

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΛΟΓΩ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Βασίλειος Ε. Μελισσιανός

Υποψήφιος Διδάκτωρ
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: melissia@mail.ntua.gr

Χάρης Ι. Γαντές

Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Πάυλος Π. Καλφαντής

Προπτυχιακός Σπουδαστής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: pavkalfantis@gmail.com

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων χαρακτηρίζονται ως κατασκευές υψηλής επικινδυνότητας και το μεγάλο τους μήκος καθιστά αναπόφευκτη τη διέλευσή τους από περιοχές επιρρεπείς σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις λόγω ενεργοποίησης σεισμικών ρηγμάτων. Μία από τις ενδεχόμενες μορφές αστοχίας σε αυτήν την περίπτωση είναι ο καθολικός λυγισμός υπό τη δράση θλιπτικών δυνάμεων, οφειλόμενων σε ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος. Στην παρούσα εργασία αξιολογείται αριθμητικά ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού υπόγειων αγωγών έναντι άλλων μορφών αστοχίας, λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τη γεωμετρική μη-γραμμικότητα του προβλήματος, όσο και τη μη-γραμμικότητα του χάλυβα και του εδάφους. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι για τον υπό εξέταση αγωγό που χαρακτηρίζεται από μεγάλο λόγο διαμέτρου προς πάχος και βρίσκεται σχετικά βαθιά θαμμένος ο καθολικός λυγισμός δεν είναι η κρίσιμη μορφή αστοχίας καθώς κυριαρχεί ο ανελαστικός τοπικός λυγισμός.

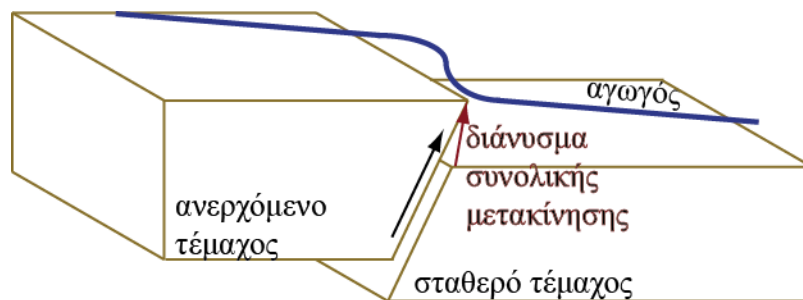
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις επιβάλλουν την κατασκευή αγωγών μεταφοράς καυσίμων που εκτείνονται σε μήκη εκατοντάδων χιλιομέτρων. Το μεγάλο μήκος αυτών των υπόγειων αγωγών καθιστά συνήθως αναπόφευκτη τη διέλευση τους από σεισμογενείς περιοχές και την ανάγκη κατάλληλων ελέγχων επάρκειας, αν συνυπολογισθεί το γεγονός ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους υλοποιείται εντός αυστηρών κανονιστικών πλαισίων. Οι σεισμογενείς περιοχές περιλαμβάνουν συνήθως ενεργά σεισμικά ρήγματα τα οποία αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα του αγωγού. Έτσι, οι υπόγειοι αγωγοί οφείλουν να σχεδιάζονται έναντι μεγάλων εδαφικών διαφορικών μετακινήσεων οφειλομένων στην ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος. Αυτές οι εδαφικές μετακινήσεις προκαλούν στον αγωγό σύνθετη εντατική καταπόνηση με συνδυασμό καμπτικής και αξονικής έντασης [1]. Ενδεχόμενες μορφές αστοχίας σε αυτήν την περίπτωση είναι η θραύση λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων των συγκολλήσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων του χαλύβδινου αγωγού, ο τοπικός λυγισμός του τοιχώματος λόγω συγκέντρωσης θλιπτικών παραμορφώσεων και, σε περίπτωση ανάστροφου ρήγματος, ο καθολικός λυγισμός λόγω θλιπτικών δυνάμεων. Αγωγοί με μικρό βάθος ταφής και σχετικά μικρό λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος είναι περισσότερο επιρρεπείς στον καθολικό λυγισμό (upheaval buckling) συγκριτικά με τους βαθύτερα θαμμένους αγωγούς με μεγαλύτερο λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος (D/t) [2].

Η μελέτη του καθολικού λυγισμού αγωγών ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Αρχικά μελετήθηκε ο λυγισμός λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής υποθαλάσσιων αγωγών με χρήση του προσομοιώματος δοκού εδραζόμενης επί άκαμπτης θεμελίωσης και προτάθηκαν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των καμπτικών ροπών και των αξονικών δυνάμεων [3-5]. Αργότερα, στα μέσα της δεκαετίας του 1990, παρουσιάστηκε η πιο εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση του καθολικού λυγισμού αγωγών επί ελαστικού εδάφους [6-7]. Για την πληρέστερη έως τώρα αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα αμφιέρειστης ελαστικής δοκού μεγάλου μήκους υπό σταθερή θερμοκρασιακή μεταβολή με συνυπολογισμό των τριβών μεταξύ του αγωγού και του εδάφους [8]. Όμως, οι πραγματικές χερσαίες και υποθαλάσσιες εδαφικές συνθήκες απέχουν από τις υποθέσεις του ελαστικού εδάφους ή της άκαμπτης θεμελίωσης. Έτσι, υιοθετήθηκε ερευνητικά το προσομοίωμα του αγωγού επί ελαστοπλαστικής θεμελίωσης για τη μελέτη του λυγισμού λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής υποθαλάσσιων αγωγών [9-10]. Στη συνέχεια, η ευαισθησία του λυγισμού λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής στις αρχικές ατέλειες αναδείχθηκε με υιοθέτηση του προσομοιώματος της δοκού μεγάλου βάρους επί άκαμπτης θεμελίωσης [11]. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία, όμως, περί καθολικού λυγισμού χερσαίων αγωγών παραμένει περιορισμένη. Ενδεικτικά, έμφαση στον καθολικό λυγισμό χερσαίων αγωγών δόθηκε κατά τη μελέτη της ειδικής περίπτωσης αγωγών διερχόμενων πάνω από χαμηλό ύψωμα με τμήματα ψυχρής έλασης, όπου προτάθηκε μία συνάρτηση οριακής κατάστασης [12]. Πρόσφατα, επίσης, παρουσιάστηκε μία μέθοδος για την εκτίμηση του κινδύνου καθολικού λυγισμού χερσαίων αγωγών υπό θλιπτική εδαφική παραμόρφωση βασισμένη σε συνδυασμό αριθμητικών αναλύσεων [13].

