

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΓΩΓΩΝ
ΥΠΟ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ**

Άγγελος Χ. Καρβέλης
Υποψήφιος Διδάκτωρ
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: karvelis.aggelos@gmail.com

Βασίλειος Ε. Μελισσιανός
Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: melissianosv@gmail.com

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

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χερσαίοι υπόγειοι αγωγοί αποτελούν το κύριο μέσο μεταφοράς καυσίμων για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων της οικονομίας και εκτείνονται σε πολύ μεγάλα μήκη. Όταν οι αγωγοί διασχίζουν σεισμογενείς περιοχές, το ενδεχόμενο διασταύρωσής τους με ενεργά τεκτονικά ρήγματα είναι αυξημένο. Η ενεργοποίηση ενός ρήγματος επιβάλλει μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις στον αγωγό, τις οποίες ο αγωγός αναγκάζεται να ακολουθήσει με ενδεχόμενο να αστοχήσει εξαιτίας είτε εφελκυστικής θραύσης σε θέσεις ραφών συγκόλλησης μεταξύ διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων, είτε λόγω τοπικού λυγισμού του τοιχώματος. Οι σχετικοί έλεγχοι επάρκειας πραγματοποιούνται σε όρους ανηγμένων εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων, αντίστοιχα.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται αριθμητικά η εκδήλωση τοπικού λυγισμού και αξιολογούνται τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια. Αρχικά μορφώνεται ένα κατάλληλο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο βαθμονομείται βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων κάμψης αγωγού τεσσάρων σημείων. Ακολούθως, μορφώνεται ένα απλοποιημένο ισοδύναμο προσομοίωμα με σκοπό αφενός τη διερεύνηση των κυριότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την εκδήλωση του τοπικού λυγισμού και αφετέρου προκειμένου αυτό να αποτελέσει τη βάση ώστε σε επόμενο στάδιο να ληφθεί υπόψη η επιρροή του περιβάλλοντος εδάφους. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει την

ασταθή μεταλυσίμικη συμπεριφορά της κατασκευής. Εξετάζεται η επιρροή του λόγου της διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος στο οριακό φορτίο και στην κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση του τοπικού λυγισμού.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάρρηξη σεισμικού ρήγματος επιβάλλει μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς καυσίμων προκαλώντας την έντονη καταπόνηση τους. Ένας πιθανός μηχανισμός αστοχίας είναι η ανάπτυξη τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού εξαιτίας έντονης θλιπτικής καταπόνησης και η μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω οβαλοποίησης της διατομής. Η φέρουσα ικανότητα ενός αγωγού εξαρτάται από το πάχος του τοιχώματος, τη διάμετρο, την εσωτερική πίεση, το βάθος ταφής του αγωγού, το είδος του εδάφους, την ποιότητα του χάλυβα και τις αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Η αστοχία τύπου κελύφους, συνδεδεμένη με τοπικό λυγισμό, είναι πιθανότερη σε αγωγούς με μεγάλο λόγο διαμέτρου προς πάχος του τοιχώματος και μεγάλο βάθος ταφής, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ευνοείται η αστοχία τύπου δοκού, συνδεδεμένη με καθολικό λυγισμό και ανύψωση του αγωγού εκτός του ορύγματος [1]. Η ποιότητα του χάλυβα, καθώς και το μέγεθος των αρχικών ατελειών και της εσωτερικής πίεσης επηρεάζουν την απόκριση του φορέα και λαμβάνονται υπόψη για την ανάπτυξη αναλυτικών σχέσεων αστοχίας [2]. Η παρουσία του περιβάλλοντος εδάφους δρα ευεργετικά στη απόκριση του αγωγού, καθώς αυξάνεται το οριακό φορτίο και αναπτύσσεται δυσκολότερα ο τοπικός λυγισμός [3]. Η φέρουσα ικανότητα των αγωγών αυξάνεται και με την παρουσία της εσωτερικής πίεσης [4]. Στο [5] παρουσιάστηκαν πειράματα κάμψης τεσσάρων σημείων σε αγωγούς βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι θλιπτικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις κατά την αστοχία καθώς και το οριακό φορτίο τους. Στο [6] έχουν ληφθεί υπόψη φορτία εσωτερικής πίεσης και αξονικά φορτία για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των αγωγών. Στο [7] προτάθηκε αναλυτική σχέση αναλυτική σχέση προτάθηκε για τον προσδιορισμό του οριακού φορτίου βασισμένη σε πείραμα αγωγών υπό καθαρή κάμψη. Εκτός από τις αναλυτικές σχέσεις και τις πειραματικές διατάξεις, για την πρόβλεψη της αστοχίας αγωγών λόγω σεισμικών ρηγμάτων έχουν επίσης αναπτυχθεί αριθμητικά προσομοιώματα, όπου το περιβάλλον έδαφος προσομοιώνεται με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία και επιβάλλονται εγκάρσιες μετατοπίσεις, ενώ εξετάζεται η επιρροή του βάθους ταφής του αγωγού [8]. Στο [9] διερευνήθηκαν οι πιθανοί τρόποι αστοχίας αγωγών διερχόμενων από σεισμικά ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και προτάθηκε αναλυτική μέθοδος για την αποφυγή του τοπικού λυγισμού, ενώ στο [10] μελετήθηκαν αγωγοί που διέρχονται από ρήγματα για διάφορες τιμές της γωνίας αγωγού – ρήγματος με την αντίστοιχη αναλυτική μέθοδο. Στο [11] διερευνήθηκε η επιρροή του εδαφικού υλικού στην απόκριση του αγωγού λαμβάνοντας υπόψη το εύρος ταφής του αγωγού και το υλικό επίχωσης.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά αγωγών υποβαλλόμενων σε εγκάρσια φορτία, προσομοιώνοντας τη διάρρηξη σεισμικού ρήγματος, όπου η κύρια μορφή αστοχίας είναι η ανάπτυξη τοπικού λυγισμού στο τοίχωμα του αγωγού. Για τη διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε η αριθμητική προσομοίωση της πειραματικής διάταξης που παρουσιάζεται στο [5] και στη συνέχεια ένα απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα για τη διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων. Διερευνάται το οριακό φορτίο των αγωγών, το μέγεθος της οβαλοποίησης της διατομής τους καθώς και η μορφή αστοχίας τους. Εξετάζονται αγωγοί με λόγο διαμέτρου προς πάχος του τοιχώματος που κυμαίνεται από 13 έως 90, πραγματοποιούνται επίσης συγκρίσεις με τις κανονιστικές προβλέψεις του EN1993 – part 4.3 [12] και του CSA667 – 02 [13].

3. ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Η οριακή αντοχή των αγωγών υπολογίζεται βάσει των σχέσεων του EN1993 – part 4.3 [12], όπου η ροπή πλαστικοποίησης M_p της διατομής του φορέα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ. (1), το όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων ε_{cr} σύμφωνα με τις εξ. (2) και (3), και το όριο της οβαλοποίησης f της διατομής του φορέα σύμφωνα με την εξ. (4) του CSA667 – 02 [13].

$$M_p = 4r^2 t f_y \quad (1)$$

όπου t είναι το πάχος του τοιχώματος του αγωγού, r η ακτίνα του αγωγού και f_y το όριο διαρροής του χάλυβα.

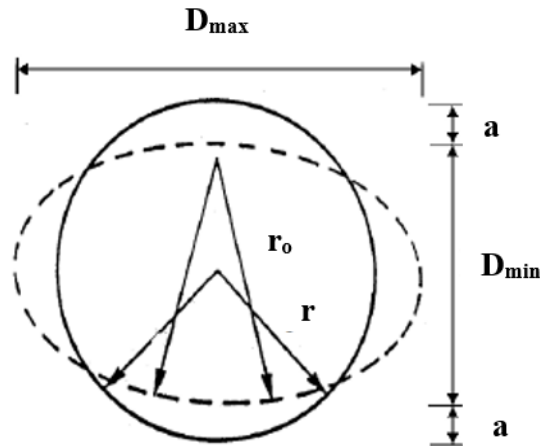
$$\varepsilon_{cr} = 0.25 \frac{t}{r_o} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{p r_o}{E t} \right) \frac{|p|}{p}, \text{ για } : \frac{r_o}{t} \leq 60 \quad (2)$$

και

$$\varepsilon_{cr} = 0.10 \frac{t}{r_o} + 3000 \left(\frac{p r_o}{E t} \right) \frac{|p|}{p}, \text{ για } : \frac{r_o}{t} \geq 60 \quad (3)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και p είναι η πίεση λαμβανομένη ως θετική στην περίπτωση της εσωτερικής πίεσης, ενώ αρνητική στην περίπτωση της εξωτερικής πίεσης. Επίσης ως r_o ορίζεται:

$$r_o = \frac{r}{1 - \frac{3a}{r}} \quad (4)$$



Σχ. 1: Ακτίνα r_o σε μια ωσειδώς παραμορφωμένη διατομή (EN 1993 – part 4.3)

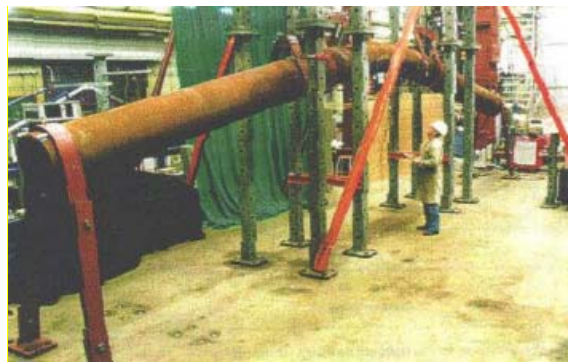
$$f = \frac{\Delta D}{D} \quad (5)$$

όπου D είναι η διάμετρος του αγωγού και ΔD είναι η μέγιστη αλλαγή της διαμέτρου. Η μέγιστη τιμή της οβαλοποίησης είναι 0.15.

