αποτελέσματα του παραδοτέου 9.1, ότι η αναπτυσσόμενη δύναμη στην πειραματική δοκιμή ήταν πάρα πολύ μικρή και δεν προέκυψε σαφής καμπύλη, λόγω και της ευαισθησίας μέτρησης της δυναμοκυψέλης του υδραυλικού εμβόλου. Αντιθέτως, από το αριθμητικό προσομοίωμα λαμβάνεται καμπύλη, η οποία βρίσκεται εντός του «νέφους» σημείων που προέκυψαν από το πείραμα. Αναφορικά με το μέγιστο φορτίο σημειώνεται ότι στο πείραμα ήταν 0.65kN, ενώ από την αριθμητική ανάλυση το φορτίο προέκυψε ίσο με 0.60kN. Η διαφορά αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι πειραματικές μετρήσεις φορτίου είναι σημειακές και το μέγιστο φορτίο αποτελεί αιχμή στο «νέφος» σημείων. Γενικότερα η αριθμητική καμπύλη ακολουθεί τη μειούμενη δυσκαμψία του φορέα που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις.

2.4 Προχωρημένη αριθμητική προσομοίωση

Στην προηγούμενη ενότητα η προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών με αριθμητικά προσομοιώματα με στοιχεία δοκού κρίθηκε επαρκής από πλευράς αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και ικανοποιητικής ταύτισής τους με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται επιπλέον προχωρημένη αριθμητική προσομοίωση του συνεχούς δοκιμίου με επιφανειακά πεπερασμένα προκειμένου: (α) να επιβεβαιωθεί η επάρκεια των αριθμητικών προσομοιωμάτων με στοιχεία δοκού, (β) να παρουσιασθεί εποπτικά η κατανομή των παραμορφώσεων στο κέλυφος του αγωγού και επιπροσθέτως (γ) να εξετασθεί η ενδεχόμενη επιρροή των αρχικών γεωμετρικών

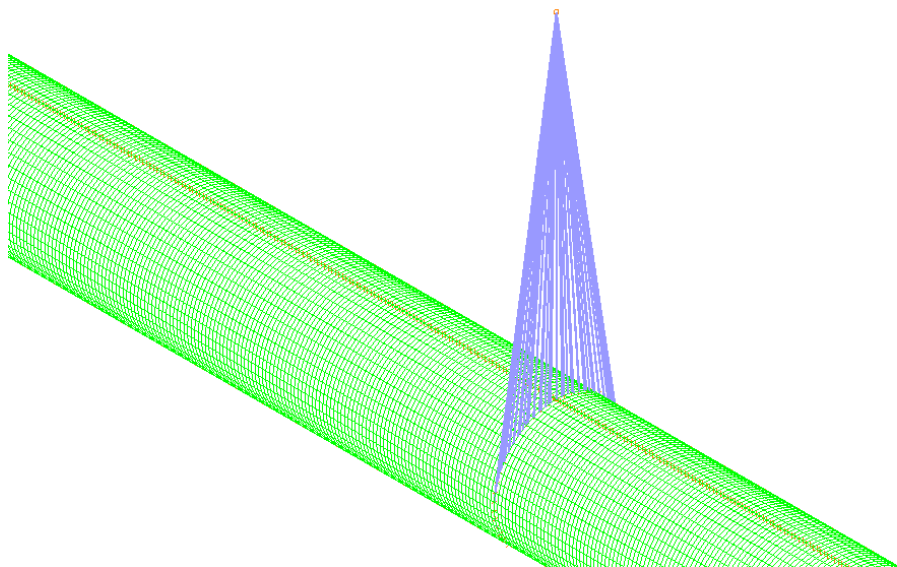
ατελειών στη φέρουσα ικανότητα του φορέα σε όρους διαγράμματος δύναμης - φορτίου (δρόμος ισορροπίας).

Η γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος, το υλικό, οι συνοριακές συνθήκες, η εξωτερικά επιβαλλόμενη μετακίνηση και το είδος της ανάλυσης είναι ίδια με αυτά που υιοθετήθηκαν στην παράγραφο 2.3. Το κυλινδρικό κέλυφος τώρα διακριτοποιείται μέσω 87500 τετρακομβικών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell elements). Σχετικές δοκιμές επιβεβαίωσαν την επάρκεια του συγκεκριμένου βαθμού διακριτοποίησης του φορέα. Το τελικό προσομοίωμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5, ενώ στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του προσομοιώματος και συγκεκριμένα το μέσον αυτού, όπου η επιβαλλόμενη μετακίνηση ασκείται στο φορέα μέσω εξωτερικού σημείου, το οποίο συνδέεται άκαμπτα με χρήση rigid links με τη μεσαία διατομή του δοκιμίου για να προσομοιωθεί το έλασμα επιβολής φορτίου.



Σχήμα 2.5: Προσομοίωμα συνεχούς δοκιμίου με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

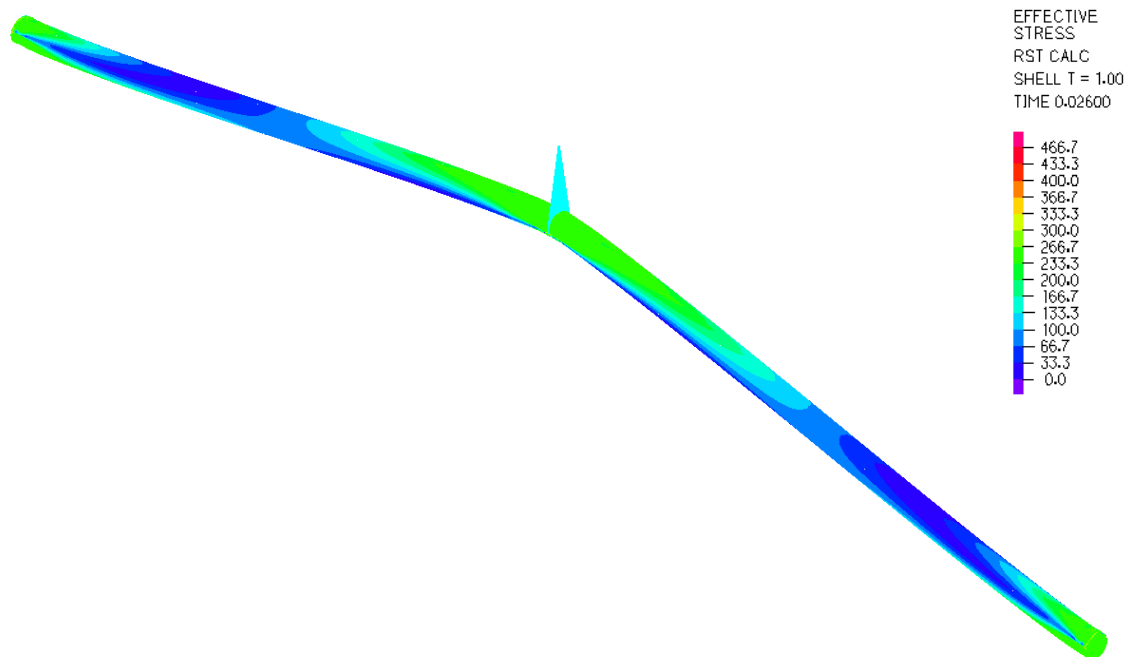
Figure 2.5: Numerical model of the continuous specimen with shell finite elements



Σχήμα 2.6: Λεπτομέρεια αριθμητικού προσομοιώματος συνεχούς δοκιμίου με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία

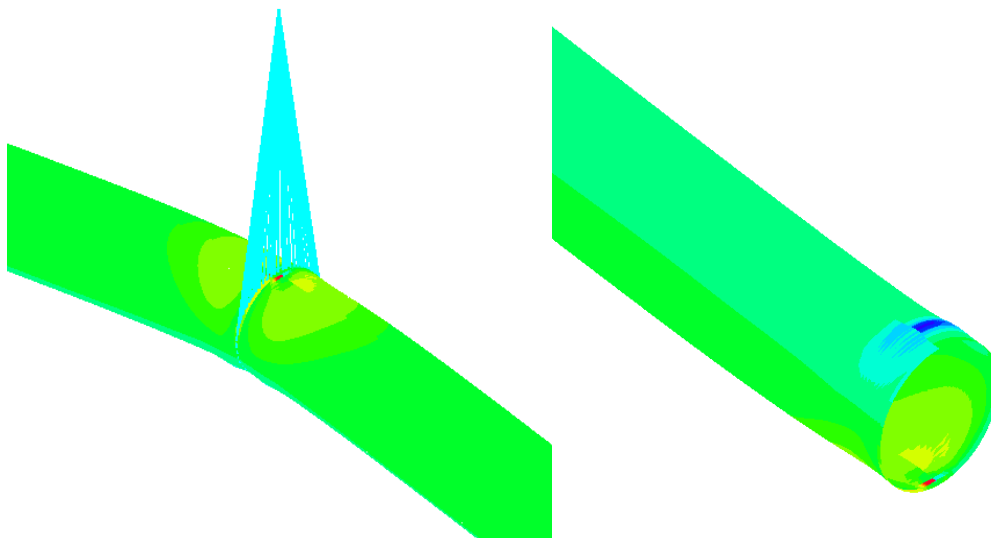
Figure 2.6: Detail of the numerical model of the continuous specimen with shell finite elements

Στο αριθμητικό προσομοίωμα επιβάλλεται στατικά μετακίνηση ίση με 115mm. Η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στο τέλος της ανάλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7, με χρωματική απεικόνιση της κατανομής των τάσεων Von Mises, ώστε να αναδειχθούν οι περιοχές πλαστικοποίησης, στις οποίες οφείλεται η αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος δύναμης - μετακίνησης. Επιπροσθέτως, στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται λεπτομέρειες της κατανομής των διαμήκων παραμορφώσεων στη στήριξη του δοκιμίου (συγκόλληση με τη μετωπική πλάκα) και στο μέσον (θέση ελάσματος επιβολής φορτίου).



Σχήμα 2.7: Παραμορφωμένος φορέας συνεχούς δοκιμίου στο τέλος της ανάλυσης και κατανομή τάσεων Von Mises

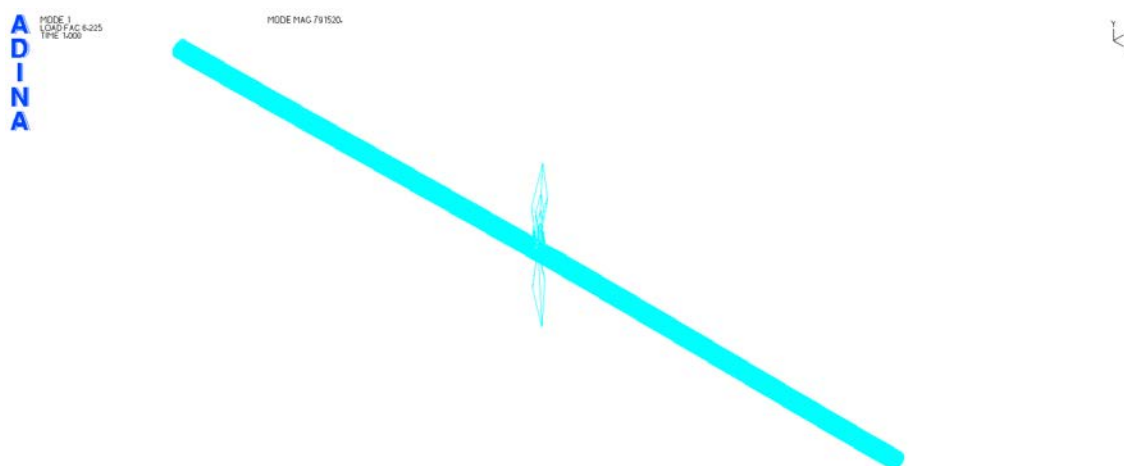
Figure 2.7: Continuous specimen deformed shape at the end of analysis and Von Mises stress distribution



Σχήμα 2.8: Λεπτομέρειες κατανομής διαμήκων παραμορφώσεων προσομοίωσης συνεχούς δοκιμίου στο τέλος της ανάλυσης

Figure 2.8: Details of longitudinal strain distribution of the continuous specimen modeling at the end of analysis

Τα κυλινδρικά κελύφη παρουσιάζουν εν γένει ευαισθησία στις αρχικές γεωμετρικές ατέλειες και για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο στην παρούσα αριθμητική διερεύνηση να εξετασθεί η επιρροή τους. Ως γεωμετρικές ατέλειες λαμβάνονται συνήθως τα σχήματα των ιδιομορφών λυγισμού που προκύπτουν από γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού του φορέα, η οποία αφορά τοπικό λυγισμό στη μεσαία διατομή όπου αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή. Σημειώνεται ότι και οι ανώτερες τρεις ιδιομορφές έχουν το ίδιο φορτίο λυγισμού, καθώς όλες αφορούν τοπικούς λυγισμούς στο μέσον και στα άκρα.

