



Βασίλειος Ε. Μελισσιανός

Vasileios E. Melissianos

Υπόγειοι μεταλλικοί αγωγοί με εύκαμπτους κόμβους υπό διάρρηξη σεισμικού ρήγματος Buried steel pipelines with flexible joints under faulting

Διδακτορική Διατριβή, 2016
Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Καθηγητής

Doctoral Thesis, 2016
Supervisor: Charis J. Gantes, Professor

Περίληψη

Σκοπός της διατριβής είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς χερσαίων αγωγών με εύκαμπτους κόμβους τύπου bellow υπό διάρρηξη σεισμικού ρήγματος. Οι εύκαμπτοι κόμβοι προτείνονται ως ένα καινοτόμο μέτρο προστασίας και εισάγονται στον αγωγό στην περιοχή του ρήγματος. Στόχος είναι να απορροφήσουν τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις λόγω ενεργοποίησης του ρήγματος μέσω σχετικής στρώσης των συνδεόμενων τμημάτων του αγωγού, τα οποία κατά συνέπεια παραμένουν σχεδόν απαραμόρφωτα και αναπτύσσουν πολύ χαμηλή ένταση.

Αρχικά, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η εκτέλεση μιας σειράς πειραματικών δοκιμών συνεχών αγωγών και αγωγών με εύκαμπτους κόμβους. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη μείωση των παραμορφώσεων και τη μετατροπή του συνεχούς στατικού συστήματος σε σπονδυλωτό. Επιπλέον, τα αριθμητικά προσομοιώματα βαθμονομούνται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

Προτείνεται ακολουθώντας ένα απλοποιητικό αριθμητικό μοντέλο μιας δοκού επί εδάφους Winkler με εσωτερικές αρθρώσεις υπό θλιπτικό φορτίο. Η δοκός προσομοιώνει αγωγούς με κόμβους υπό ανάστροφη διάρρηξη ώστε να διερευνηθεί το ενδεχόμενο ανάδειξης του καθολικού λυγισμού ως μορφής αστοχίας.

Διερευνάται αριθμητικά η αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους αγωγούς υποκειμένους σε διάρρηξη οριζόντιας ολίσθησης. Αξιολογείται η μηχανική συμπεριφορά των αγωγών λαμβάνοντας υπόψη και την αβεβαιότητα εμφάνισης της διάρρηξης. Η αποτελεσματικότητα των κόμβων συγκρίνεται με τα συνήθη μέτρα προστασίας του αγωγού. Διατυπώνονται προκαταρκτικές οδηγίες χωροθέτησης και σχεδιασμού αγωγών με κόμβους.

Τέλος, διατυπώνεται μια μεθοδολογία για την αποτίμηση επιτελεστικότητας αγωγών σε διασταύρωση με σεισμικά ρήγματα. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την αποτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας, τη δομική ανάλυση του αγωγού, την αποτίμηση επικινδυνότητας παραμορφώσεων και τις σχετικές αβεβαιότητες προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το ενδεχόμενο αστοχίας του αγωγού.

Abstract

Objective of the doctoral thesis is the investigation of the behavior of onshore, buried steel oil and gas pipelines with bellow-type flexible joints under seismic fault rupture. Flexible joints are proposed as innovative mitigating measures and are introduced in the fault vicinity. The aim is to absorb the developing deformation through relative rotation between adjacent pipeline parts, which then remain undeformed and consequently nearly unstressed.

Initially, the design and execution of a series of experimental tests of continuous pipes and pipes with flexible joints are presented. The strain reduction and the transformation of the structural system from continuous to segmented, caused by the introduction of joints, is indicated. Additionally, numerical models are calibrated based on the experimental results.

A simplified numerical model of an internally hinged beam resting on Winkler foundation under compressive load is then proposed. The beam models buried pipes with flexible joints under reverse faulting. The potential of upheaval buckling, emerging as a dominant failure mode, is investigated.