4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

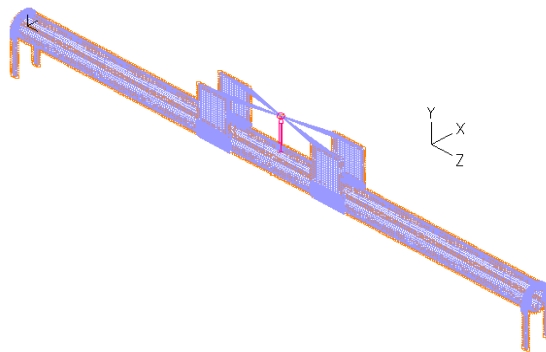
Ο εγκυρότερος τρόπος αποτίμησης της πραγματικής συμπεριφοράς των αγωγών είναι μέσω δοκιμών σε κατάλληλες πειραματικές διατάξεις. Οι Gresnigt and Van Foeken [5] πραγματοποίησαν πειράματα κάμψης τεσσάρων σημείων, όπου η επιβαλλόμενη μετακίνηση λόγω σεισμικής διάρρηξης εφαρμόστηκε μέσω δυο κεντρικών ιμάντων, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2, ενώ οι δυο ακραίοι ιμάντες εξασφάλισαν τη σταθερότητα του συστήματος.

Το τμήμα του αγωγού εσωτερικά των κεντρικών ιμάντων υπόκειται σε καθαρή κάμψη, όπου και καταγράφεται η μέγιστη τιμή της ροπής. Σκοπός του πειράματος ήταν ο προσδιορισμός της θλιπτικής παραμόρφωσης αστοχίας και του αντίστοιχου οριακού φορτίου. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν μέσω ηλεκτρομηκυσιόμετρων που είχαν τοποθετηθεί στη θλιβόμενη και την εφελκόμενη περιοχή του αγωγού.



Σχ. 2: Πειραματική διάταξη Gresnigt και Van Foeken [5]

Για την προσομοίωση της πειραματικής διάταξης μορφώθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA [14], το οποίο απεικονίζεται στο Σχ. 3. Ο αγωγός έχει μήκος $L=12\text{m}$, διάμετρο $D=509\text{mm}$, πάχος $t=11.22\text{mm}$, με λόγο $D/t=45.4$.

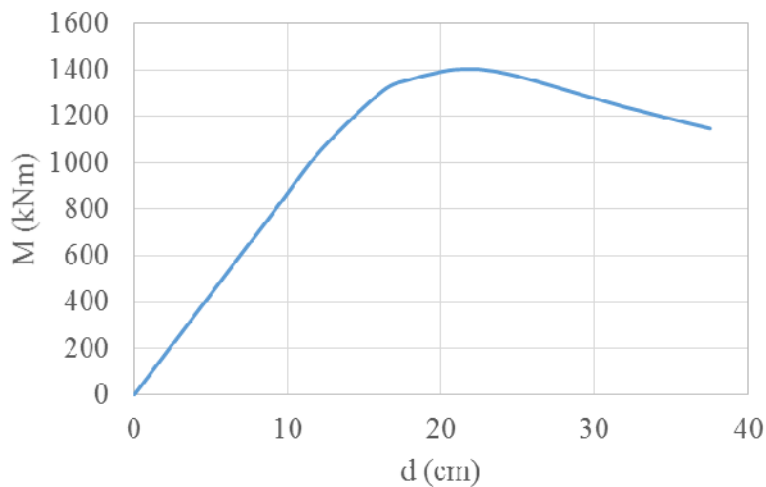


Σχ. 3: Αριθμητικό προσομοίωμα πειραματικής διάταξης

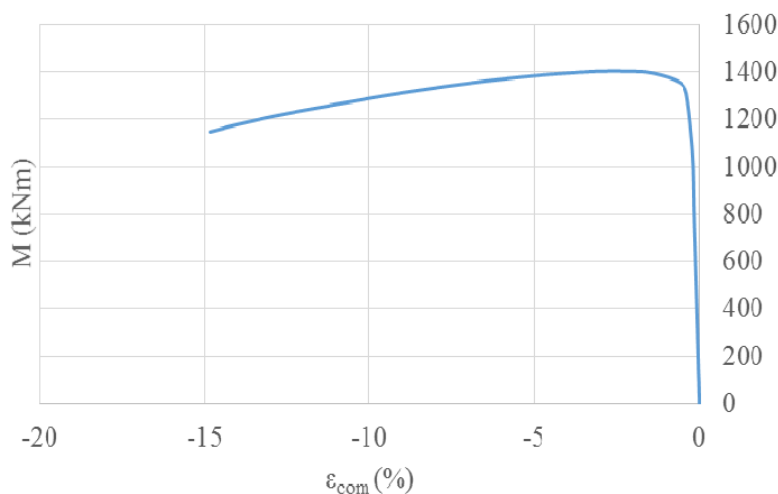
Ο αγωγός και οι ιμάντες προσομοιώνονται με 38728 και 2940 τετρακομβικά επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (4-node shell elements), αντίστοιχα. Η βέλτιστη διακριτοποίηση του φορέα προέκυψε κατόπιν σχετικής ανάλυσης ευαισθησίας. Για την διεπιφάνεια μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού και της εσωτερικής επιφάνειας των ιμάντων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής (contact elements). Το υλικό του αγωγού είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$, λόγο Poisson $\nu=0.3$, όριο διαρροής $f_y=479\text{MPa}$, όριο θραύσης $f_u=568\text{MPa}$ και παραμόρφωση θραύσης $\epsilon_u=39\%$ [5]. Η σχέση

τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα θεωρήθηκε ως ελαστική – γραμμικώς κρατυνόμενη. Οι ιμάντες προσομοιώθηκαν με ελαστικό υλικό εξαιτίας ελλিপών δεδομένων. Στους δυο κεντρικούς ιμάντες επιβλήθηκε το φορτίο μέσω άκαμπτων συνδέσμων. Στην άνω γενέτειρα του αγωγού έχει δεσμευτεί ο οριζόντιος εγκάρσιος βαθμός ελευθερίας για λόγους αριθμητικής ευστάθειας του μοντέλου, ενώ στους εξωτερικούς ιμάντες έχουν δεσμευτεί όλοι οι βαθμοί ελευθερίας στο άκρο τους.

Πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με χρήση του αλγορίθμου arc – length [15, 16, 17], ώστε να αποτυπωθεί η μεταλυγισμική συμπεριφορά του φορέα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται υπό τη μορφή δρόμων ισορροπίας σε όρους ροπής κάμψεως (M) – μετατόπισης (d) για το σημείο με τη μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση του φορέα και ροπής κάμψεως (M) – θλιπτικής παραμόρφωσης (ϵ_{com}) και απεικονίζονται στο σχήμα Σχ. 4 και Σχ. 5 και αντίστοιχα.



Σχ. 4: Δρόμος ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψεως - μετατοπίσεων



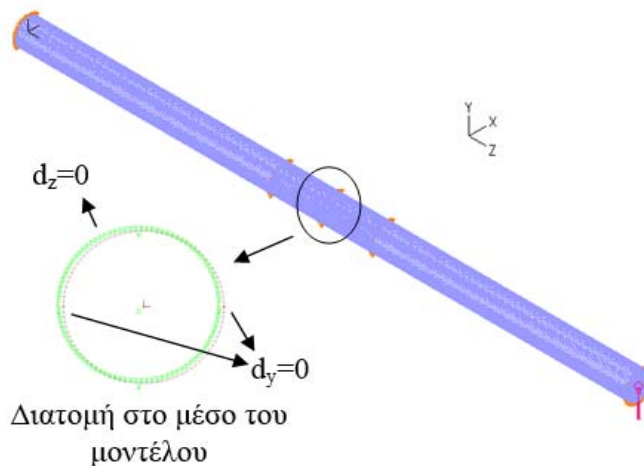
Σχ. 5: Δρόμος ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψεως - θλιπτικών παραμορφώσεων

Η ροπή στο οριακό σημείο (M_u) του φορέα ισούται με 1402kNm, όπως προκύπτει από το Σχ. 5, ενώ η αντίστοιχη πειραματική τιμή της ήταν 1507kNm [5]. Η συμπεριφορά του φορέα είναι αρχικά περίπου γραμμική και στη συνέχεια εκδηλώνεται μη γραμμικότητα μέχρι το οριακό σημείο. Η μεταλυγισμική συμπεριφορά είναι ασταθής όπως φαίνεται από

τον καθοδικό κλάδο του διαγράμματος. Η θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας στο οριακό σημείο του φορέα είναι $\epsilon_u = -1.37\%$. Οι Gresnigt and Van Foeken [5] δίνουν τη μέση τιμή της οριακής θλιπτικής παραμόρφωσης ως $\epsilon_{u,exp} = -1.36\%$, η οποία προέκυψε από τρία ηλεκτρομηκυσιόμετρα τα οποία είχαν τοποθετηθεί σε απόσταση 250mm στην περιοχή εκδήλωσης του τοπικού λυγισμού στο μέσο του δοκιμίου. Τα ανωτέρω αποτελέσματα, σε όρους ροπής όσο και σε παραμορφώσεων επιβεβαιώνουν, την αξιοπιστία της αριθμητικής μεθόδου που χρησιμοποιείται.

5. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

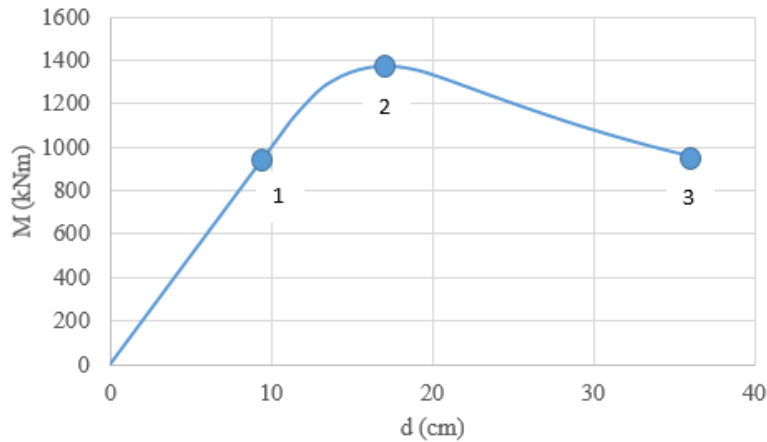
Περαιτέρω διερεύνηση της οριακής αντοχής του φορέα πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια με το απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα που παρουσιάζεται στο Σχ. 6. Σκοπός ήταν η διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων ώστε να διαπιστωθεί η ευαισθησία του φορέα σε παραμέτρους όπως ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος του τοιχώματος του αγωγού και ο νόμος του υλικού.



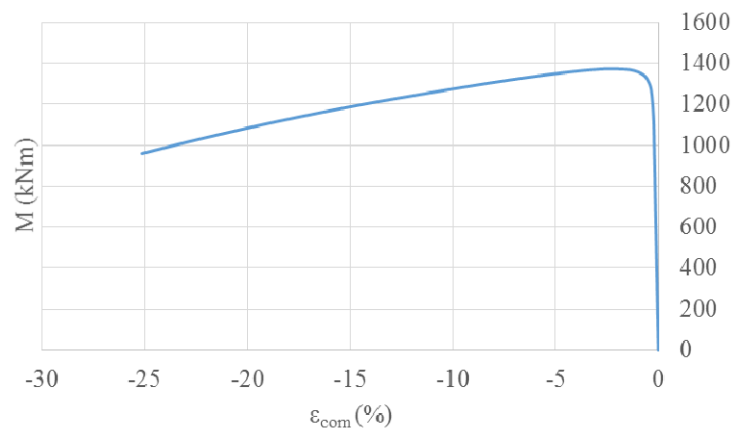
Σχ. 6: Απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα

Οι συνοριακές συνθήκες του απλοποιημένου αριθμητικού προσομοιώματος έχουν επιβληθεί ώστε να επιτρέπεται η οβαλοποίηση της διατομής του αγωγού. Στην κεντρική διατομή του αγωγού έχει δεσμευτεί η διαμήκης μετατόπιση (z) σε όλους τους κόμβους, ενώ στα δυο άκρα της οριζόντιας διαμέτρου έχει δεσμευτεί η κατακόρυφη εγκάρσια μετατόπιση (y), σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων του Σχ. 6. Οι ακραίες διατομές του αγωγού συνδέονται μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links) με εξωτερικό σημείο στο κέντρο τους, στο οποίο έχει δεσμευτεί η οριζόντια εγκάρσια μετατόπιση (x). Επίσης στα σημεία αυτά επιβλήθηκε η δύναμη. Το απλοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα έχει τον ίδιο νόμο υλικού, τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την ίδια μοντελοποίηση με το αριθμητικό προσομοίωμα της πειραματικής διάταξης.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή δρόμων ισοροπίας σε όρους ροπής κάμψης (M) – εγκάρσιας μετατόπισης (d) και ροπής κάμψης (M) – θλιπτικής παραμόρφωσης (ϵ_{com}) στα Σχ. 7 και Σχ. 8, αντίστοιχα.



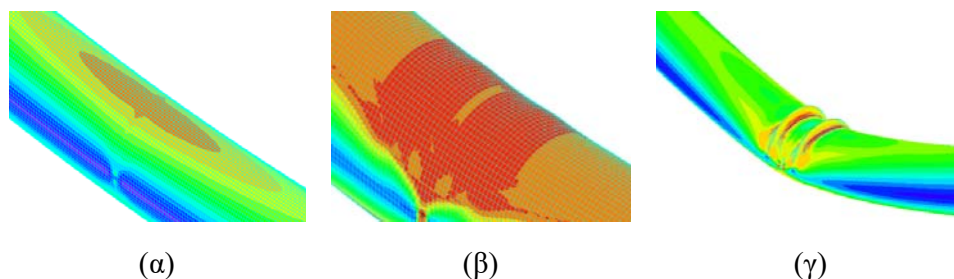
Σχ. 7: Δρόμος ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψεως - μετατοπίσεων



Σχ. 8: Δρόμος ισορροπίας σε όρους ροπών κάμψεως – ελάχιστων παραμορφώσεων

Η ροπή στο οριακό σημείο του αγωγού ισούται με 1375kNm, ενώ σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος [5] και την εξ. (1) είναι 1507kNm και 1392.4kNm αντίστοιχα. Για λόγους σύγκρισης υπενθυμίζεται πως η ροπή στο οριακό σημείο του αριθμητικού προσομοιώματος της πειραματικής διάταξης είναι 1402kNm (ενότητα 4). Η θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας στο οριακό σημείο του φορέα είναι $\epsilon_u = -1.28\%$, ενώ η πειραματική τιμή [5] είναι $\epsilon_{u,exp} = -1.36\%$ και του αριθμητικού προσομοιώματος της πειραματικής διάταξης είναι -1.37% (ενότητα 4). Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την ικανοποιητική σύγκλιση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων και κατά συνέπεια την αξιοπιστία της αριθμητικής προσομοίωσης.