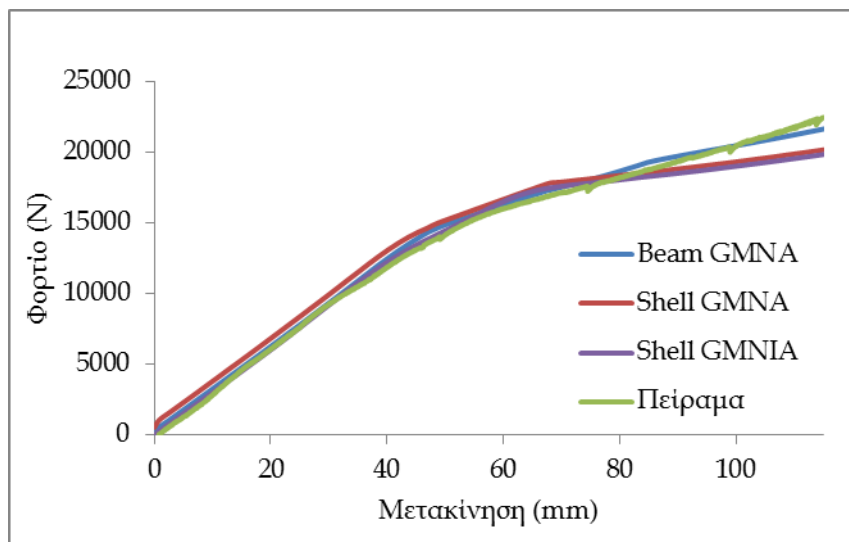


Σχήμα 2.9: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού συνεχούς δοκιμίου

Figure 2.9: First eigenmode of continuous specimen

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε μη-γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GMNIA), για τις οποίες υιοθετήθηκε το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής λυγισμού (Σχήμα 2.9) και ως μέγεθος ατέλειας επιλέχθηκε το 1mm. Σημειώνεται ότι το μέγεθος της ατέλειας δίδεται στη θέση της ιδιομορφής με το μεγαλύτερο ιδιοδιάνυσμα και ακολούθως το υπόλοιπο σχήμα κανονικοποιείται. Η συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας στο Σχήμα 2.10, εκ του οποίου προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία δοκού είναι επαρκής.
- Η εισαγωγή αρχικών γεωμετρικών ατελειών δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του φορέα.
- Οι αναλύσεις με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία δίνουν ελαφρώς μικρότερο μέγιστο φορτίο.



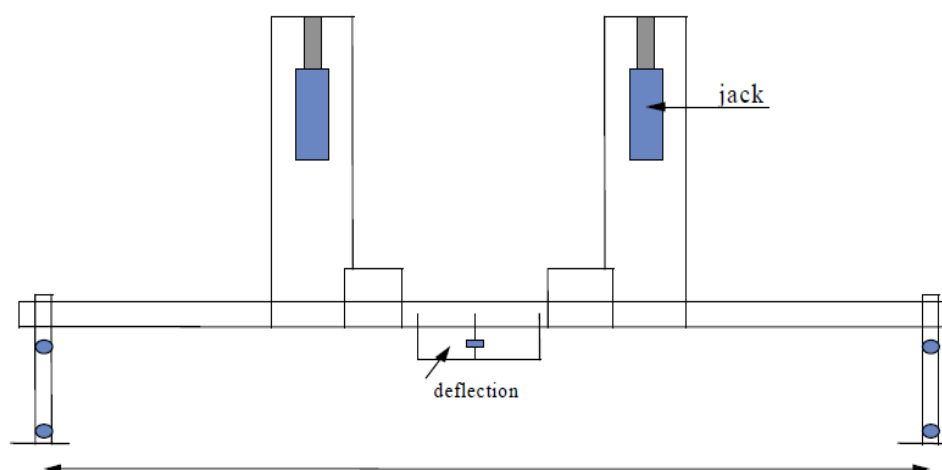
Σχήμα 2.10: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας μη-γραμμικών αναλύσεων και πειράματος

Figure 2.10: Comparison of load - displacement curves obtained from non-linear numerical analyses and the experiment

Πιστοποίηση Αριθμητικών Προσομοιωμάτων με Βάση Πειραματικά Αποτελέσματα από τη Βιβλιογραφία

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πιστοποίηση των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων των πειραματικών δοκιμών. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση του πειράματος που παρουσιάζουν οι Gresnigt and Karamanos [2] για την επαλήθευση της αριθμητικής μεθόδου. Πρόκειται για πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων χωρίς την παρουσία του εδάφους ("in-air conditions"). Χρησιμοποιούνται αγωγοί με λόγο D/t από 22.3 έως 45.4, το μήκος των οποίων είναι 12m ενώ στηρίζονται μέσω «σχοινιών» (strips) στα δυο άκρα, καθώς επίσης και στα ενδιάμεσα σημεία. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στα Σχήματα 3.1 και 3.2.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης Gresnigt and Karamanos [2]

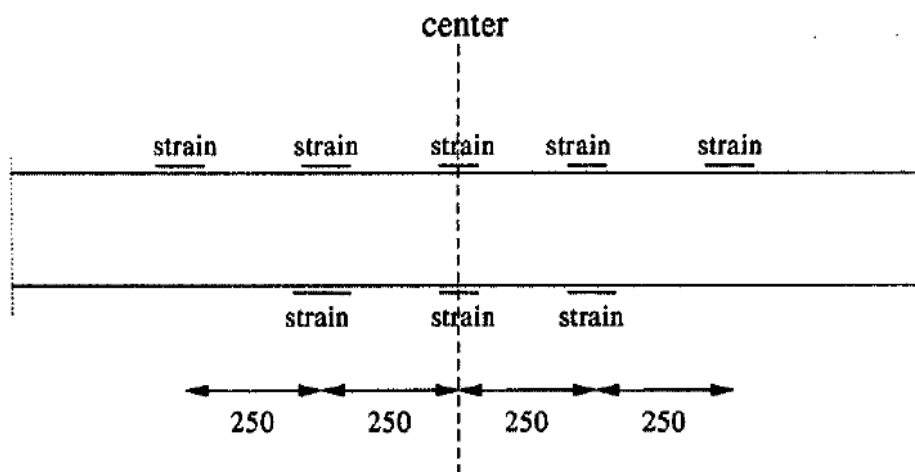
Figure 3.1: Schematic illustration of Gresnigt and Karamanos [2] experimental set-up



Σχήμα 3.2: Παραμορφωμένο δοκίμιο πειράματος Gresnigt and Karamanos [2]

Figure 3.2: Specimen deformed shape by Gresnigt and Karamanos [2]

Το φορτίο ασκείται μέσω των ενδιάμεσων «σχοινιών» τα οποία είναι τοποθετημένα σε μήκος 0.70m. Η περιοχή ενδιάμεσα των μεσαίων σχοινιών στην οποία αναπτύσσεται καθαρή κάμψη είναι 2m. Επί των υπό εξέταση αγωγών και εντός του μήκους της καθαρής κάμψης, είναι τοποθετημένα 3 ηλεκτρομηκυνσιόμετρα για τη μέτρηση των αναπτυσσόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων και 5 ηλεκτρομηκυνσιόμετρα για τη μέτρηση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών παραμορφώσεων σε απόσταση 250mm μεταξύ τους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Θέσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων πειράματος Gresnigt and Karamanos [2]

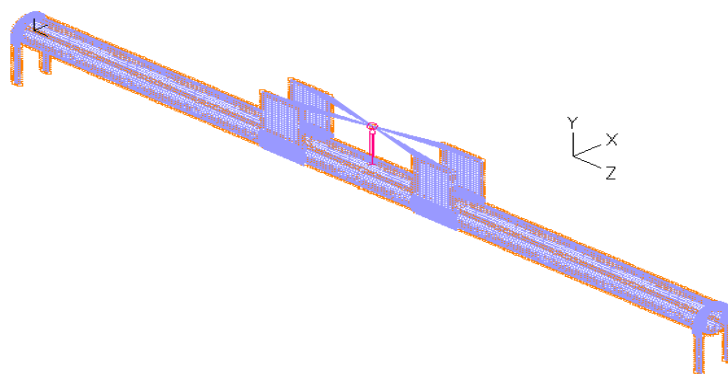
Figure 3.3: Locations of strain gauges in Gresnigt and Karamanos [2] experiment

3.2 Αριθμητική προσομοίωση

Για την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος [2] υιοθετούνται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Η διατομή του υπό εξέταση αγωγού έχει διάμετρο $D=914\text{mm}$ και πάχος $t=11.22\text{mm}$.
- Οι ιδιότητες του χάλυβα είναι: μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$, όριο διαρροής $f_y=479\text{MPa}$, όριο θραύσης $f_u=568\text{MPa}$, ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u=39\%$.
- Η προσομοίωση του αγωγού και των σχοινιών πραγματοποιήθηκε με τετρακομβικά επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ η διεπιφάνεια μεταξύ του αγωγού και των σχοινιών μέσω στοιχείων επαφής.
- Η φόρτιση επιβάλλεται σε σημείο το οποίο συνδέεται με τα μεσαία σχοινιά μέσω άκαμπτων συνδέσμων. Τα ακραία σχοινιά είναι πακτωμένα στο άκρο τους ενώ στο σημείο επιβολής της φόρτισης υπάρχει η δυνατότητα της εγκάρσιας κατακόρυφης μετακίνησης.
- Στη μεσαία διατομή του αγωγού στην άνω γενέτειρα του, έχει δεσμευτεί ο διαμήκης βαθμός ελευθερίας του αγωγού.