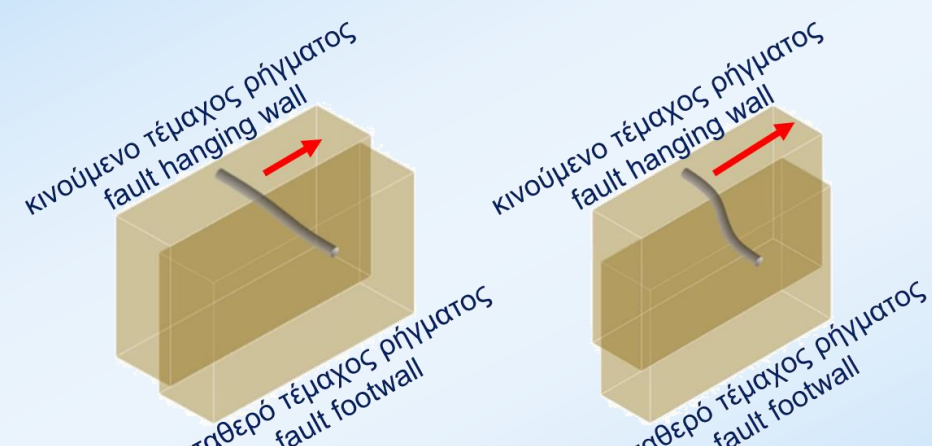
Numerical evaluation of the effectiveness of flexible joints in buried pipes under strike-slip faulting is carried out. The behavior of pipes with joints is investigated, considering also the fault trace uncertainty. The efficiency of joints is compared to the commonly used measures. Preliminary design guidelines for the configuration of flexible joints and the design of pipes with joints are formulated.

Finally, a methodology for the performance assessment of buried pipes at fault crossings is developed. The methodology consists of the seismic hazard assessment, pipe structural analysis and pipe strain hazard assessment. The pertinent uncertainties are also incorporated in the analysis in order to quantify the potential of pipe failure.

1



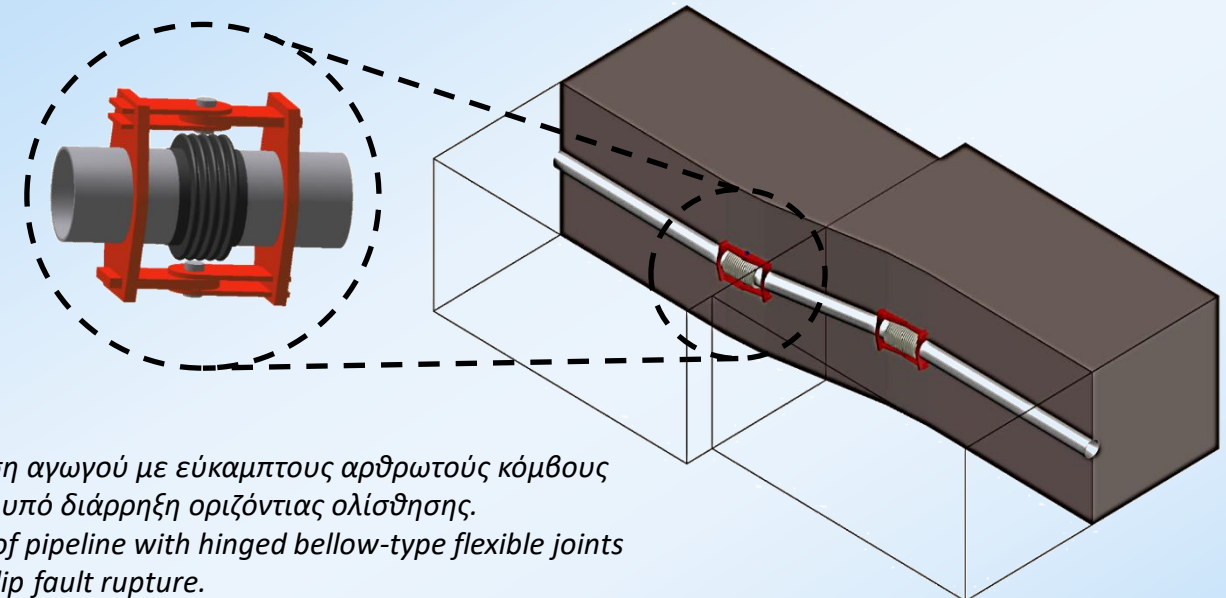
Τοποθέτηση αγωγού εντός ορύγματος.
Lowering of pipe into trench.



Σχηματική παρουσίαση δύο διαδοχικών σταδίων της παραμόρφωσης αγωγού υπό διάρρηξη οριζόντιας ολίσθησης.
Schematic illustration of two successive stages of pipeline deformation due to strike-slip fault rupture.

Πρόβλημα υπό διερεύνηση. Υπόγειος χαλύδινος αγωγός καυσίμου μεγάλης διαμέτρου υπό διάρρηξη σεισμικού ρήγματος.
Problem under investigation. Buried steel fuel large diameter pipeline under seismic fault rupture.