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού υπόγειων χαλύβδινων αγωγών που διέρχονται από ανάστροφα σεισμικά ρήγματα. Η ενεργοποίηση ενός ανάστροφου σεισμικού ρήγματος, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 1, συνοδεύεται από κατακόρυφη και οριζόντια μετακίνηση του ανερχόμενου τέμαχους του ρήγματος επιβάλλοντας πέραν της καμπτικής έντασης και θλιπτικές δυνάμεις στον αγωγό. Χάριν απλοποίησης στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι η οριζόντια μετακίνηση του ρήγματος

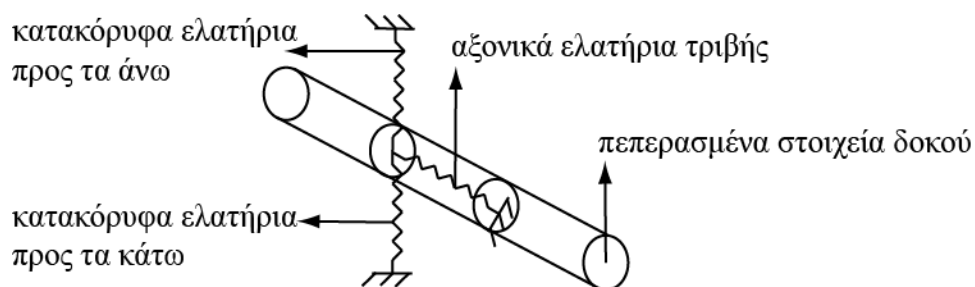
πραγματοποιείται αποκλειστικά εντός του κατακόρυφου επιπέδου που διέρχεται από τον αγωγό, χωρίς εγκάρσια προς τον αγωγό συνιστώσα. Συνεπώς, υιοθετείται το προσομοίωμα της δοκού μεγάλου μήκους επί ελαστοπλαστικού εδάφους με συνεχή πλευρική κατακόρυφη στήριξη από ομοιόμορφα κατανεμημένα εγκάρσια ελατήρια 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 [14]. Η αριθμητική αυτή προσέγγιση αποτελεί επέκταση της ανάλογης προσομοίωσης που παρουσιάστηκε από τους συγγραφείς για τη μελέτη της λυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς ελαστικής αμφιέρειστης δοκού επί εδάφους Winkler υπό σταθερό αξονικό φορτίο [15].



Σχ. 1: Ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ

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. Ακολούθως, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού προσομοιώνονται με μη-γραμμικά ελατήρια μετάθεσης σε δύο διευθύνσεις, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 2.



Σχ. 2: Αριθμητική προσομοίωση εδάφους – αγωγού

Ειδικότερα, η τριβή μεταξύ του αγωγού και του εδάφους προσομοιώνεται με διαμήκη ελατήρια, των οποίων οι ιδιότητες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της εδαφικής επίχωσης και του περιβλήματος του αγωγού. Ταυτόχρονα, ένα ζεύγος κατακόρυφων ελατηρίων προσομοιώνει την κατακόρυφη κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος με τα

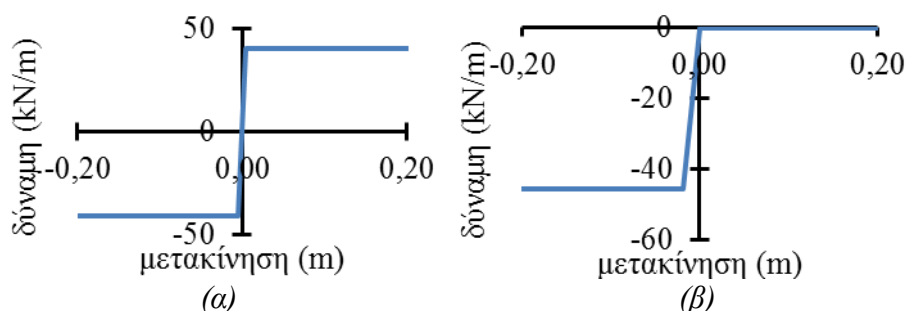
χαρακτηριστικά τους να διαφέρουν σημαντικά λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της υπερκείμενης εδαφικής επίχωσης και του υποκείμενου μητρικού εδάφους.