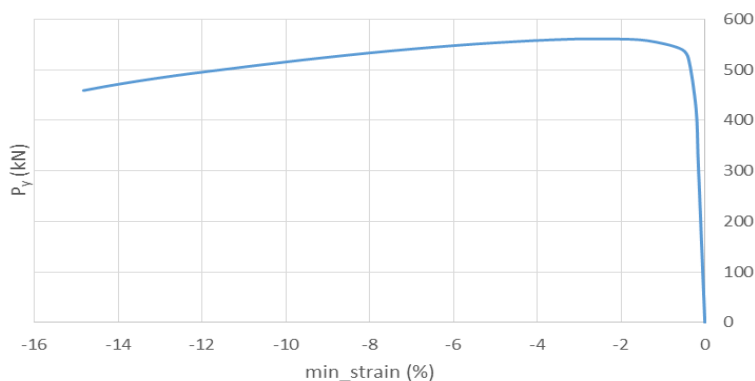
Το αριθμητικό προσομοίωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Αριθμητικό προσομοίωμα πειραματικής διάταξης Gresnigt and Karamanos [2]

Figure 3.4: Numerical simulation of Gresnigt and Karamanos [2] experiment

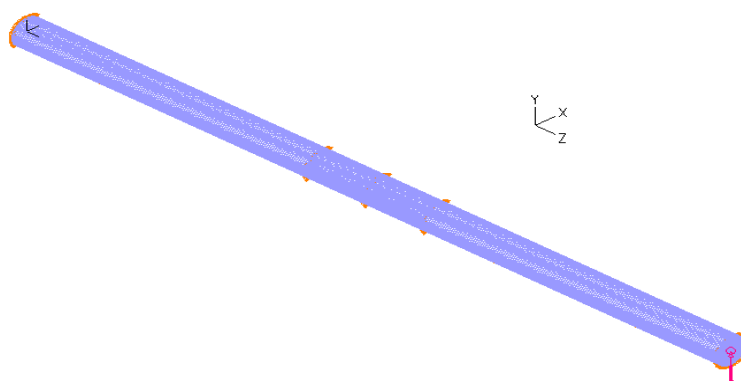
Η πειραματική μέση τιμή των αναπτυσσόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων είχε μετρηθεί ίση με -1.36% [2]. Από την αριθμητική προσομοίωση προέκυψε ότι η θλιπτική παραμόρφωση είναι -1.37% , το οποίο είναι σε πάρα πολύ καλή συμφωνία με το πειραματικό αποτέλεσμα. Ο δρόμος ισορροπίας σε όρους δύναμης - θλιπτικής παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Δρόμος ισορροπίας σε όρους δύναμης – θλιπτικών παραμορφώσεων

Figure 3.5: Equilibrium path of force – compressive strains

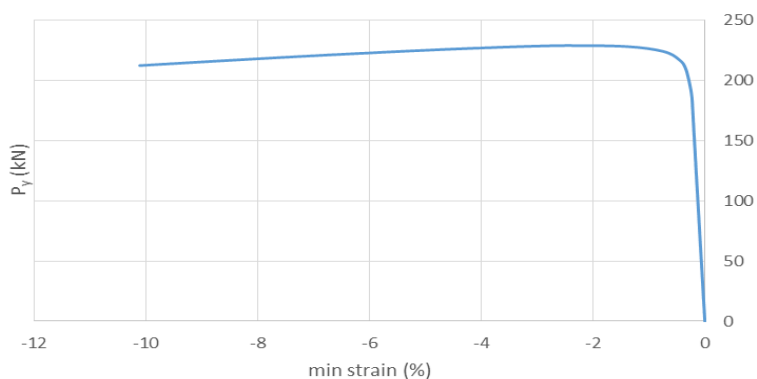
Ακολούθως μορφώθηκε ένα ισοδύναμο αριθμητικό προσομοίωμα για τη διερεύνηση και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα του [2]. Το αριθμητικό προσομοίωμα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.



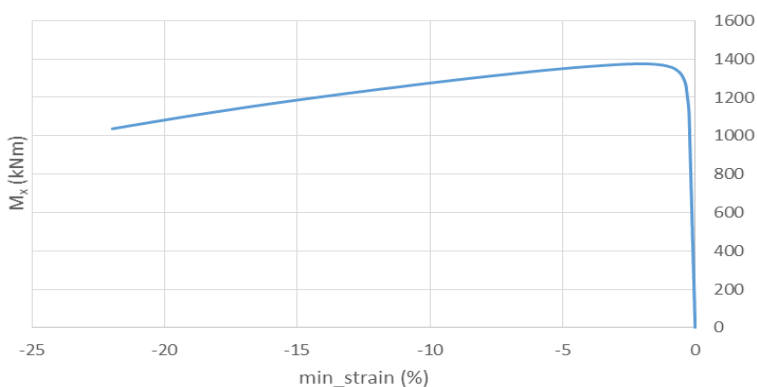
Σχήμα 3.6 Ισοδύναμο αριθμητικό προσομοίωμα

Figure 3.6: Equivalent numerical model

Το φορτίο έχει επιβληθεί σε δυο σημεία που συνδέονται μέσω άκαμπτων συνδέσμων στις δυο ακραίες διατομές του αγωγού και επιβλήθηκαν συνοριακές συνθήκες με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτρέπεται η οβαλοποίηση της διατομής του αγωγού. Συγκεκριμένα έχει δεσμευτεί ο εγκάρσιος κατακόρυφος βαθμός ελευθερίας στα δυο άκρα της μεσαίας διατομής του αγωγού. Επίσης έχει δεσμευτεί και πάλι ο διαμήκης βαθμός ελευθερίας στην άνω γενέτειρα της μεσαίας διατομής του αγωγού. Ο δρόμος ισορροπίας δύναμης – θλιπτικών παραμορφώσεων που προκύπτει από το ισοδύναμο αριθμητικό προσομοίωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7, ενώ στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται ο αντίστοιχος δρόμος σε όρους ροπής – θλιπτικών παραμορφώσεων.

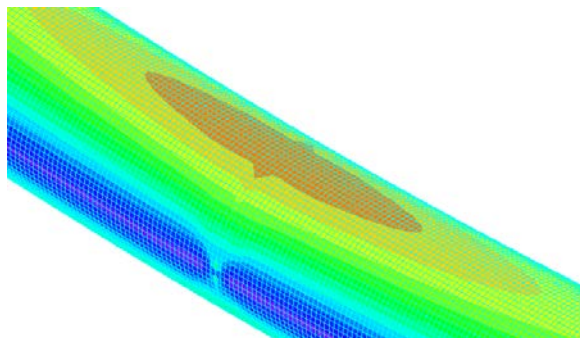


Σχήμα 3.7 Δρόμος ισορροπίας σε όρους δύναμης – ελάχιστων παραμορφώσεων
Figure 3.7: Equilibrium path of force – compressive strains



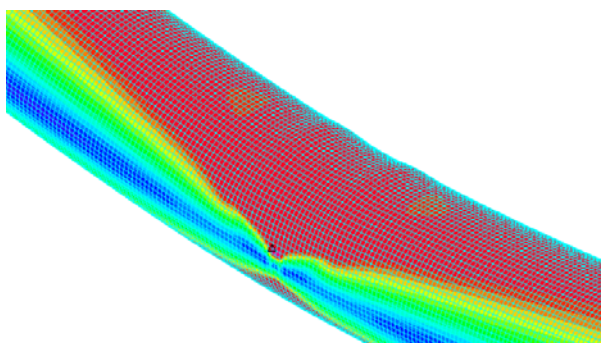
Σχήμα 3.8 Δρόμος ισορροπίας σε όρους ροπής κάμψεως – ελάχιστων παραμορφώσεων
Figure 3.8: Equilibrium path of bending moment – compressive strains

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8, το οριακό φορτίο είναι $M_{op}=1375\text{kNm}$ και η αναπτυσσόμενη θλιπτική παραμόρφωση στο οριακό φορτίο είναι $\varepsilon=-1.39\%$. Σύμφωνα με το [2] το οριακό φορτίο ανέρχεται σε $M_{op}=1507\text{kNm}$ και η μέση τιμή της θλιπτικής παραμόρφωσης είναι $\varepsilon=-1.36\%$. Διαπιστώνεται ως εκ τούτου ικανοποιητική σύγκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από το απλοποιημένο αριθμητικό μοντέλο με το πείραμα. Σημειώνεται ότι η πλαστική ροπή της κοίλης κυκλικής διατομής σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 – Μέρος 4.3 ισούται με 1392.4kNm . Τέλος, οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα με απεικόνιση των τάσεων von Mises παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9 πριν την ανάπτυξη του τοπικού λυγισμού και στο Σχήμα 3.10 μετά την ανάπτυξη του τοπικού λυγισμού στο μέσον του δοκιμίου.



Σχήμα 3.9 Παραμορφωμένη εικόνα φορέα πριν την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού με κατανομή τάσεων von Mises

Figure 3.9: Pipe deformed shape before local buckling with von Mises stress contours



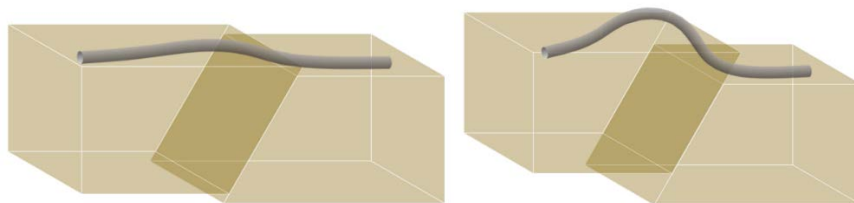
Σχήμα 3.9 Παραμορφωμένη εικόνα φορέα μετά την ανάπτυξη τοπικού λυγισμού με κατανομή τάσεων von Mises

Figure 3.9: Pipe deformed shape after local buckling with von Mises stress contours

Αξιολόγηση Κινδύνου Καθολικού Λυγισμού

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η αξιολόγηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού υπόγειων μεταλλικών αγωγών, τόσο συνεχών όσο και με κόμβους. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Ο καθολικός λυγισμός αγωγού είναι ενδεχόμενη μορφή αστοχίας στην περίπτωση που αγωγός υπόκειται σε ανάστροφη διάρρηξη, οπότε αναπτύσσονται σημαντικές θλιπτικές δυνάμεις στον αγωγό. Η εισαγωγή εύκαμπτων κόμβων σε συνεχή αγωγό μεταβάλλει το στατικό του σύστημα από συνεχές σε σπονδυλωτό με συνέπεια τη μείωση της καθολικής δυσκαμψίας του συστήματος. Αυτό εγείρει ανησυχία για ενδεχόμενη εκδήλωση καθολικού λυγισμού, αν ληφθεί παράλληλα υπ' όψιν το γεγονός ότι τα εδαφικά προς τα άνω ελατήρια έχουν πολύ μικρότερη δυσκαμψία σε σχέση με τα προς τα κάτω, δεδομένου ότι άνωθεν του αγωγού βρίσκεται η επίχωση, η οποία είναι συνήθως χαλαρό κοκκώδες υλικό. Η παραμόρφωση ενός συνεχούς αγωγού που υφίσταται καθολικό λυγισμό υπό ανάστροφη διάρρηξη παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση καθολικού λυγισμού αγωγού υπό ανάστροφη διάρρηξη

Figure 3.1: Schematic representation of buried pipeline upheaval buckling due to reverse faulting

Η ενεργοποίηση ενός ανάστροφου σεισμικού ρήγματος συνοδεύεται από κατακόρυφη και οριζόντια μετακίνηση του ανερχόμενου τεμάχους του ρήγματος, οπότε πέραν της καμπτικής έντασης αναπτύσσονται και θλιπτικές δυνάμεις στον αγωγό. Χάριν απλοποίησης στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι η οριζόντια μετακίνηση του ρήγματος πραγματοποιείται αποκλειστικά εντός του κατακορύφου επιπέδου που διέρχεται από τον αγωγό, χωρίς εγκάρσια προς τον αγωγό συνιστώσα. Συνεπώς, υιοθετείται το προσομοίωμα της δοκού μεγάλου μήκους επί ελαστοπλαστικού εδάφους με συνεχή πλευρική κατακόρυφη στήριξη από ομοιόμορφα κατανεμημένα εγκάρσια ελατήρια που προσομοιώνουν την προς τα άνω (upward movement) και την προς τα κάτω κίνηση (downward movement) του αγωγού εντός του ορύγματος. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπ' όψιν και η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους μέσω της τριβής που προσομοιώνεται με διαμήκη αξονικά ελατήρια, σύμφωνα με τις προβλέψεις του ALA [3].