2



Παραμόρφωση αγωγού με εύκαμπτους αρθρωτούς κόμβους τύπου bellow υπό διάρρηξη οριζόντιας ολίσθησης.
Deformation of pipeline with hinged bellow-type flexible joints under strike-slip fault rupture.

Στόχος διατριβής. Μελέτη εφικτότητας χρήσης εμπορικών εύκαμπτων κόμβων ως μέτρων προστασίας υπόγειων αγωγών υπό διάρρηξη σεισμικού ρήγματος και διατύπωση προκαταρκτικών οδηγιών σχεδιασμού.

Dissertation objective. Feasibility study on the use of commercial flexible joints as mitigating measures in buried pipelines under faulting and formulation of preliminary design guidelines.

3

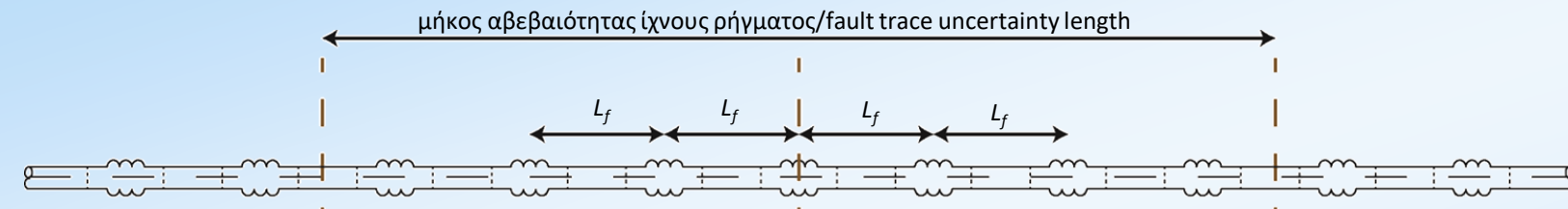


Πειραματική διερεύνηση. Δοκιμή κάμψης τριών σημείων δοκιμών αγωγών (3 συνεχή και 1 με εύκαμπτους κόμβους).
Experimental investigation. Three-point bending test of pipe specimens (3 continuous and 1 with flexible joints).

Δοκίμο/Specimen	Θλιπτική παραμόρφωση/Compressive strain	Εφελκυστική παραμόρφωση/Tensile strain
Συνεχές/Continuous	-1.25%	2.24%
Με κόμβους/With joints	-0.0016%	0.0017%

Πειραματική πιστοποίηση αποδοτικότητας εύκαμπτων κόμβων: μείωση μεγίστων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά τρεις τάξεις μεγέθους.
Experimental verification of the effectiveness of flexible joints: maximum strain reduction in the order of three times.

4



Χωροθέτηση κόμβων: η απόσταση L_f προσδιορίζεται συναρτήσει της μέγιστης μετακίνησης ρήγματος και της γωνίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος.
Configuration of joints: distance L_f is calculated with reference to the maximum fault displacement and the pipe – fault crossing angle.

Οδηγίες χωροθέτησης κόμβων. Τοποθέτηση κόμβων στον αγωγό σε ίσες αποστάσεις L_f σε όλο το μήκος αβεβαιότητας εμφάνισης της διάρρηξης του ρήγματος στην επιφάνεια.

Guidelines for the configuration of joints. Integration of joints at equal distance L_f along the entire pipeline length, where the fault trace might appear on the ground surface.

Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις Key publications

Melissianos V.E. and Gantes C.J., "Buckling and post-buckling behaviour of beams with internal flexible joints resting on elastic foundation modeling buried pipelines", *Structures*, Vol. 7, pp. 138-152, 2016.

Melissianos V.E., Korakitis G.P., Gantes C.J. and Bouckovalas G.D., "Numerical evaluation of the effectiveness of flexible joints in buried pipelines subjected to strike-slip fault rupture", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 90, pp. 395-410, 2016.