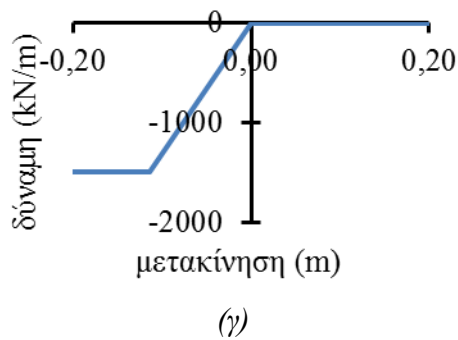
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω ενεργοποίησης ανάστροφου ρήγματος υλοποιείται στην παρούσα εργασία μέσω ενός παραδείγματος και προσεγγίζεται αριθμητικά με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA [16]. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ένας ευθύγραμμος αγωγός συνολικού μήκους $L=2000\text{m}$ με διατομή διαμέτρου $D=0,9144\text{m}$ και πάχους τοιχώματος $t=0,0119\text{m}$. Ο χάλυβας του αγωγού είναι ποιότητας API5L-X65 με διγραμμικό νόμο υλικού και χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$, όριο διαρροής $f_y=448,50\text{MPa}$, ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_u=20\%$, και μέτρο κράτνσης $E_h=0,70\text{GPa}$. Ο αγωγός βρίσκεται θαμμένος σε βάθος $H=1,30\text{m}$ ως την άνω παρειά του και το υλικό επίχωσης είναι άμμος μέσης πυκνότητας με γωνία τριβής $\phi=36^\circ$ και ειδικό βάρος $\gamma=18\text{kN/m}^3$. Ο αγωγός περιβάλλεται εξωτερικά με πίσσα λιθάνθρακα (coal tar), με συντελεστή $f=0,90$ ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους δίνει τη γωνία τριβής μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Επιπλέον, το έδαφος προσομοιώνεται με ελαστοπλαστικά μετακινησιακά ελατήρια, σύμφωνα με την ενότητα 3, των οποίων τα χαρακτηριστικά εκτιμώνται σύμφωνα με τις οδηγίες του ALA [14] και παρουσιάζονται στον Πιν. 1, ενώ στο Σχ. 3 απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα δύναμης – μετακίνησης των ελατηρίων.

ελατήρια	μετακίνηση διαρροής (mm)	δύναμη διαρροής (kN/m)
αξονικά τριβής	5,00	40,72
κατακόρυφα προς τα άνω	18,00	45,47
κατακόρυφα προς τα κάτω	114,30	1696,61

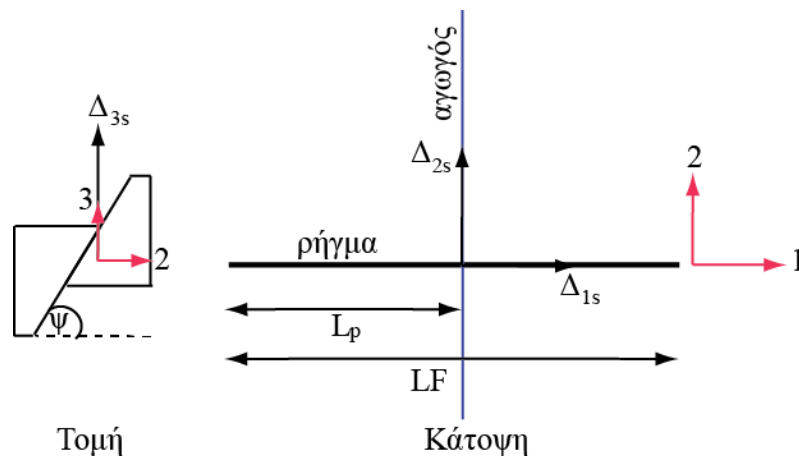
Πίν. 1. Χαρακτηριστικά εδαφικών ελατηρίων





Σχ. 3: Διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης ελατηρίων (α) αξονικών τριβής, (β) κατακόρυφων προς τα άνω και (γ) κατακόρυφων προς τα κάτω

Τέλος, 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 Σχ. 4. Το ρήγμα ενεργοποιούμενο μετακινείται κατακόρυφα κατά $\Delta_3=4,00\text{m}$ και κατά το διαμήκη άξονα του αγωγού κατά $\Delta_2=1,46$. Η μετακίνηση του εδάφους στο ανερχόμενο τέμαχος του ρήματος υλοποιείται στο αριθμητικό προσομοίωμα ως στατικά επιβαλόμενη μετακίνηση στους αντίστοιχους εδαφικούς κόμβους των ελατηρίων.



Σχ. 4: Κάτοψη και τομή διασταύρωσης αγωγού – ρήματος

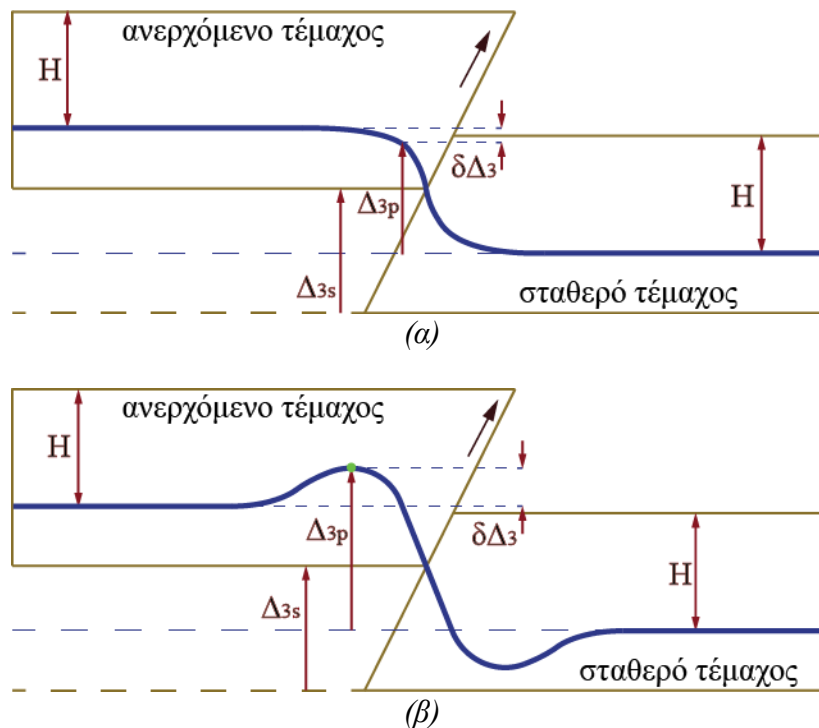
5. ΚΑΘΟΛΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΑΓΩΓΟΥ

Η μελέτη του κινδύνου καθολικού λυγισμού λόγω της ενεργοποίησης ανάστροφου ρήματος και των συνεπαγόμενων μεγάλων αναπτυσσόμενων θλιπτικών δυνάμεων υλοποιείται αξιοποιώντας το αριθμητικό προσομοίωμα της ενότητας 4. Ο υπό εξέταση αγωγός χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο λόγο $D/t=76,85$ και βρίσκεται θαμμένος σε σχετικά μεγάλο βάθος ($H=1,30\text{m}$). Έτσι, αναμένεται να κυριαρχήσει ο τοπικός λυγισμός ως μορφή αστοχίας [2]. Παρ' όλα αυτά κατά το σχεδιασμό του αγωγού κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση της αλληλουχίας των πιθανών μορφών αστοχίας, ώστε αφενός να αναδειχθεί η κρίσιμη μορφή αστοχίας, αφετέρου δε να αξιολογηθεί η συνολική συμπεριφορά του φορέα.

5.1 Μη-γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

Το φαινόμενο του λυγισμού χαρακτηρίζεται από έντονη γεωμετρική μη-γραμμικότητα όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα διατυπώνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Έτσι, η μελέτη της προλυγισμικής και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του φορέα πραγματοποιείται μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού ώστε να αποτιμηθεί η αλληλεπίδραση του λυγισμού και της αστοχίας του υλικού. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται ένας ελαστοπλαστικός αγωγός, όπου ο χάλυβας είναι ποιότητας API5L-X65, του οποίου τα χαρακτηριστικά παρατίθενται στην ενότητα 4, και ο ίδιος αγωγός θεωρούμενος ως απείρως ελαστικός, για λόγους σύγκρισης.

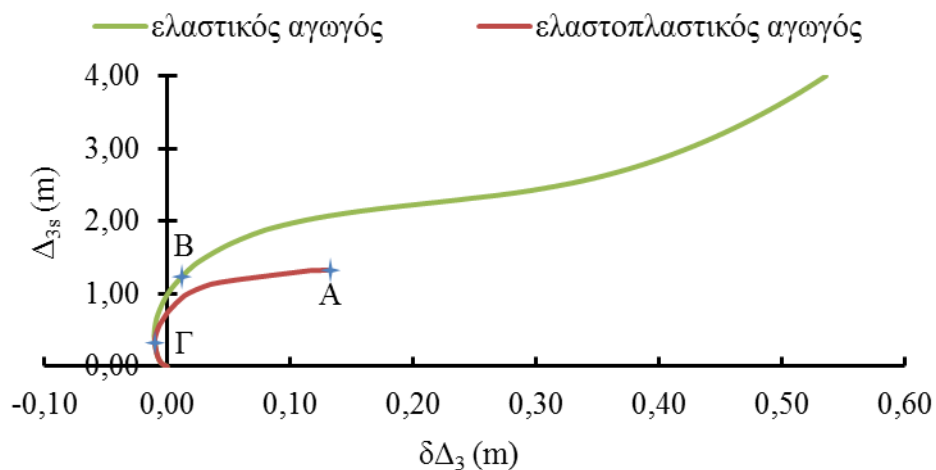
Καθώς το υπό εξέταση πρόβλημα θεωρείται δισδιάστατο, στο Σχ. 5 απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του αγωγού και του εδάφους, όπου H είναι το βάθος ταφής του αγωγού, Δ_{3s} είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του ρήγματος, Δ_{3p} είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού, και $\delta\Delta_3 = \Delta_{3p} - \Delta_{3s}$ είναι η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, στο Σχ. 5(α) απεικονίζεται η περίπτωση όπου $\delta\Delta_3 < 0$ για μικρή μετακίνηση του ανερχόμενου τεμάχου του ρήγματος και στο Σχ. 5(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.



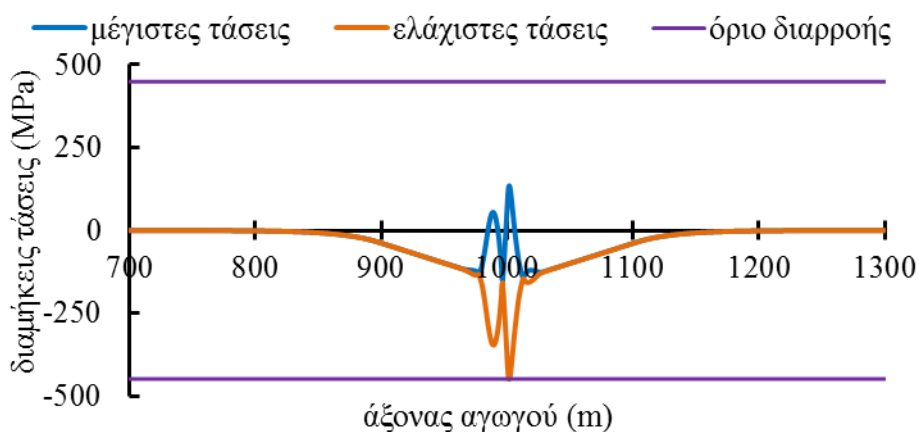
Σχ. 5: Ορισμός κατακορύφων μετακινήσεων αγωγού και ρήγματος

Η προλυγισμική και μεταλυγισμική συμπεριφορά του ελαστικού και του ελαστοπλαστικού αγωγού αποτυπώνονται στους δρόμους ισορροπίας του Σχ. 6. Ειδικότερα, στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η σχετική κατακόρυφη μετακίνηση ενός χαρακτηριστικού σημείου κατά μήκος του αγωγού ($\delta\Delta_3$) και στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση (Δ_{3s}). Ως χαρακτηριστικό επιλέγεται το σημείο κατά μήκος του ελαστοπλαστικού φορέα που εμφανίζει τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση (Δ_{3p}) στο τέλος της