Στο Σχ. 9 απεικονίζονται οι παραμορφωμένες εικόνες του φορέα πριν και μετά την αστοχία, η οποία οφείλεται σε τοπικό λυγισμό του τοιχώματος του αγωγού. Εκδηλώνονται δυο πτυχώσεις προς το εξωτερικό του αγωγού.



Σχ. 9: Παραμορφωμένες εικόνες φορέα (α) πριν την ανάπτυξη του τοπικού λυγισμού (θέση 1), (β) στο οριακό σημείο (θέση 2) και (γ) μετά την ανάπτυξη του τοπικού λυγισμού (θέση 3)

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

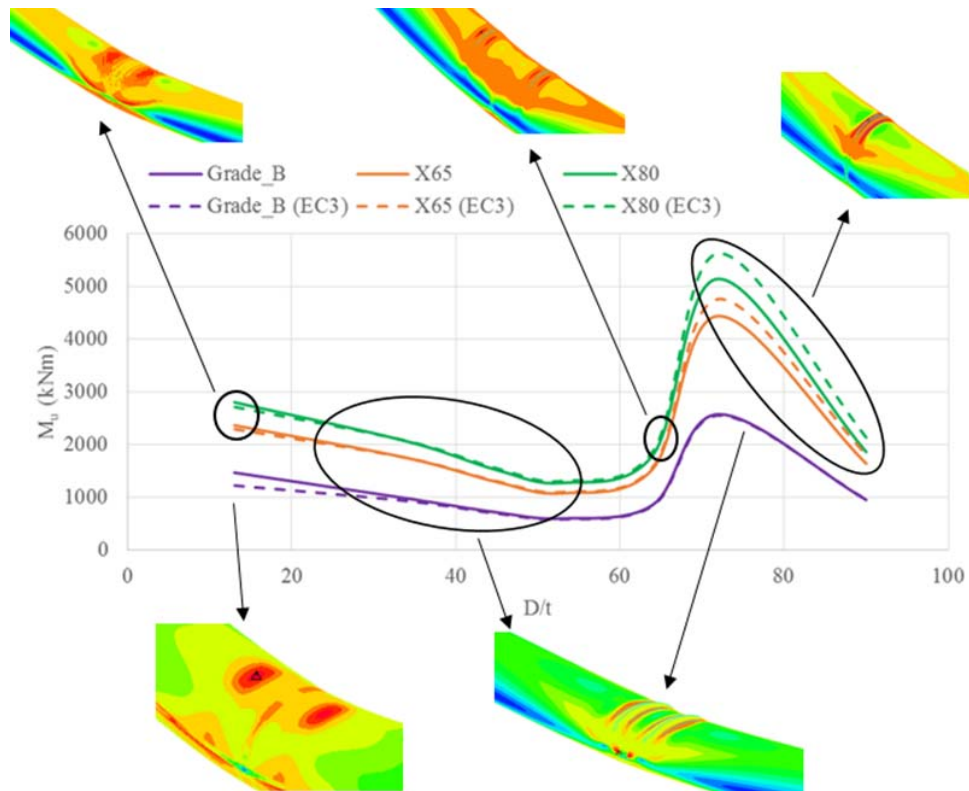
Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ώστε να διερευνηθεί η επιρροή διαφόρων παραμέτρων στη φέρουσα ικανότητα των αγωγών. Ειδικότερα, εξετάστηκε η επιρροή της ποιότητας του χάλυβα και μελετήθηκαν οι εμπορικά διαθέσιμες ποιότητες: (1) Grade B με όριο διαρροής $f_y=241\text{MPa}$ και όριο θραύσης $f_u=414\text{MPa}$, (2) X65 με όριο διαρροής $f_y=448.5\text{MPa}$ και όριο θραύσης $f_u=510\text{MPa}$ και (3) X80 με όριο διαρροής $f_y=530\text{MPa}$ και όριο θραύσης $f_u=621\text{MPa}$. Το μέτρο ελαστικότητας σε όλες τις περιπτώσεις ισούται με $E=210\text{GPa}$. Επιπλέον, μελετήθηκαν επτά διαφορετικές τιμές του λόγου D/t στο εύρος 13 έως 90, όπως παρατίθενται στον

Πίν. 1.