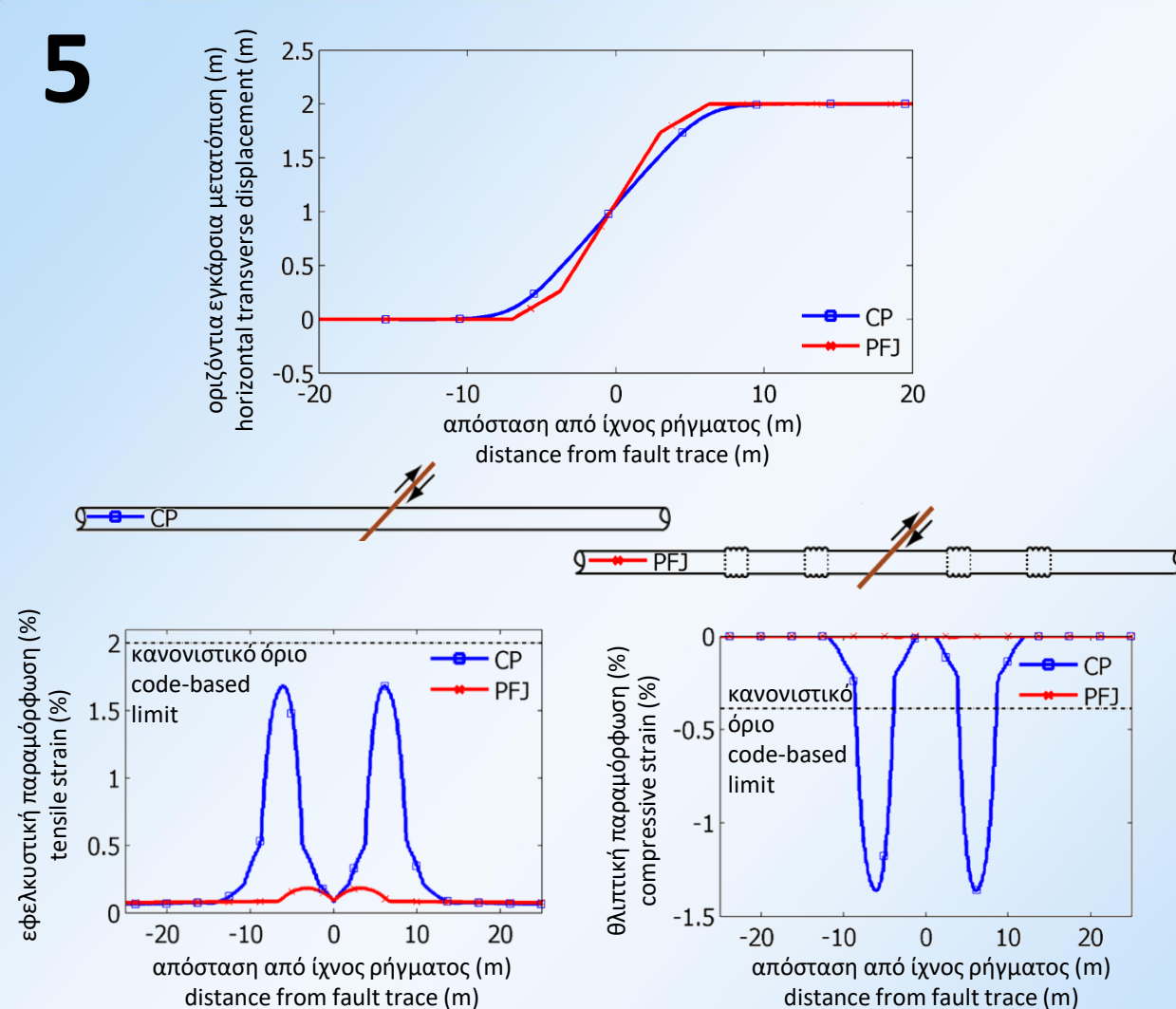
Gantes C.J. and Melissianos V.E., "Evaluation of seismic protection methods for buried fuel pipelines subjected to fault rupture", *Frontiers in Built Environment*, Vol. 2, Article 34, 2016.

Melissianos V.E., Lignos X.A., Bachas K.K. and Gantes C.J., "Experimental investigation of pipes with flexible joints under fault rupture", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 128, pp. 633-648, 2017.

Melissianos V.E., Vamvatsikos D. and Gantes C.J., "Performance assessment of buried pipelines at fault crossings", *Earthquake Spectra*, Vol. 33, Issue 1, pp. 201-218, 2017.

Melissianos V.E., Vamvatsikos D. and Gantes C.J., "Performance-based assessment of protection measures for buried pipes at strike-slip fault crossings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 101, pp. 1-11, 2017.