4.2 Αριθμητική προσομοίωση αγωγού

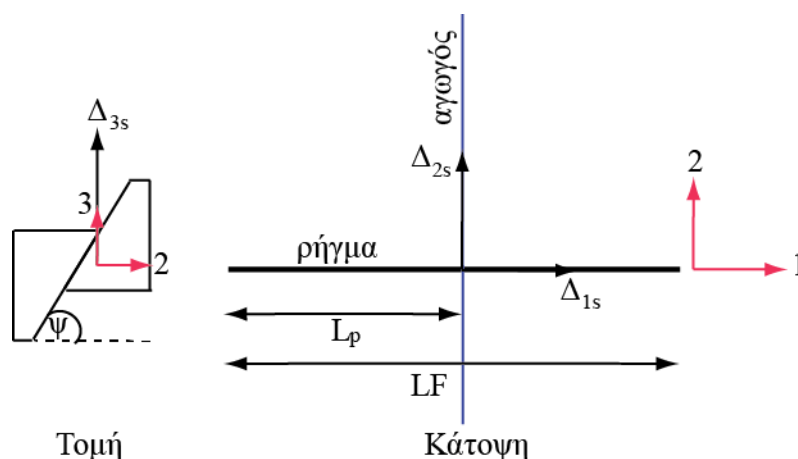
Ο αγωγός προσομοιώνεται αριθμητικά σε δύο διαστάσεις με πεπερασμένα στοιχεία δοκού, καθώς η δυνατότητα που αυτά παρέχουν για υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων σε επιλεγμένες θέσεις τόσο κατά μήκος του αγωγού, όσο και επί της διατομής τα καθιστούν ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για την αποτίμηση της καθολικής και - εμμέσως, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια - της τοπικής συμπεριφοράς του αγωγού. Ακολουθώντας τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού προσομοιώνονται με μη-γραμμικά ελατήρια μετάθεσης σε δύο διευθύνσεις. Ειδικότερα, η τριβή μεταξύ του αγωγού και του εδάφους προσομοιώνεται με διαμήκη ελατήρια. Ταυτόχρονα, ένα ζεύγος κατακορύφων ελατηρίων προσομοιώνει την κατακόρυφη κίνηση του αγωγού προς τα άνω και προς τα κάτω εντός του ορύγματος, με τα χαρακτηριστικά τους να διαφέρουν σημαντικά λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της υπερκείμενης εδαφικής επίχωσης και του υποκείμενου μητρικού εδάφους.

4.3 Προσομοίωση ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος

Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος υλοποιείται στην παρούσα έρευνα μέσω ενός παραδείγματος, τόσο για το συνεχή αγωγό, όσο και για τον αγωγό με εύκαμπτους κόμβους, και προσεγγίζεται αριθμητικά με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA [1]. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ευθύγραμμος αγωγός συνολικού μήκους $L=1000\text{m}$ και εξετάζονται δύο περιπτώσεις: (α) ένας αγωγός μεγάλης διαμέτρου και βαθιά θαμμένος με διάμετρο $D=914\text{mm}$, πάχος τοιχώματος $t=12.7\text{mm}$ (36in pipeline), λόγο διαμέτρου προς πάχος $D/t=72$ και βάθος ταφής $H/D=1$ και (β) ένας αγωγός μικρότερης διαμέτρου και πιο ρηχά θαμμένος με διάμετρο $D=457\text{mm}$, πάχος τοιχώματος $t=12.7\text{mm}$, λόγο διαμέτρου προς πάχος $D/t=36$ (18in pipeline) και βάθος ταφής $H/D=1$. Ο χάλυβας του αγωγού είναι ποιότητας API5L-X65 με διγραμμικό νόμο υλικού και χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$, όριο διαρροής

$f_y=448.50\text{MPa}$, όριο θραύσης $f_u=531.00\text{MPa}$ και ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u=18\%$. Το υλικό επίχωσης του ορύγματος είναι άμμος μέσης πυκνότητας με γωνία τριβής $\varphi=36^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Ο αγωγός περιβάλλεται εξωτερικά με πίσσα λιθάνθρακα (coal tar), με συντελεστή $f=0.90$ ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους δίνει τη γωνία τριβής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Επιπλέον, το έδαφος προσομοιώνεται με ελαστοπλαστικά μετακινησιακά ελατήρια, των οποίων τα χαρακτηριστικά εκτιμώνται σύμφωνα με τις οδηγίες του ALA [3].

Θεωρείται ότι ο αγωγός τέμνει κάθετα ένα ανάστροφο ρήγμα με γωνία βύθισης $\psi=70^\circ$ και το οποίο χωροθετείται στο μέσον του μήκους του αγωγού ($L_p=LF/2$), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Η επιβαλλόμενη μετακίνηση ρήγματος ισούται με $\Delta/D=1$. Η μετακίνηση του εδάφους στο ανερχόμενο τέμαχος του ρήγματος υλοποιείται στο αριθμητικό προσομοίωμα ως στατικά επιβαλλόμενη μετακίνηση στους αντίστοιχους εδαφικούς κόμβους των ελατηρίων.



Σχήμα 3.2: Γεωμετρία διασταύρωσης αγωγού - ανάστροφου ρήγματος

Figure 3.2: Geometry of pipeline - reverse fault crossing

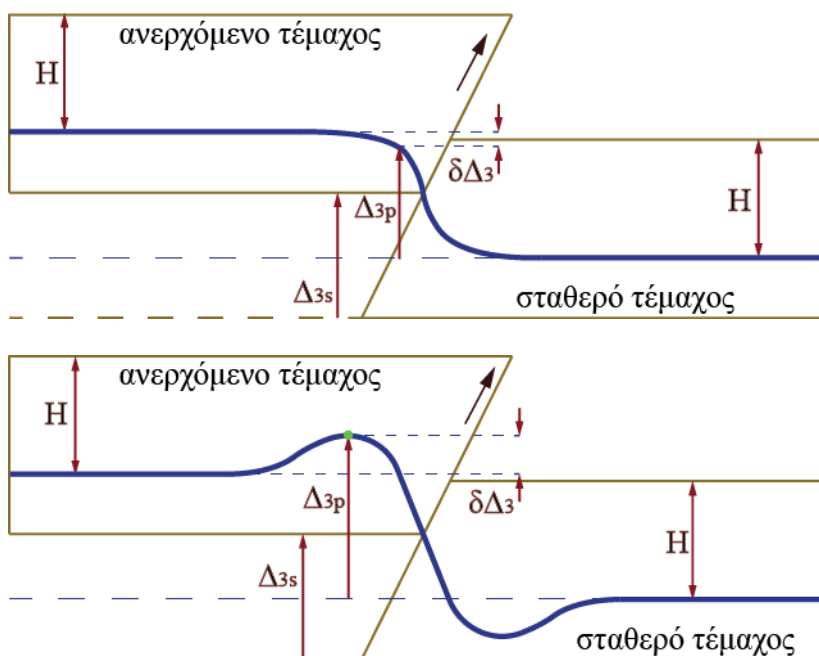
4.4 Καθολικός λυγισμός αγωγού

Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω της ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος και των συνεπαγόμενων μεγάλων αναπτυσσόμενων θλιπτικών δυνάμεων υλοποιείται αξιοποιώντας το αριθμητικό προσομοίωμα της παραγράφου 3.3. Ο λόγος διαμέτρου προς πάχος (D/t) καθορίζει τη μορφή λυγισμού τα αγωγού. Έτσι, για βαθιά θαμμένους αγωγούς αναμένεται να κυριαρχήσει ο τοπικός λυγισμός ως μορφή αστοχίας, ενώ για τους ρηχά θαμμένους ενδέχεται να είναι κρίσιμος ο καθολικός λυγισμός [4]. Κατά το σχεδιασμό του αγωγού κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση της αλληλουχίας των πιθανών μορφών αστοχίας, ώστε αφενός να αναδειχθεί η κρίσιμη μορφή αστοχίας, αφετέρου δε να αξιολογηθεί η συνολική συμπεριφορά του φορέα, τόσο για το συνεχές αγωγό, όσο και για τον αγωγό με κόμβους.

Το φαινόμενο του λυγισμού χαρακτηρίζεται από έντονη γεωμετρική μη-γραμμικότητα όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα διατυπώνονται στην παραμορφωμένη

κατάσταση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Έτσι, η μελέτη της προλυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του φορέα πραγματοποιείται μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού, ώστε να αποτιμηθεί η αλληλεπίδραση του λυγισμού και της αστοχίας του υλικού.

Καθώς το υπό εξέταση πρόβλημα θεωρείται διοδιάστατο, στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του αγωγού και του εδάφους, όπου H είναι το βάθος ταφής του αγωγού, Δ_{3s} είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος, Δ_{3p} είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού, και $\delta\Delta_3 = \Delta_{3p} - \Delta_{3s}$ είναι η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, στο Σχήμα 3.3(α) απεικονίζεται η περίπτωση όπου $\delta\Delta_3 < 0$ για μικρή μετακίνηση του ανερχόμενου τεμάχου του ρήγματος και στο Σχήμα 3.3(β) απεικονίζεται η περίπτωση όπου $\delta\Delta_3 > 0$ για μεγάλη μετακίνηση του ανερχόμενου τεμάχου του ρήγματος, οπότε η παραμόρφωση του αγωγού αποκτά χαρακτηριστικά καθολικού λυγισμού.



Σχήμα 3.3: Ορισμός κατακορύφων μετακινήσεων αγωγού και ρήγματος

Figure 3.3: Fault and pipeline vertical displacements

4.5 Κίνδυνος καθολικού λυγισμού

Ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού του αγωγού εξετάζεται συναρτήσει των άλλων ενδεχόμενων μορφών αστοχίας του αγωγού, ήτοι της αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων και του τοπικού λυγισμού του τοιχώματος λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων. Η προσομοίωση του αγωγού, όμως, με πεπερασμένα στοιχεία δοκού δεν επιτρέπει την άμεση παρατήρηση φαινομένων τοπικού λυγισμού ούτε θραύσης των συγκολλήσεων. Έτσι, η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό και θραύση συγκολλήσεων πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις

μέγιστες αναπτυσσόμενες ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής με τα κανονιστικώς προτεινόμενα όρια διαμήκων παραμορφώσεων έναντι αυτών των μορφών αστοχίας. Για τα όρια των διαμήκων θλιπτικών και εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων υιοθετούνται οι προτεινόμενες σχέσεις του ALA [3]. Συγκεκριμένα, το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων ($\varepsilon_{c,lim}$) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ. (3-1) και το όριο εφελκυστικών παραμορφώσεων ($\varepsilon_{t,lim}$) σύμφωνα με την εξ. (3-2), όπου D η διάμετρος του αγωγού, t το πάχος τοιχώματος, E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, p η εσωτερική πίεση και D_{min} η εσωτερική διάμετρος του αγωγού.

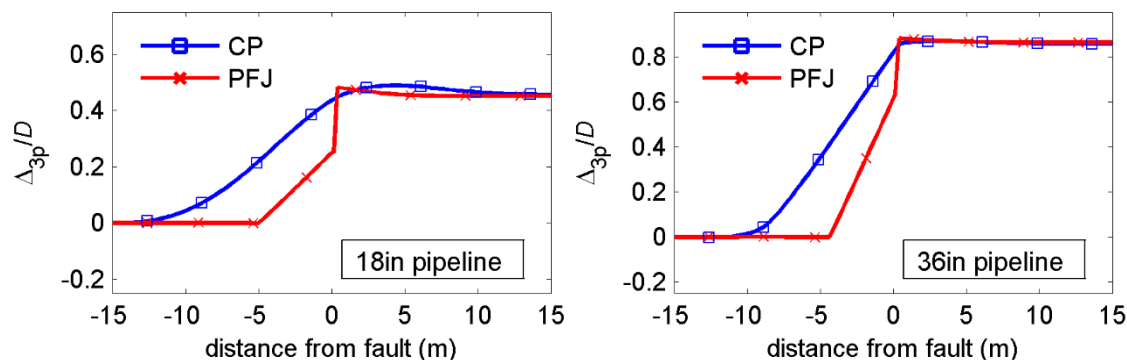
$$\varepsilon_{c,lim} = 0.50 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0,0025 + 3000 \left(\frac{pD}{2Et} \right)^2 \quad (3-1)$$

$$\text{όπου } D' = \frac{D}{1 - \frac{3}{D}(D - D_{min})}$$

$$\varepsilon_{t,lim} = 2\% \quad (3-2)$$

Το υπολογιζόμενο σύμφωνα με την εξ. (3-1) όριο θλιπτικών παραμορφώσεων περιέχει και έναν όρο για την εσωτερική πίεση του αγωγού, η οποία στην πραγματικότητα δρα «ανακουφιστικά» έναντι την εξωτερικής εδαφικής πίεσης. Επί το δυσμενέστερο η εσωτερική πίεση θεωρείται μηδενική και ο αντίστοιχος τελευταίος όρος της εξ. (3-1) απαλείφεται. Έτσι, εφαρμόζοντας την εξ. (3-1) προκύπτει ότι το όριο των διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων για τον αγωγό διαμέτρου 36in ισούται με 0.37% και για τον αγωγό διαμέτρου 18in με 0.91%.