D (mm)	t (mm)	D/t
406.4	30.96	13
508	15.09	34
509	11.22	45
508	9.53	53
610	9.53	64
914.4	12.70	72
711	7.92	90

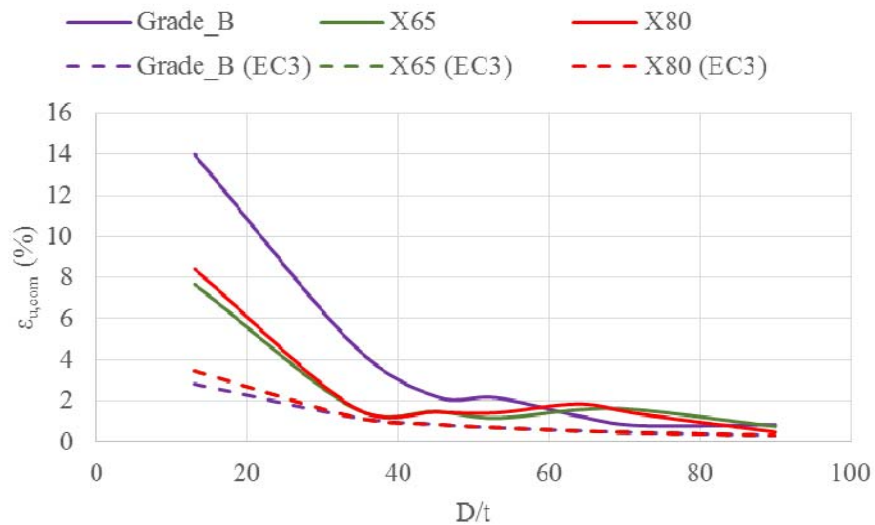
Πίν. 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών

Η αστοχία των αγωγών οφείλεται στην ανάπτυξη τοπικού λυγισμού του τοιχώματος σε όλες τις περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα της ροπής αστοχίας των αγωγών για τις διάφορες τιμές του λόγου D/t απεικονίζονται στο Σχ. 10. Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος απεικονίζεται η οριακή ροπή των αγωγών και στον οριζόντιο ο λόγος D/t . Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με την εξ. (1) του EN1993 – part 4.3.



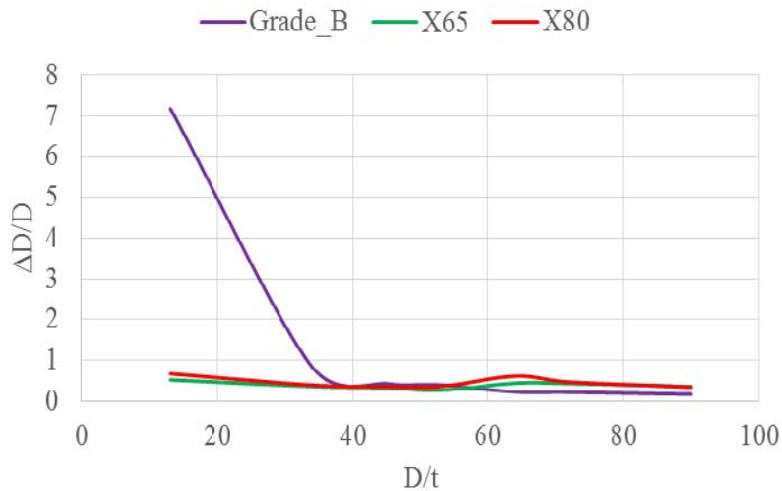
Σχ. 10: Οριακά φορτία και μορφές αστοχίας συναρτήσει του λόγου D/t για διάφορες ποιότητες χάλυβα

Για τιμές του λόγου $D/t < 55$ διαπιστώνεται μείωση του οριακού φορτίου με την αύξηση του λόγου D/t . Για μεγαλύτερες τιμές, όμως, του λόγου D/t το οριακό φορτίο αυξάνεται. Η διακύμανση αυτή οφείλεται στην επίδραση της ακτίνας του αγωγού στο οριακό φορτίο. Οι κατανομές των ανηγμένων θλιπτικών παραμορφώσεων των αγωγών για τις διάφορες τιμές του λόγου D/t απεικονίζονται επίσης στο Σχ. 10, όπου ο τοπικός λυγισμός προκύπτει είτε με μια είτε με δυο πτυχώσεις προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό του αγωγού. Στο Σχ. 11 απεικονίζονται οι οριακές θλιπτικές παραμορφώσεις κατά την αστοχία. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων είναι μεγαλύτερα από τις κανονιστικές προβλέψεις από 0.2% έως 21.4%.