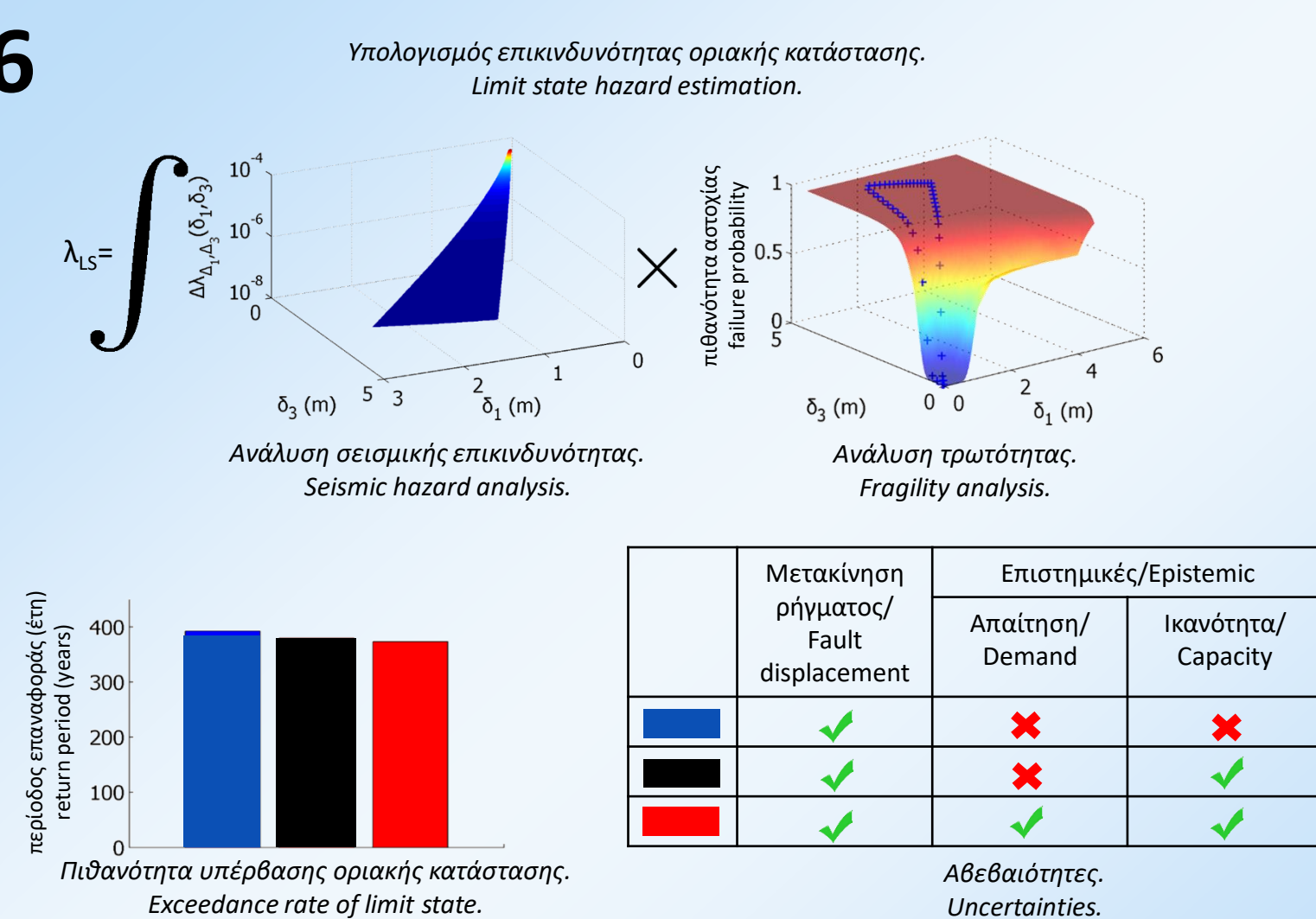
5



Αποτελεσματικότητα εύκαμπτων κόμβων. Τροποποίηση στατικού συστήματος από συνεχές (CP) σε σπονδυλωτό (PFJ) οδηγεί σε μεγάλη μείωση ανηγμένων παραμορφώσεων, οπότε και σε αποτελεσματική προστασία αγωγού

Effectiveness of flexible joints. Modification of the structural system from continuous (CP) to segmented (PFJ) leads to significant decrease of strains and thus to the efficient protection of the pipe.

6



Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αποτίμηση επιτελεστικότητας υπόγειων αγωγών σε διασταύρωση με σεισμικά ρήγματα. Εκτίμηση επιτελεστικότητας λαμβάνοντας υπόψη όλα τα σενάρια διάρρηξης, απόκρισης αγωγού και ικανότητας παραμόρφωσης, καθώς και όλες τις φυσικές και επιστημονικές αβεβαιότητες.

Development of a methodology for performance assessment of buried pipelines at fault crossings. Performance assessment by taking into account all possible scenarios regarding fault rupture, pipe response and pipe deformation, as well as all pertinent aleatory and epistemic uncertainties.