Εξετάζονται τόσο οι συνεχείς αγωγοί (CP), όσο και οι αγωγοί με εύκαμπτους κόμβους (PFJ). Αρχικά, στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται οι μετακινήσεις του συνεχούς αγωγού και του αγωγού με εύκαμπτους κόμβους. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η απόσταση από το ίχνος του ρήγματος και στον κατακόρυφο η αδιαστατοποιημένη μετακίνηση του αγωγού. Η πρώτη σημαντική διαπίστωση είναι ότι η παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού μοιάζει με μία ομαλή καμπύλη, ενώ του αγωγού με κόμβους με μία τεθλασμένη γραμμή από διαδοχικά, περίπου ευθύγραμμα τμήματα. Επίσης, διαπιστώνεται ότι η παραμόρφωση του PFJ είναι πολύ έντονη συγκριτικά με του CP, λόγω της μεγάλης στροφής των κόμβων. Οι μετακινήσεις του εδάφους και του αγωγού για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις παρατίθενται στον Πίνακα 3.1, όπου εξετάζεται η σχετική διαφορά της μετακίνησης Δ_3 για τη θέση του αγωγού με τη μέγιστη μετακίνηση Δ_{3p} , σύμφωνα με το Σχήμα 3.3. Προκύπτει ότι δεν υπάρχει κίνδυνος καθολικού λυγισμού ούτε για το συνεχή αγωγό, ούτε για τον αγωγό με κόμβους.



Σχήμα 3.4: Μετακινήσεις συνεχούς αγωγού (CP) και αγωγού με κόμβους (PFJ)

Figure 3.4: Displacements of continuous pipeline (CP) and pipeline with flexible joints (PFJ)

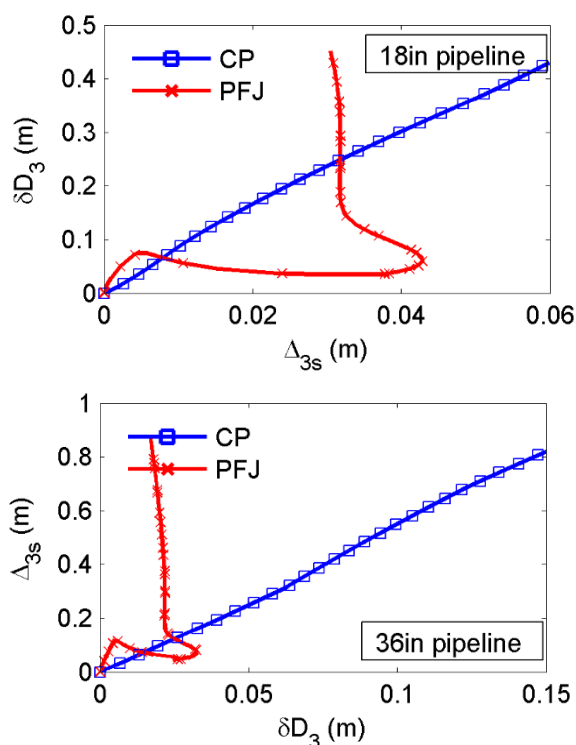
Πίνακας 3.1: Μετακινήσεις αγωγού και εδάφους.

Table 3.1: Soil and pipeline displacements

Αγωγός	Διάμετρος (mm)	Δ/D	Δ_{3s} (m)	Δ_{3p} (m)	$\delta\Delta_3 = \Delta_{3p} - \Delta_{3s}$ (m)
CP	914	1.00	0.86	0.87	0.01
PFJ	914	1.00	0.86	0.88	0.02
CP	457	1.00	0.43	0.49	0.06
PFJ	457	1.00	0.43	0.48	0.05

Κατά την ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος ο αγωγός υπόκειται σε ιδιαίτερος έντονη θλίψη και κάμψη. Η εισαγωγή, όμως, των εύκαμπτων κόμβων στο συνεχή αγωγό μετατρέπει το συνεχές στατικό σύστημα σε σπονδυλωτό, καθώς οι κόμβοι δρουν ως εσωτερικές αρθρώσεις. Έτσι, αναμένεται να είναι σημαντικά διαφορετική η απόκριση του συνεχούς αγωγού συγκριτικά με τον αγωγό με κόμβους. Τούτο προκύπτει χαρακτηριστικά, εάν συγκρίνουμε τους δρόμους ισορροπίας του CP και του PFJ. Για τη δημιουργία του δρόμου ισορροπίας επιλέγεται ως χαρακτηριστικό σημείο του αγωγού, αυτό το οποίο μετά την ενεργοποίηση του ρήγματος έχει τη μεγαλύτερη τιμή Δ_{3p} . Οι δρόμοι ισορροπίας των αγωγών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.5, όπου στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η σχετική μετακίνηση $\delta\Delta_3$ και στον κατακόρυφο άξονα η κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος Δ_{3s} . Διαπιστώνεται ότι η απόκριση του συνεχούς αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος είναι ομαλή και περίπου γραμμική. Αντίθετα η απόκριση του αγωγού με κόμβους είναι εντόνως μη γραμμική, καθώς ο δρόμος ισορροπίας εμφανίζεται να αλλάζει φορά. Τούτο δικαιολογείται από τη μετακίνηση του σημείου, η οποία σχετίζεται με τη στροφή των κόμβων και την αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους σε αυτήν τη στροφή. Σημειώνεται, επίσης, ότι για κατακόρυφη μετακίνηση ρήγματος $\Delta_{3s}=0.39\text{m}$ εμφανίζεται η πρώτη

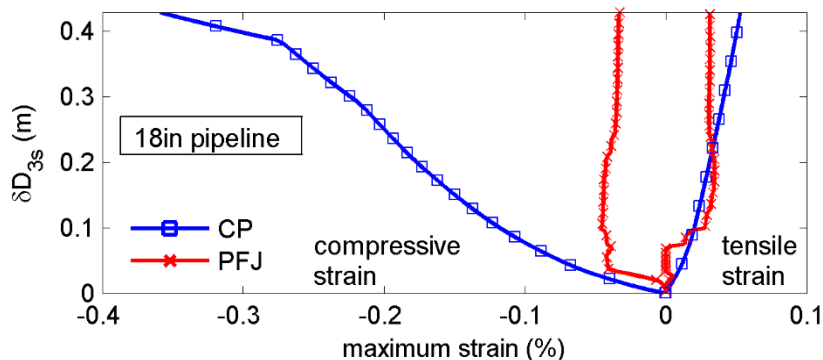
πλαστικοποίηση στον αγωγό διαμέτρου 18in, δηλαδή σε στάθμη μετακίνησης ρήγματος μικρότερη από τη μέγιστη επιβαλλόμενη $\Delta/D=1$.



Σχήμα 3.5: Δρόμος ισορροπίας συνεχούς αγωγού (CP) και αγωγού με κόμβους (PFJ)

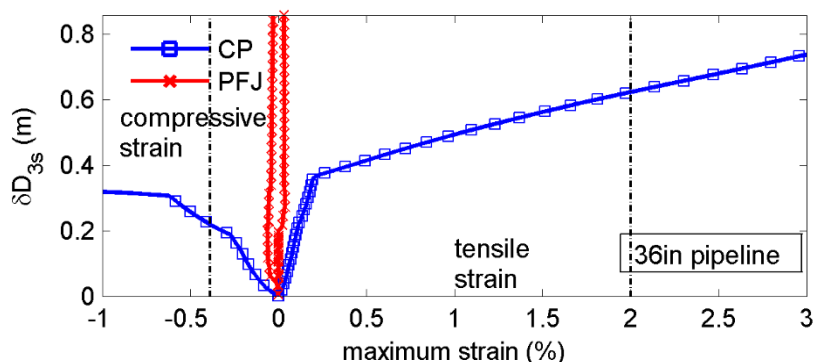
Figure 3.5: Equilibrium path of continuous pipeline (CP) and pipeline with flexible joints (PF)

Ο έλεγχος της ακεραιότητας των υπόγειων αγωγών έναντι επιβαλλόμενων μεγάλων εδαφικών παραμορφώσεων πραγματοποιείται σε όρους παραμορφώσεων. Για αυτό το λόγο η ενδεχόμενη αστοχία του ελαστοπλαστικού αγωγού από τοπικό λυγισμό ή θραύση των συγκολλήσεων εξετάζεται αξιοποιώντας το δρόμο ισορροπίας των ανηγμένων παραμορφώσεων, δηλαδή την εξέλιξη των μέγιστων θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τη σταδιακή επιβολή της εδαφικής μετακίνησης Δ_{3s} . Έτσι, το Σχήμα 3.6 και το Σχήμα 3.7 για τον αγωγό διαμέτρου 18in και τον αγωγό διαμέτρου 36in αντίστοιχα, παρουσιάζουν τη συνολική εξέλιξη των διαμήκων παραμορφώσεων συναρτήσει της μετακίνησης Δ_{3s} , όπου με αρνητικό πρόσημο παρουσιάζονται οι θλιπτικές παραμορφώσεις και με θετικό οι εφελκυστικές. Διαπιστώνεται καταρχήν και στις δύο περιπτώσεις διαμέτρου αγωγού, ότι η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων οδηγεί σε σημαντική μείωση, ιδιαίτερα των αναπτυσσόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων. Ειδικότερα για τον αγωγό διαμέτρου 18in (Σχήμα 3.6) τόσο ο CP, όσο και ο PFJ δεν κινδυνεύουν από εφελκυστική αστοχία των συγκολλήσεων (εφελκυστικές παραμορφώσεις πολύ μικρότερες του ορίου 2%), αλλά ούτε και από τοπικό λυγισμό (θλιπτικές παραμορφώσεις πολύ μικρότερες του ορίου 0.91%). Αντιθέτως, ο συνεχής αγωγός διαμέτρου 36in (Σχήμα 3.7) αναμένεται να υποστεί τοπικό λυγισμό για πολύ μικρή μετακίνηση ρήγματος.



Σχήμα 3.6: Εξέλιξη εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων αγωγών συνεχούς αγωγού (CP) και αγωγού με κόμβους (PFJ) για τον αγωγό διαμέτρου 18in

Figure 3.6: Development of tensile and compressive strains of continuous pipeline (CP) and pipeline with flexible joints (PFJ) for 18in pipeline



Σχήμα 3.7: Εξέλιξη εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων αγωγών συνεχούς αγωγού (CP) και αγωγού με κόμβους (PFJ) για τον αγωγό διαμέτρου 36in

Figure 3.7: Development of tensile and compressive strains of continuous pipeline (CP) and pipeline with flexible joints (PFJ) for 36in pipeline

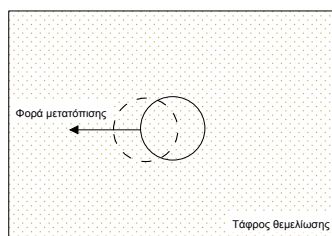
Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για συνεχή αγωγό και αγωγό με εόκαμπτους κόμβους για λόγο $D/t=36$ και $D/t=72$, οι οποίοι είναι θαμμένοι ρηγά και βαθύτερα αντίστοιχα, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει κίνδυνος καθολικού λυγισμού. Η εισαγωγή των εόκαμπτων κόμβων σε κάθε περίπτωση οδηγεί σε σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, μειώνοντας σημαντικά τον κίνδυνο τοπικού λυγισμού ή εφελκυστικής αστοχίας. Συγκρίνοντας τους συνεχείς αγωγούς συναρτήσε της αλληλουχίας εμφάνισης των μορφών αστοχίας διαπιστώθηκε ότι ο αγωγός 36in αναμένεται να αστοχήσει αρχικά λόγω τοπικού λυγισμού για μικρή τιμή της επιβαλλόμενης ανάστροφης διάρρηξης. Από την άλλη πλευρά, ο αγωγός 18in αναμένεται να υποστεί πλαστικοποίηση για μετακίνηση του ανάστροφου ρήγματος λίγο μικρότερη από $\Delta/D=1$.