ανάλυσης και σημειώνεται στο Σχ. 5(β). Σημειώνεται ότι οι δρόμοι ισορροπίας για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης Δ_{3s} εμφανίζουν τιμές μετακίνησης $\delta\Delta_3 < 0$ καθώς αρχικά η παραμόρφωση των αγωγών είναι ομαλή σύμφωνα με το Σχ. 5(α). Όσο, όμως, αυξάνεται η μετακίνηση του ρήγματος η συγκριτικά μικρότερη δυσκαμψία της εδαφικής επίχωσης σε σχέση με το μητρικό έδαφος οδηγεί σε μη αμελητέα παραμόρφωση του αγωγού προς τα άνω, δημιουργώντας τη χαρακτηριστική παραμόρφωση του Σχ. 5(β). Στη συμπεριφορά τόσο του ελαστικού όσο και του ελαστοπλαστικού αγωγού εκδηλώνεται έντονη μη-γραμμικότητα. Η συμπεριφορά του ελαστικού αγωγού χαρακτηρίζεται αρχικά από σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας και στη συνέχεια από αύξησή της, καθώς η μεταλλυγισμική συμπεριφορά είναι ευσταθής με απουσία οριακού σημείου. Ο δρόμος ισορροπίας του ελαστοπλαστικού αγωγού συμπίπτει με αυτόν του ελαστικού ως ένα σημείο Γ, για επιβαλλόμενη μετακίνηση $\Delta_{3s}=0,30\text{m}$, και στη συνέχεια αποχωρίζεται από αυτόν εμφανίζοντας ταχύτερη μείωση της δυσκαμψίας λόγω τοπικής διαρροής του χάλυβα του αγωγού. Η κατανομή των μεγίστων και ελάχιστων διαμήκων τάσεων κατά μήκος του ελαστοπλαστικού αγωγού στο σημείο Γ απεικονίζεται στο Σχ. 7 αποτυπώνοντας πράγματι την πρώτη διαρροή του αγωγού.



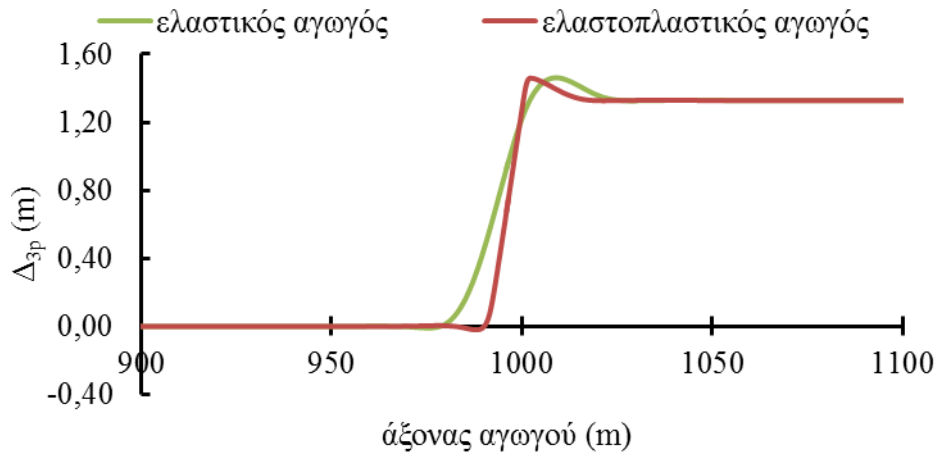
Σχ. 6: Δρόμοι ισορροπίας ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού



Σχ. 7: Κατανομή διαμήκων ορθών τάσεων κατά μήκος του ελαστοπλαστικού αγωγού στο σημείο Γ του δρόμου ισορροπίας

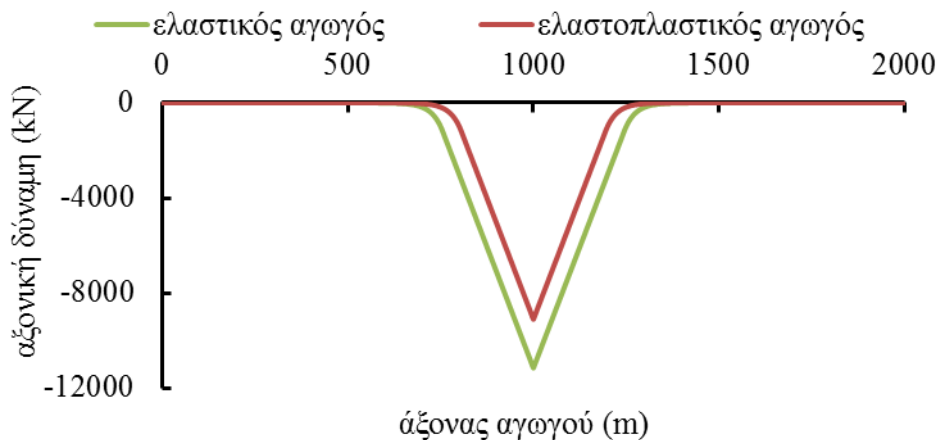
Στους δρόμους ισορροπίας σημειώνονται επίσης τα σημεία Α και Β που αντιστοιχούν στην ίδια στάθμη επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης $\Delta_{3s}=1,33\text{m}$, εκείνη για την οποία

ολοκληρώνεται η ανάλυση του ελαστοπλαστικού αγωγού. Στο Σχ. 8 παρουσιάζεται λεπτομέρεια της κατακόρυφης μετακίνησης του ελαστικού και του ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία Β και Α αντίστοιχα. Οι διαφορές στο παραμορφωμένο σχήμα των φορέων οφείλονται στη διαρροή της διατομής του ελαστοπλαστικού αγωγού που με τη σειρά της οδηγεί σε λιγότερη ομαλή κατακόρυφη μετακίνηση. Αντιθέτως, ο ελαστικός αγωγός παρουσιάζει ομαλότερη παραμόρφωση, η οποία παράλληλα εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος αγωγού.