Επιρροή Περιμετρικού Εδάφους στα Χαρακτηριστικά των Εδαφικών Ελατηρίων

5.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης υπόγειου χαλύβδινου αγωγού εγκιβωτισμένου εντός ορθογωνικού σκάμματος εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο. Το ορθογωνικό σκάμμα έχει περιορισμένες διαστάσεις και επίχωση ξηρής άμμου και αφορά τη διέλευση του υπόγειου αγωγού κατά τη διασταύρωσή του με ενεργό ρήγμα. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου «θεμελίωσης» του αγωγού, στις αναπτυσσόμενες εδαφικές αντιδράσεις κατά την πλευρική μετατόπισή του.

Οι έως τώρα οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών βασίζονται σε πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις, τα οποία θεωρούν θεμελίωση του αγωγού εντός άμμου επίχωσης μεγάλης έκτασης στο εγκάρσιο ως προς τον άξονα του αγωγού επίπεδο, χωρίς δηλαδή να συνυπολογίζεται το γεγονός ότι ο αγωγός κατά τη συνήθη πρακτική εγκιβωτίζεται εντός τάφρου θεμελίωσης αρκετά περιορισμένων διαστάσεων. Η ανάπτυξη επιπρόσθετων εδαφικών αντιδράσεων, λόγω της παρεμπόδισης της ελεύθερης εκδήλωσης της επιφάνειας αστοχίας εντός της τάφρου θεμελίωσης είναι ο κύριος στόχος προς διερεύνηση. Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος που εξετάζεται παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Αγωγός εντός τάφρου θεμελίωσης, υποβαλλόμενος σε πλευρική μετατόπιση

Figure 4.1: Buried pipeline embedded in trench under lateral imposed displacement

5.2 Αριθμητική προσομοίωση

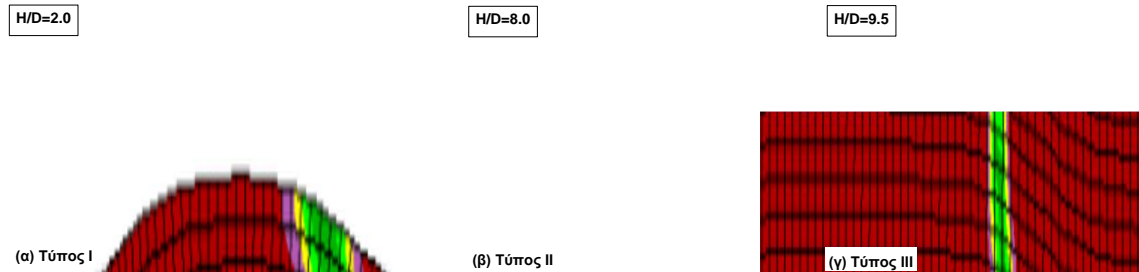
Σε πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε αριθμητική μεθοδολογία για την προσομοίωση του προβλήματος που εξετάζεται, με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0 [5]. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Επιπρόσθετα, για την ακριβέστερη προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους κατά τη μετακίνησή του, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements) με μειωμένη γωνία τριβής. Τέλος, λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του προβλήματος που εξετάζεται και της επιβολής μεγάλων μετακινήσεων, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα που δίνει ο κώδικας για συνεχή ανανέωση των συντεταγμένων των κόμβων (large strain mode), καθώς και η δυνατότητα αναδιάταξης του καννάβου με βάση την τρέχουσα παραμορφωσιακή κατάσταση (automatic rezoning). Κατόπιν της κατάστρωσης της αριθμητικής προσομοίωσης του προβλήματος, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση-αξιολόγησή της με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των Trautmann και O'Rourke [6] καθώς και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων των Kouretzis et al. [7], για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των παραγόμενων αποτελεσμάτων πριν την έναρξη των παραμετρικών αναλύσεων.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Kouretzis et al. [7], δίνει μία ξεκάθαρη εικόνα όσον αφορά τη μορφή και την έκταση της επιφάνειας αστοχίας που προκύπτει για βάθη εγκιβωτισμού που δεν ξεπερνάνε την τιμή $H/D=5.5$ (όπου H απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού και D η διάμετρος του αγωγού). Στο πλαίσιο της έρευνας αυτής επιδιώχθηκε να διευρυνθεί το φάσμα αυτό και σε αρκετά μεγαλύτερα βάθη θεμελίωσης, καθώς η μορφή και η έκταση της σχηματιζόμενης επιφάνειας αστοχίας αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην κατανόηση των αναπτυσσόμενων εδαφικών αντιδράσεων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων πλευρικής μετακίνησης αγωγού στο ελεύθερο πεδίο για λόγους εγκιβωτισμού με τιμές από $H/D=1.5$ έως $H/D=16$. Τα ευρήματα των αναλύσεων αυτών καταδεικνύουν την ύπαρξη τριών χαρακτηριστικών τύπων αστοχίας:

- Ο τύπος αστοχίας I αναπτύσσεται για λόγους εγκιβωτισμού μικρότερους ή ίσους με την τιμή $H/D=4.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας, και με την τιμή $H/D=6.0$ για χαλαρή άμμο. Στον τύπο αυτό, η επιφάνεια αστοχίας που δημιουργείται εκτείνεται έως την επιφάνεια και συνοδεύεται από την ανάπτυξη δύο εδαφικών πρισμάτων (ενεργητικού και παθητικού).
- Ο τύπος αστοχίας III αναπτύσσεται για λόγους εγκιβωτισμού με τιμές μεγαλύτερες του $H/D=9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και του $H/D=10$ για χαλαρή άμμο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ανάπτυξη μίας τοπικής επιφάνειας αστοχίας, η οποία περιβάλλει τον αγωγό.
- Ο τύπος αστοχίας II αφορά τις ενδιάμεσες τιμές λόγων εγκιβωτισμού, δηλαδή για $4.5 < H/D < 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και $6.0 < H/D < 10$ για χαλαρή άμμο. Η

επιφάνεια αστοχίας που αναπτύσσεται παύει να εκτείνεται έως την επιφάνεια του εδάφους και αρχίζει να προσεγγίζει τον αγωγό.

Οι χαρακτηριστικές επιφάνειες αστοχίας που αναπτύσσονται για κάθε έναν από τους τρεις τύπους που περιγράφηκαν, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2:



Σχήμα 4.2: Οι τρεις διαφορετικές μορφές αστοχίας, για (α) μικρά, (β) μεσαία και (γ) μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού του αγωγού

Figure 4.2: Three different failure modes for (a) small, (b) medium and (c) large depths of pipeline embedment

5.3 Παραμετρικές αναλύσεις

Η έκταση “x” της επιφάνειας αστοχίας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$x / D = \left\{ \begin{array}{ll} 3 + 0.1 \cdot (H / D)^a, & H / D \leq (H / D)_{I-II} \\ -1.2 \cdot (H / D) + 13.1, & (H / D)_{I-II} < H / D < (H / D)_{II-III} \\ \beta, & H / D \geq (H / D)_{II-III} \end{array} \right\}, \quad (4-1)$$

Πίνακας 4.1: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης υπολογισμού του λόγου x/D

Table 4.1: Basic parameters of analytical calculation of ratio x/D

Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Παράμετρος α	Παράμετρος β	(H/D) _{I-II}	(H/D) _{II-III}
Χαλαρή	1.88	1.10	6.0	10.0
Μέσης πυκνότητας	2.41	1.70	4.8	9.50

Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Επίδραση της μείωσης της οριζόντιας απόστασης “x” από το κέντρο του αγωγού, μετά την μετατόπισή του, έως την κατακόρυφη παρειά της τάφρου.

- Επίδραση της μείωσης της κατακόρυφης απόστασης “d” από το κατώτατο σύνορο του αγωγού έως την οριζόντια παρειά της τάφρου.

Για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες εξετάστηκε ξεχωριστά η επίδραση στο οριακό φορτίο p_{ult} που αναπτύσσεται επί του αγωγού, και στην οριακή μετατόπιση y_{ult} στην οποία αυτό παρουσιάζεται. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων έγινε φανερή η έντονη επίδραση της μείωσης της οριζόντιας απόστασης x στην αναπτυσσόμενη καταπόνηση επί του αγωγού. Η επίδραση αυτή φάνηκε να φθίνει με την αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού. Αντιθέτως, η μείωση της κατακόρυφης απόστασης d δε φάνηκε να επηρεάζει αισθητά τις εδαφικές αντιδράσεις για βάθη εγκιβωτισμού που υπεισέρχονται στις μορφές αστοχίας τύπου I και II, ενώ παρουσίασε μόνο ελαφρά αυξητική επίδραση στα μέγιστα φορτία κατόπιν της μετάβασης στην αστοχία τύπου III.

5.4 Προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις

Οι προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις για τους διορθωτικούς συντελεστές ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) και ($y_{ult}/y_{ult,inf}$), όπου $p_{ult,inf}$ και $y_{ult,inf}$ τα αντίστοιχα μεγέθη, για περιπτώσεις πλευρικής μετατόπισης αγωγών στο ελεύθερο πεδίο, είναι:

5.4.1 Επίδραση πλάτους της τάφρου (απόσταση “x”)

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \begin{cases} \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^a, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases} \quad (4-2)$$

όπου ο συντελεστής a προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases} \quad (4-3)$$

Πίνακας 4.2: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για το διορθωτικό συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) του οριακού φορτίου

Table 4.2: Basic parameters of analytical expressions for the correction factor ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) of ultimate load

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	α_{res}	β
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.48	0.12
Μέσης ποκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.48	0.12

$$\frac{y_{ult}}{y_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases} \quad (4-4)$$

όπου η σταθερά c προσδιορίζεται ως εξής:

$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases} \quad (4-5)$$

Πίνακας 4.3: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για το διορθωτικό συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) της οριακής μετατόπισης

Table 4.3: Basic parameters of analytical expressions for the correction factor ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) of ultimate displacement

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	c_{res}	δ
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.9	0.24
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.9	0.24

5.4.2 Επίδραση απόστασης “d” από το οριζόντιο σόνορο της τάφρου

Πίνακας 4.4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) για $(d/D) < 1$

Table 4.4: Correction coefficient ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) for $(d/D) < 1$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$p_{ult}/p_{ult,inf}$
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.1 ± 0.10
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20
3	μέση	$H/D < 9.5$	1.0 ± 0.10
4	μέση	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

Πίνακας 4.5: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($y_{ult}/y_{ult,inf}$) για $(d/D) < 1$

Table 4.5: Correction coefficient ($y_{ult}/y_{ult,inf}$) for $(d/D) < 1$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$y_{ult}/y_{ult,inf}$
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.0
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2
3	μέση	$H/D \leq 9.5$	0.8
4	μέση	$H/D > 9.5$	1.2

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($y_{ult}/y_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση της μείωσης του πλάτους της τάφρου θεμελίωσης σε όρους παραμόρφωσης στον αγωγό, με χρήση των διορθωτικών συντελεστών για τα οριζόντια εδαφικά ελατήρια, που προέκυψαν με βάση τις προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση της μεθοδολογίας των Karamitros et al. [8]. Η παραπάνω διαδικασία υπέδειξε πως η μείωση του πλάτους της τάφρου θεμελίωσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των παραμορφώσεων του αγωγού έως και 300%.

Αριθμητική Μεθοδολογία Επίλυσης Αγωγών με Εύκαμπτους Κόμβους

6.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόκρισης υπόγειων μεταλλικών αγωγών υπό διάρρηξη σεισμικού ρήγματος. Για την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά μοντέλα:

Το πρώτο είναι το μοντέλο δοκού επί ελατηριωτού εδάφους (beam-type model), όπου ο αγωγός διακριτοποιείται με στοιχεία δοκού και το περιβάλλον έδαφος μέσω μίας σειράς μη-γραμμικών ελατηρίων σε τέσσερις διευθύνσεις, βάσει του εδαφικού μοντέλου Winkler. Το beam-type model χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς σε πρακτικές εφαρμογές, αλλά και από τους ερευνητές προκειμένου να εκτιμηθεί η ακεραιότητα του αγωγού λόγω διάρρηξης ρήγματος. Οι Joshi et al. [9] εφάρμοσαν το μοντέλο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του αγωγού υπό ανάστροφη διάρρηξη, ενώ οι Uckan et al. [10] παρουσίασαν μία απλοποιημένη εκδοχή αυτού για να υπολογίσουν το κρίσιμο μήκος του αγωγού και ως βάση για την ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη δημιουργία καμπυλών τρωτότητας του αγωγού. Επιπροσθέτως, το beam-type model υιοθετείται από όλους τους σύγχρονους κανονισμούς, όπως ο Ευρωκώδικας 8 [11] και ο ALA [3] δεδομένης της αξιοπιστίας του και της υπολογιστικής αποδοτικότητάς του.

Το δεύτερο μοντέλο είναι το συνεχές (continuum model), όπου ο αγωγός προσομοιώνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements) και το περιβάλλον έδαφος με τρισδιάστατα χωρικά στοιχεία (3D solid elements). Η αλληλεπίδραση αγωγού - εδάφους προσομοιώνεται με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Οι πρώτες προσπάθειες εφαρμογής του συνεχούς μοντέλου λαμβάνοντας υπόψη τα θέματα επαφής αγωγού - εδάφους παρουσιάστηκαν από τους Kokavessis και Anagnostidis [12] και τους Odina και Tan [13]. Πρόσφατα, οι Vazouras et al. [14-16] παρουσίασαν ένα αυστηρό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τη διασταύρωση αγωγού - ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Οι συγγραφείς πραγματοποίησαν παραμετρικές αναλύσεις για τη διερεύνηση της επιρροής των εδαφικών παραμέτρων,

της γωνίας διασταύρωσης αγωγού - ρήγματος και των μηχανικών χαρακτηριστικών του αγωγού, προκειμένου να καταλήξουν σε μία απλοποιημένη σχέση για τον υπολογισμό της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης λυγισμού. Το μοντέλο αυτό υιοθετήθηκε από τους Zhang et al. [17] και τον Trifonov [18], προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαστάσεις του ορύγματος, τα χαρακτηριστικά του μητρικού εδάφους και η προσομοίωση της κίνησης του ρήγματος. Ως εναλλακτική προσέγγιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη-γραμμικά ελατήρια για την προσομοίωση του εδάφους, αντί των χωρικών στοιχείων, προκειμένου να αποφευχθούν οι δυσκολίες που επιφέρει η χρήση στοιχείων επαφής [8].

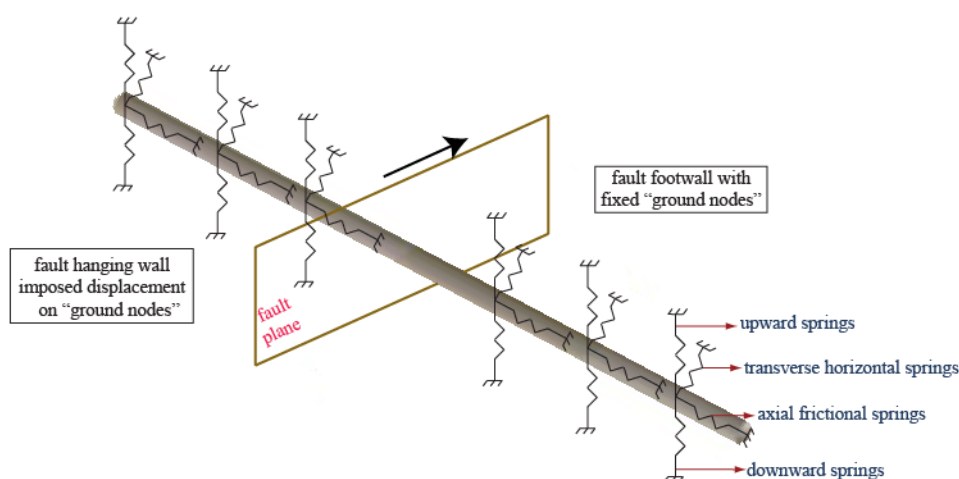
6.2 Επιλογή αριθμητικής μεθοδολογίας

Η αριθμητική προσομοίωση της διασταύρωσης αγωγού - ρήγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με το μοντέλο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους, είτε με το συνεχές μοντέλο. Η υιοθέτηση του μοντέλου δοκού επιτρέπει τον υπολογισμό αφενός των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στον αγωγό, αφετέρου των τάσεων και των παραμορφώσεων σε σημεία ολοκλήρωσης επί διατομών κατά μήκος του αγωγού. Η γεωμετρική μη-γραμμικότητα και οι μη-γραμμικές ιδιότητες του χάλυβα και του εδάφους μπορούν να ληφθούν υπόψη. Η χρήση, όμως, του μοντέλου δοκού δεν επιτρέπει την απευθείας αποτίμηση του τοπικού λυγισμού, της οβαλοποίησης της διατομής και της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων στην περιφέρεια του αγωγού/κυλινδρικού κελύφους. Οι διαστάσεις του ορύγματος και τα εδαφικά χαρακτηριστικά του μητρικού εδάφους εκτός του ορύγματος δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη. Ως εκ τούτου, ο έλεγχος για πιθανή αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού ή εφελκυστικής θραύσης πραγματοποιείται με σύγκριση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων με τα κανονιστικά όρια. Η χρήση του συνεχούς μοντέλου μπορεί να υπερκεράσει τα μειονεκτήματα του μοντέλου δοκού. Σε αυτήν την περίπτωση, η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού - εδάφους με χρήση στοιχείων επαφής είναι μία κρίσιμη παράμετρος της διαδικασίας αριθμητικής προσομοίωσης. Η εφαρμογή του συνεχούς μοντέλου επιτρέπει την αποτίμηση του τοπικού λυγισμού και την επιρροή της εσωτερικής πίεσης. Οι διαστάσεις του ορύγματος και τα χαρακτηριστικά του μητρικού εδάφους μπορούν να ληφθούν υπόψη, ενώ δύνανται να χρησιμοποιηθούν ακριβέστεροι νόμοι υλικού για το έδαφος. Παρ' όλα αυτά, αυτή η αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος οδηγεί σε σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου και της υπολογιστικής προσπάθειας, λόγω αυξημένου χρόνου επίλυσης, ειδικών συνοριακών συνθηκών, υπερβολικά μεγάλου αριθμού βαθμών ελευθερίας, ακριβέστερης προσομοίωσης της διάρρηξης και ειδικότερα χρήσης στοιχείων επαφής που αυξάνουν τη δυσκολία σύγκλισης του αριθμητικού αλγορίθμου.

Η προσομοίωση του επιπέδου του ρήγματος και της κίνησης αυτού αποτελούν σημαντικές παραμέτρους της αριθμητικής προσομοίωσης. Η εφαρμογή του μοντέλου δοκού τείνει να απλοποιήσει την κατάσταση, καθώς οι εδαφικοί κόμβοι στο σταθερό τέμαχος του ρήγματος θεωρούνται πακτωμένοι, ενώ στους αντίστοιχους του κινούμενου τεμάχους επιβάλλεται η μετακίνηση του ρήγματος. Αντιθέτως, η προσομοίωση του εδάφους με χωρικά στοιχεία στο συνεχές μοντέλο απαιτεί την

προσομοίωση του επιπέδου του ρήγματος. Έτσι, απαιτούνται ειδικές συνοριακές συνθήκες στο μοντέλο και ιδιαίτερα στις εξωτερικές επιφάνειες των εδαφικών τεμαχών, προκειμένου να προσομοιωθούν οι πραγματικές εδαφικές συνθήκες.

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης οδηγεί στο συμπέρασμα πως το μοντέλο δοκού (Σχήμα 5.1) είναι καταλληλότερο για πρακτικές εφαρμογές, αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι ένας αγωγός που διέρχεται από μία σεισμογενή περιοχή είναι πολύ πιθανό να διασταυρωθεί με περισσότερα του ενός ρήγματα. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο Trans Adriatic Pipeline που διασχίζει την Τουρκία, την Ελλάδα και μέρος της Ιταλίας. Επίσης, το χρονικό και υπολογιστικό κόστος του αριθμητικού μοντέλου είναι σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν την απόφαση του μελετητή μηχανικού σχετικά με το ποιο αριθμητικό μοντέλο θα επιλέξει. Βάσει των ανωτέρω επιλέγεται και προτείνεται το μοντέλο δοκού επί ελατηριωτού εδάφους για τη διερεύνηση της αποδοτικότητας των εύκαμπτων κόμβων στην προστασία του υπόγειου μεταλλικού αγωγού έναντι αστοχίας λόγω σεισμικής διάρρηξης.



Σχήμα 5.1: Αριθμητικό μοντέλο δοκού επί ελατηριωτού εδάφους για την προσομοίωση της διασταύρωσης υπόγειου αγωγού - ρήγματος

Figure 5.1: Beam-type finite element model for buried pipeline – fault crossing

6.3 Προσομοίωση εύκαμπτου κόμβου

Οι εύκαμπτοι κόμβοι δύνανται να προσομοιωθούν ως

- ένα γενικό γραμμικό πεπερασμένο στοιχείο, του οποίου το μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται από τις σταθερές ελατηρίων που δίνει ο κατασκευαστής του κόμβου,
- ως ένας γενικός εύκαμπτος κόμβος, ο οποίος προσομοιώνεται με ένα στροφικό ελατήριο, ενώ το μήκος του αγνοείται [19].

Για πρακτικές εφαρμογές επιλέγεται η δεύτερη προσέγγιση προσομοίωσης, η οποία είναι απόλυτα συμβατή με το μοντέλο δοκού. Η αξονική και η πλευρική μετακίνηση του κόμβου στα άκρα δεσμεύονται μέσω κατάλληλων εξισώσεων δέσμευσης [20]. Η στρέψη απαγορεύεται εν γένει από τους κατασκευαστές των κόμβων [19] και ως εκ τούτου η στροφή περί το διαμήκη άξονα πρέπει να δεσμεύεται μέσω κατάλληλων εξισώσεων/δεσμεύσεων.

6.3.1 Προσομοίωση διάρρηξης ρήγματος

Οι σεισμοί είναι τυπικά φυσικά δυναμικά φαινόμενα που οφείλονται στη σχετική κίνηση των τεκτονικών πλακών του φλοιού της γης. Η διάρρηξη ρήγματος, παρ' όλα αυτά, θεωρείται συνήθως στις μη-γραμμικές αναλύσεις ως μία ημι-στατική διαδικασία. Η μετακίνηση του ρήγματος εφαρμόζεται ως επιβαλλόμενη μετακίνηση στους «κόμβους εδάφους» με επαρκώς μικρό ρυθμό προκειμένου να είναι σε θέση ο μηχανικός να αμελήσει τη δυναμική φύση του προβλήματος. Η εγγενής μη-γραμμικότητα του προβλήματος αντιμετωπίζεται με εφαρμογή μη-γραμμικών αλγορίθμων, όπως Newton-Raphson ή Arc-Length, όπου το μη-γραμμικό πρόβλημα επιμερίζεται σε μεγάλο πλήθος γραμμικών με εφαρμογή της επιβαλλόμενης μετακίνησης σε βήματα μέσω μίας γραμμικής συνάρτησης «χρόνου». Η σύγκλιση του αλγορίθμου και η ομαλή επιβολή της μετακίνησης επιτυγχάνεται με την επιλογή κατάλληλου πλήθους βημάτων της ανάλυσης, τέτοιου ώστε η εφαρμογή του εξωτερικού φορτίου να ακολουθεί ομαλά την εξέλιξη της απόκρισης της κατασκευής.