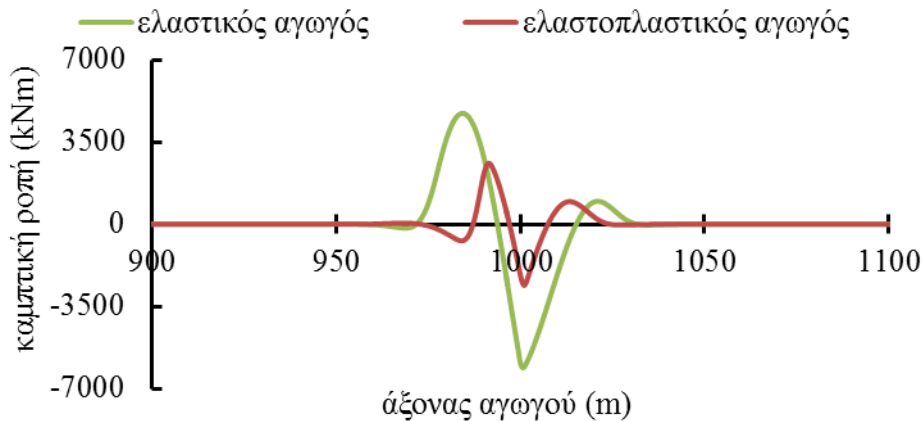


Σχ. 8: Λεπτομέρεια παραμόρφωσης ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία Β και Α αντίστοιχα

Τέλος, στο Σχ. 9 και στο Σχ. 10 απεικονίζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών αντίστοιχα του ελαστικού και του ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία Β και Α, όπου παρατηρείται ότι ο ελαστοπλαστικός αγωγός αναπτύσσει μικρότερες αξονικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαρροής της διατομής, καθώς μετά από αυτήν εκδηλώνεται μείωση της δυσκαμψίας και ο ρυθμός αύξησης των εντατικών μεγεθών είναι μικρότερος συγκριτικά με την ελαστική περιοχή. Σημειώνεται, επίσης, ότι στον ελαστικό αγωγό η επιρροή της μετακίνησης του ρήγματος σε όρους αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος του αγωγού.



Σχ. 9: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία Β και Α αντίστοιχα



Σχ. 10: Λεπτομέρεια κατανομής καμπτικών ροπών κατά μήκος του ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού στα σημεία B και A αντίστοιχα

5.2 Κίνδυνος καθολικού λυγισμού

Ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού του αγωγού εξετάζεται στην παρούσα εργασία συναρτήσει των άλλων ενδεχόμενων μορφών αστοχίας του αγωγού, ήτοι της αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων και του τοπικού λυγισμού του τοιχώματος λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων. Η προσομοίωση του αγωγού, όμως, με πεπερασμένα στοιχεία δοκού δεν επιτρέπει την άμεση παρατήρηση φαινομένων τοπικού λυγισμού ούτε θραύσης των συγκολλήσεων. Έτσι, η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας από τοπικό λυγισμό και θραύση συγκολλήσεων πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μέγιστες αναπτυσσόμενες ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής με τα κανονιστικώς προτεινόμενα όρια διαμήκων παραμορφώσεων έναντι αυτών των μορφών αστοχίας. Στην παρούσα εργασία για τα όρια των διαμήκων θλιπτικών και εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων υιοθετούνται οι προτεινόμενες σχέσεις του ALA [14]. Συγκεκριμένα, το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων ($\epsilon_{c,lim}$) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ. (1) και το όριο εφελκυστικών παραμορφώσεων ($\epsilon_{t,lim}$) σύμφωνα με την εξ. (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.

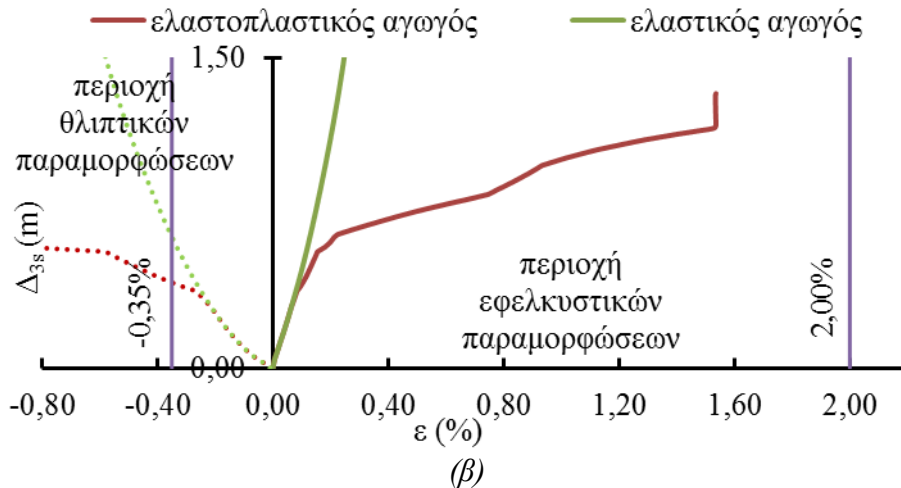
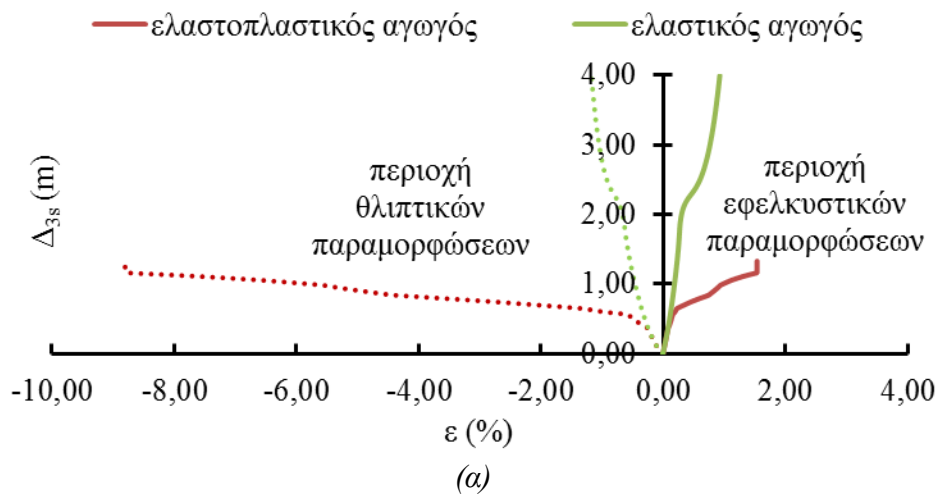
$$\epsilon_{c,lim} = 0,50 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0,0025 + 3000 \left(\frac{pD}{2Et} \right)^2$$