Περίληψη - Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του εν λόγω παραδοτέου παρουσιάστηκε η βαθμονόμηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων με βάση τις πειραματικές δοκιμές, η αριθμητική διερεύνηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, η επιρροή του περιμετρικού εδάφους στα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων καθώς και η μεθοδολογία αριθμητικής επίλυσης αγωγών με εύκαμπτους κόμβους.

7.2 Βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων με σύγκριση με πειράματα

Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Adina, τόσο για το συνεχές δοκίμιο όσο και για το δοκίμιο με τους κόμβους, με σκοπό να ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα του προβλήματος και η μη γραμμικότητα του υλικού, ενώ παράλληλα να περιοριστούν σε λογικά πλαίσια οι υπολογιστικές απαιτήσεις. Χρησιμοποιήθηκαν ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση του αγωγού και στις δύο περιπτώσεις δοκιμών, ενώ οι εύκαμπτοι κόμβοι προσομοιώθηκαν με δύο μετακινησιακά και ένα στροφικό ελατήριο. Ο νόμος υλικού λήφθηκε από τις δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμιο χάλυβα.

7.3 Πιστοποίηση αριθμητικών προσομοιωμάτων με σύγκριση με τη βιβλιογραφία

Η πιστοποίηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων και των αριθμητικών μεθόδων και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται πραγματοποιείται μέσω μόρφωσης αριθμητικών προσομοιωμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με αριθμητικά πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Έτσι, επιλέγεται η προσομοίωση πειράματα αγωγού κάμψης τεσσάρων σημείων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζουν πολύ καλή σύγκλιση με τα πειραματικά.

7.4 Αξιολόγηση κινδύνου καθολικού λυγισμού

Ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού υπόγειου αγωγού με εύκαμπτους κόμβους εξετάζεται στην περίπτωση που ο αγωγός υπόκειται σε ανάστροφη διάρρηξη. Ο καθολικός λυγισμός ενδέχεται να προκληθεί από επιβολή μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων, όπως στην περίπτωση που ο αγωγός υπόκειται σε ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος. Κανονιστικά και βιβλιογραφικά δεν υπάρχουν σαφείς οδηγίες για τον έλεγχο έναντι αστοχίας από καθολικό λυγισμό και γιαυτό το λόγο εξετάζεται το ενδεχόμενο αυτό σε σύγκριση με άλλες μορφές αστοχίας. Επίσης, αναφορικά με τους αγωγούς με κόμβους, η εισαγωγή τους στον αγωγό εγείρει το ερώτημα πιθανής μείωσης της καθολικής δυσκαμψίας της κατασκευής, εξ αιτίας της οποίας ο καθολικός λυγισμός μπορεί να αναδειχθεί ως κρίσιμη μορφή αστοχίας, ιδιαίτερα για ρηχά θαμμένους αγωγούς.

Για τους ανωτέρω λόγους στο πλαίσιο του παρόντος παραδοτέου πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού. Εξετάστηκαν αγωγοί συνεχείς και με κόμβους με διαφορετικό λόγο διαμέτρου προς πάχος και διαφορετικό βάθος ταφής. Για λόγους σύγκρισης οι αγωγοί υποβλήθηκαν σε ανάστροφη διάρρηξη ίση με τη διάμετρό τους. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων έδειξαν ότι δεν υπάρχει κίνδυνος καθολικού λυγισμού. Επιπροσθέτως, η εισαγωγή των κόμβων, όπως έχει δείχθει έως τώρα στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος, οδηγεί σε σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού. Ειδικότερα, ο βαθιά θαμμένος συνεχής αγωγός μεγάλης διαμέτρου πρόκειται να αστοχήσει αρχικά από τοπικό λυγισμό, ενώ ο αντίστοιχος αγωγός με κόμβους αναπτύσσει πολύ μικρή κατακόρυφη παραμόρφωση, η οποία δεν μπορεί να συσχετισθεί με καθολικό λυγισμό. Ακολούθως, ο ρηχά θαμμένος συνεχής αγωγός μικρής διαμέτρου πρόκειται να αστοχήσει λόγω διαρροής του χάλυβα, ενώ και ο αντίστοιχος αγωγός με κόμβους αναπτύσσει πολύ μικρή κατακόρυφη παραμόρφωση, η οποία επίσης δεν μπορεί να συσχετισθεί με καθολικό λυγισμό. Σημειώνεται επίσης, ότι οι αγωγοί με κόμβους παραμορφώνονται με ιδιαίτερα μεγάλη στροφή των κόμβων, με αποτέλεσμα η κατακόρυφη παραμόρφωση του αγωγού μέσα στο όρυγμα να είναι πολύ μικρή.

7.5 Επιρροή περιμετρικού εδάφους στα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων

Εξετάστηκε επίσης η επιρροή των χαρακτηριστικών του περιμετρικού εδάφους στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των εδαφικών ελατηρίων. Τα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων έχουν προσδιοριστεί θεωρώντας την έκταση της αμμόδους επίχωσης του αγωγού ως πολύ μεγάλη. Τούτο, όμως, στην πράξη δε συμβαίνει καθώς οι διαστάσεις του ορύγματος εντός του οποίου τοποθετείται ο αγωγός είναι περιορισμένες. Έτσι, μέσω αριθμητικών αναλύσεων με χρήση πεπερασμένων διαφορών εξετάστηκε η επιρροή των διαστάσεων του ορύγματος στα πλευρικά εδαφικά ελατήρια. Πριν την πραγματοποίηση παραμετρικών αναλύσεων τα αριθμητικά προσομοιώματα επαληθεύτηκαν με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Στην αριθμητική διερεύνηση δόθηκε έμφαση στο βάθος ταφής του αγωγού μέσω αναλύσεων πλευρικής μετακίνησης

αγωγού στο ελεύθερο πεδίο. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τρεις τύπους εδαφικής αστοχίας, ανάλογα με το βάθος εγκιβωτισμού (λόγος βάθους ταφής προς διάμετρο αγωγού). Η παραμετρική διερεύνηση που ακολουθήθηκε κινήθηκε σε δύο κατευθύνσεις: (α) επίδραση της μείωσης της οριζόντιας απόστασης από το κέντρο του αγωγού μετά την μετατόπισή του έως την κατακόρυφη παρειά του ορύγματος και (β) επίδραση της μείωσης της κατακόρυφης απόστασης από το κατώτατο σύνορο του αγωγού έως την οριζόντια παρειά του ορύγματος. Από τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων προτάθηκαν διορθωτικοί συντελεστές για την επίδραση του πλάτους του ορύγματος και της οριζόντιας απόστασης από το κατακόρυφο σύνορο του ορύγματος.

7.6 Αριθμητική μεθοδολογία επίλυσης αγωγών με εύκαμπτους κόμβους

Με βάση την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος και τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιασθεί στα παραδοτέα, διερευνήθηκαν οι διαθέσιμες αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, οι οποίες είναι το συνεχές μοντέλο και το μοντέλο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους. Επιλέγεται το μοντέλο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους για τους ακόλουθους λόγους:

- Το συνεχές μοντέλο μπορεί να συμπεριλάβει καλύτερα μοντέλα υλικού για το έδαφος, τη γεωμετρία του ορύγματος και την άμεση αποτίμηση του τοπικού λυγισμού του αγωγού. Έχει, όμως, υπερβολικά αυξημένη πολυπλοκότητα και υπολογιστικό κόστος (χρόνος επίλυσης, δυσκολίες σύγκλισης, απαίτηση στοιχείων επαφής μεταξύ αγωγού και εδάφους, πολύ μεγάλος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων και αντιστοιχων βαθμών ελευθερίας). Υπάρχει δυσκολία προσομοίωσης του εύκαμπτου κόμβου. Η χρήση του συνεχούς μοντέλου δεν ενδείκνυται στην περίπτωση που ο αγωγός τέμνει πολλά σεισμικά ρήγματα κατά την όδυσή του.
- Το μοντέλο δοκού επί ελατηριωτού εδάφους είναι απλούστερο, υιοθετείται από τους κανονισμούς, δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού και είναι κατάλληλο για τη σημειακή προσομοίωση του κόμβου.

Τα βασικά σημεία της αριθμητικής προσομοίωσης των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους με χρήση του μοντέλου δοκού είναι:

- Ο αγωγός διακριτοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία *pipe elements* τα οποία είναι δικομβικά στοιχεία δοκού με επιπλέον βαθμούς ελευθερίας για να ληφθεί υπόψη η πρόσθετη ένταση που οφείλεται στην οβαλοποίηση της διατομής. Τα στοιχεία δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού των τάσεων και των παραμορφώσεων σε διατομές κατά μήκος του αγωγού. Με χρήση των στοιχείων αυτών μπορούν να εκτελεστούν μη-γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας για τον αγωγό.
- Το περιβάλλον έδαφος μοντελοποιείται με μη-γραμμικά μετακινησιακά ελατήρια: (α) στη διαμήκη διεύθυνση για την προσομοίωση της τριβής, (β) εγκάρσια πλευρικά για την προσομοίωση της αντίστασης του εδάφους σε πλευρική μετακίνηση του

αγωγού και (γ) κατακόρυφα προς τα πάνω και προς τα κάτω για την προσομοίωση της αντίστασης του εδάφους σε κατακόρυφη κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος.

- Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση: οι εδαφικοί κόμβοι των ελατηρίων στο σταθερό τεμάχος πακτώνονται, ενώ η μετακίνηση του ρήγματος εφαρμόζεται ως επιβαλλόμενη μετακίνηση στους εδαφικούς κόμβους του μετακινούμενου τεμάχους.
- Ο αρθρωτός εύκαμπτος κόμβος προσομοιώνεται σημειακά ως στροφικό ελατήριο, ενώ η στρεπτική, αξονική και εγκάρσια σχετική μετακίνηση των άκρων του δεσμεύονται μέσω κατάλληλων εξισώσεων δέσμευσης.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] ADINA R & D Inc. (2006), "Theory and Modeling Guide. Volume I: ADINA, Report AD 08-7".
- [132] Gresnigt A.M. & Karamanos S.A. (2009), "Local buckling strength and deformation capacity of pipes", Proceeding of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan.
- [3] American Lifeline Alliance -ALA/ASCE- (2001), "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe", ASCE, (with addenda through February 2005) 76p.
- [4] Yun H.D. & Kyriakides S. (1990), "On the beam and shell modes of buckling of buried pipelines", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 9(4), pp. 179-193.
- [5] Itasca (2011), ".FLAC version 7.0", Itasca Consulting Group Inc.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Karamitros D.K., Bouckovalas G.D. & Kouretzis G.D. (2007), "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27, pp. 200-211.
- [9] 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.
- [10] Uckan E., Akbas B., Shen J., Rou W., Paolacci F. & O'Rourke M. (2015), "A simplified analysis model for determining the seismic response of buried steel pipes at strike-slip fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 75, pp. 55-65.
- [11] Comité Européen de Normalisation (2006), "Eurocode 8, Part 4: Silos, tanks and pipelines, CEN EN 1998-4", Brussels, Belgium.
- [12] Kokavessis N.K. & Anagnostidis G.S. (2006), "Finite element modeling of buried pipelines subjected to seismic loads: soil structure interaction using contact elements". Proceeding of the ASME PVP-2006 Conference. Vancouver, Canada.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Vazouras P., Dakoulas P. & Karamanos S.A. (2015), "Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 72, pp. 48-65.
- [17] Zhang J., Liang Z. & Han C.J. (2014), "Buckling behavior analysis of buried gas pipeline under strike-slip fault movements", *Journal of Natural Gas Science Engineering* 21, pp. 901-908.
- [18] Trifonov O.V. (2015), "Numerical stress-strain analysis of buried pipelines crossing active strike-slip faults with an emphasis on fault modeling aspects", *ASCE Journal of Pipeline System Engineering Practice* 6(1), 04014008.
- [19] Peng L.C. & Peng T.L. (2009), "Pipe Stress Engineering", ASME Press, New York, USA.
- [20] EJMA (2008), "Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, Inc." 9th Edition, Expansion Joints Manufacturers Association, Inc., Tarrytown, New York, USA.