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

$$\epsilon_{t,lim} = 2\% \quad (2)$$

Το υπολογιζόμενο σύμφωνα με την εξ. (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. Στην παρούσα εργασία και επί το δυσμενέστερο η εσωτερική πίεση θεωρείται μηδενική και ο αντίστοιχος τελευταίος όρος της εξ. (1) απαλείφεται. Έτσι, εφαρμόζοντας την εξ. (1) για τον υπό εξέταση αγωγό προκύπτει ότι το όριο των διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων ισούται με 0,35%.

Με βάση τα ανωτέρω η ενδεχόμενη αστοχία του ελαστοπλαστικού αγωγού από τοπικό λυγισμό ή θραύση των συγκολλήσεων εξετάζεται αξιοποιώντας το δρόμο ισορροπίας των ανηγμένων παραμορφώσεων, δηλαδή την εξέλιξη των μέγιστων θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τη σταδιακή επιβολή της εδαφικής μετακίνησης Δ_{3s} . Έτσι, το Σχ. 11(α) παρουσιάζει τη συνολική εξέλιξη των διαμήκων παραμορφώσεων συναρτήσει της μετακίνησης Δ_{3s} , όπου με αρνητικό πρόσημο παρουσιάζονται οι θλιπτικές παραμορφώσεις και με θετικό οι εφελκυστικές. Στην περίπτωση του ελαστικού αγωγού παρατηρούμε σχετικά ομοιόμορφη αύξηση των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων έως την επιβολή του συνόλου της μετακίνησης Δ_{3s} . Αντίθετα, στην περίπτωση του ελαστοπλαστικού αγωγού για μικρές τιμές της μετακίνησης Δ_{3s} ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων είναι ίδιος με τον ελαστικό αγωγό, έως του σημείου πρώτης διαρροής, ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός αυτός αυξάνεται έντονα.

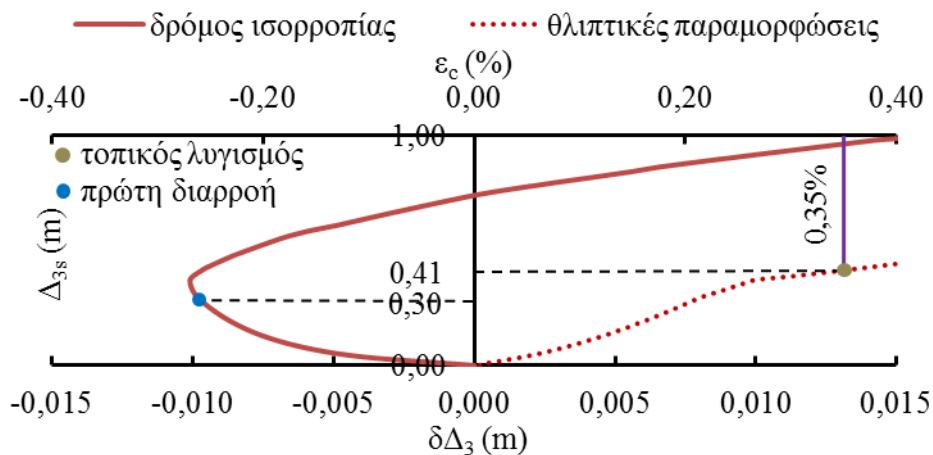


Σχ. 11: (α) Εξέλιξη θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων ελαστικού και ελαστοπλαστικού αγωγού και (β) λεπτομέρεια του σχήματος με τα κανονιστικά όρια παραμορφώσεων

Ακολουθώντας, στο Σχ. 11(β) παρουσιάζεται λεπτομέρεια του Σχ. 11(α) συμπεριλαμβανομένων των ορίων παραμορφώσεων των εξ. (1) και (2). Το πρώτο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις δε φθάνουν το κανονιστικώς

ορισθέν όριο που συνεπάγεται αποφυγή αστοχίας των συγκολλήσεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων. Τούτο συνάδει και με τη «φόρτιση» του αγωγού μιας και η ενεργοποίηση του ανάστροφου ρήγματος προκαλεί αξονική θλίψη και καμπτική ένταση στον αγωγό. Έτσι, οι αναπτυσσόμενες τάσεις του αγωγού αναμένεται να είναι κυρίαρχα θλιπτικές. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και το γεγονός ότι το όριο επιτρεπόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων είναι πολύ αυστηρότερο από το εκείνο των εφελκυστικών, η αστοχία από τοπικό λυγισμό αναμένεται κρισιμότερη εκείνης από εφελκυστική θραύση των ραφών συγκόλλησης. Ειδικότερα, στην περίπτωση του ελαστικού αγωγού επέρχεται αστοχία λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων για $\Delta_{3s}=0,63m$, ενώ στην περίπτωση του ελαστοπλαστικού αγωγού για $\Delta_{3s}=0,41m$, η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από τη μετακίνηση $\Delta_{3s}=0,30m$ που προκαλεί την πρώτη διαρροή, όπως εποπτικά παρουσιάζεται στο Σχ. 12, όπου συνδυάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του φορέα σε όρους κατακορύφων μετακινήσεων και σε όρους μέγιστων θλιπτικών παραμορφώσεων.

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



Σχ. 12: Λεπτομέρεια δρόμων ισορροπίας ελαστοπλαστικού αγωγού

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο μελετάται μέσω μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού υπόγειου χάλυβδινου αγωγού ο οποίος υπόκειται σε ενεργοποίηση ανάστροφου σεισμικού ρήγματος, από το οποίο διέρχεται. Ο υπό εξέταση αγωγός χαρακτηρίζεται από μεγάλο λόγο διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος και βρίσκεται σχετικά βαθιά θαμμένος. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσέγγισης της συμπεριφοράς του υπό εξέταση αγωγού αναδεικνύουν αφενός την εντόνως μη-γραμμική συμπεριφορά του

φορέα και αφετέρου τον ανελαστικό τοπικό λυγισμό ως κρίσιμη μορφή αστοχίας. Παράλληλα τόσο ο καθολικός λυγισμός λόγω θλιπτικών δυνάμεων, όσο και η θραύση των συγκολλησεων λόγω εφελκυστικών παραμορφώσεων δεν αποτελούν ενδεχόμενες μορφές αστοχίας.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και την Ελλάδα μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» (ΕΣΠΑ 2007-2013) – Δράση: «Αριστεία II». Ο πρώτος συγγραφέας αναγνωρίζει τη μερική χρηματοδότηση από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013 – Δράση: «Ενίσχυση της απασχόλησης ερευνητών σε επιχειρήσεις».

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] O' ROURKE M.J. και Liu X. "Response of buried pipelines subjected to earthquake effects. Monograph No. 3", *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, 1999.
- [2] YUN H.D. και KYRIAKIDES S. "On the beam and shell modes of buckling of buried steel pipelines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*", Vol. 9, 1990, pp. 179-193.
- [3] HOBS R.E. "In-service buckling of heated pipelines", *Journal of Transportation Engineering*, Vol.110, 1984, pp. 175-189.
- [4] YUN H.D. και KYRIAKIDES S. "A model for beam-mode buckling of buried pipelines", *ASCE Journal of the Engineering Mechanics*, Vol. 111, 1985, pp. 235-253.
- [5] TAYLOR N. και GAN A.B. "Submarine pipeline buckling – imperfection studies", *Thin-Walled Structures*, Vol. 4, 1986, pp. 295-323.
- [6] MALTBY T.C. και CALLADINE C.R. "An investigation into upheaval buckling of buried pipelines – I. Experimental apparatus and some observations", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.37, 1995, pp. 943-963.
- [7] MALTBY T.C. και CALLADINE C.R. "An investigation into upheaval buckling of buried pipelines – II. Theory and analysis of experimental observations", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, 1995, pp. 965-983.
- [8] ANDREUZZI F. και PERRONE A. "Analytical solution for upheaval buckling in buried pipeline", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, 2001, pp. 5081-5087.
- [9] WANG L., SHI R., YUAN F., GUO Z. και YU L. "Global buckling of pipeline in the vertical plane with soft seabed", *Applied Ocean Research*, Vol. 33, 2011, pp. 130-136.
- [10] SHI R., WANG L., GUO Z. και YUAN F. "Upheaval buckling of a pipeline with prop imperfection on a plastic seabed", *Thin-Walled Structures*, Vol. 65, 2013, pp. 1-6.

- [11] KARAMPOUR H., ALBERMANI F. και GROSS J. “On the lateral and upheaval buckling of subsea pipelines”, *Engineering Structures*, Vol. 52, 2013, pp. 317-330.
- [12] MATHESON I., ZHOU J., ZHOU W. και GAILING R. “An upheaval buckling limit state function for onshore natural gas pipelines”, *IPC2008. 7th International Pipeline Conference*, ASME (ed.), 2008.
- [13] MITSUYA M., SANAKOUE T. και MOTOHASHI H. “Beam-mode buckling of buried pipeline subjected to seismic ground motion”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 135, 2013, pp. (021801) 1-10.
- [14] ALA AMERICAN LIFELINES ALLIANCE, *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe – July 2001 (with addenda through February 2005)*, 2005.
- [15] GANTES C.J. και MELISSIANOS V.E. “Buckling and post-buckling behavior of beam on elastic foundation modeling buried pipelines”, *CESARE '14. Civil Engineering for Sustainability and Resilience International Conference*, 2014.
- [16] ADINA R & D Inc. “Theory and Modeling Guide. Volume I: ADINA, Report ARD 08-7”, 2006.

UPHEAVAL BUCKLING RISK ASSESSMENT OF BURIED STEEL PIPELINES DUE TO REVERSE SEISMIC FAULT ACTIVATION

Vasileios E. Melissianos

PhD Candidate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: melissia@mail.ntua.gr

Charis J. Gantes

Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Pavlos P. Kalfantis

Undergraduate Student

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: pavkalfantis@gmail.com

SUMMARY

Buried pipelines are classified as hazardous structures as among others due to their extended length crossing areas prone to large ground deformations due to seismic fault activation is usually inevitable. In this case a potential failure mode is upheaval buckling under acting compressive forces, due to reverse fault activation. In the present study the risk of upheaval buckling of buried steel pipelines is numerically investigated against other failure modes by also accounting for geometrical and pipeline steel and soil nonlinearities. Obtained results indicate that upheaval buckling is not the critical failure mode. Instead inelastic local buckling is the critical failure mode for the relatively deeply buried pipeline under investigation characterized by high diameter to thickness ratio.