Σχ. 11: Θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας συναρτήσει του λόγου D/t για διάφορες ποιότητες χάλυβα

Όπως απεικονίζεται στο Σχ. 11, καθώς μειώνεται ο λόγος D/t μειώνεται η θλιπτική παραμόρφωση αστοχίας των αγωγών. Οι θλιπτικές παραμορφώσεις για τις ποιότητες χάλυβα X65 και X80 είναι περίπου ίσες. Για $D/t < 60$ οι θλιπτικές παραμορφώσεις αστοχίας για τις ποιότητες χάλυβα X65 και X80 είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με την ποιότητα Grade B. Τα αποτελέσματα των θλιπτικών παραμορφώσεων συγκρίνονται με τις εξ. (2) και (3). Σε όλες τις περιπτώσεις τα αριθμητικά αποτελέσματα δίνουν μεγαλύτερες ανηγμένες παραμορφώσεις κατά την αστοχία από τις προβλέψεις των κανονιστικών διατάξεων. Τα αποτελέσματα της οβαλοποίησης της διατομής των αγωγών απεικονίζονται στο Σχ. 12.



Σχ. 12: Οβαλοποίηση διατομής αγωγού συναρτήσει του λόγου D/t για διάφορες ποιότητες χάλυβα

Τα αποτελέσματα της οβαλοποίησης για τις ποιότητες χάλυβα X65 και X80 ταυτίζονται. Για τιμές του λόγου $D/t < 40$ η οβαλοποίηση της διατομής του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερη για την ποιότητα χάλυβα Grade B, ενώ για $40 < D/t < 55$ τα αποτελέσματα περίπου ταυτίζονται για όλες τις ποιότητες χάλυβα. Για $D/t > 55$ η οβαλοποίηση για την

ποιότητα Grade B είναι μικρότερη από τις ποιότητες X65 και X80. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αριθμητικά αποτελέσματα της οβαλοποίησης της διατομής των αγωγών δίνουν πολύ μικρότερες τιμές από το κανονιστικό όριο 15%.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόκριση χαλύβδινων αγωγών, τα οποία προσομοιώνουν τη διάρρηξη σεισμικού ρήγματος. Η εξεταζόμενη μορφή αστοχίας των αγωγών είναι ο τοπικός λυγισμός του τοιχώματος λόγω έντονης θλίψης. Για τη διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας των αγωγών μορφώθηκαν αριθμητικά προσομοιώματα και ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων. Πραγματοποιήθηκαν πλήρως μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA [14]. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται ως εξής:

- Η πολύ καλή σύγκλιση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων ανέδειξε την αξιοπιστία της αριθμητικής προσέγγισης και επίλυσης.
- Διαπιστώθηκε σύγκλιση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και αντίστοιχων προβλέψεων του EN1993 – part 4.3 σχετικά με τη θλιπτική παραμόρφωση εκδήλωσης του τοπικού λυγισμού.
- Η αύξηση της αντοχής του χάλυβα οδηγεί σε αύξηση του οριακού φορτίου του αγωγού.
- Η μορφή αστοχίας διαφοροποιείται με τη μεταβολή της ποιότητα του χάλυβα και του λόγου διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος του αγωγού (D/t).
- Οι θλιπτικές παραμορφώσεις κατά την αστοχία είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με τις κανονιστικές προβλέψεις.
- Η οβαλοποίηση της διατομής του αγωγού για λόγο $D/t < 40$ είναι πολύ μεγαλύτερη για την ποιότητα Grade B, ενώ για λόγο $40 < D/t < 55$ τα αποτελέσματα είναι περίπου τα ίδια σε σύγκριση με τις κανονιστικές σχέσεις. Στην περίπτωση όπου $D/t > 55$, η οβαλοποίηση για την ποιότητα Grade B είναι μικρότερη συγκριτικά με τις άλλες δυο ποιότητες χάλυβα. Σε όλες τις περιπτώσεις η οβαλοποίηση της διατομής του αγωγού είναι μικρότερη από τις κανονιστικές προβλέψεις.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Yun, H. and Kyriakides, S., "On the Beam and Shell Modes of Buckling of Buried Pipelines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 179-193, 1990
- [2] Dorey, A., Murray, D. and Cheng, R., "Critical Buckling Strain Equations for Energy Pipelines – A Parametric Study", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 128, pp. 248-255, 2006
- [3] Gantes, C.J. and Gerogianni, D.S., "Infinitely Long Buried Pipelines under Bending and Internal Pressure", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS*, Vol. 43, No. 2, pp. 101-114, 2002
- [4] Houliara, S. and Karamanos, S.A., "Buckling and Post-buckling of Long Pressurized Elastic Thinwalled Tubes under In-plane Bending", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 491-511, 2006

- [5] Gresnigt, A.M. and Van Foeken, R.J., "Local Buckling of UOE and Seamless Steel Pipes", *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE, Stavanger*, Vol. II, pp. 131-142, 2001
- [6] Chen, H., Ji, L., Huang, C., Wang, H. and Li, Y., "Analysis of Bending Test of 40-in X70 Line Pipe", *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 17-22, 2012
- [7] Thinvongpituk, C., Poonaya, S., Choksawadee, S. and Lee M., "The Ovalization of Thin-walled Circular Tubes Subjected to Bending", *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. II, July 2-4, London, U.K. 2008
- [8] Mahdavi, H., Kenny, S., Phillips, R. and Popescu R., "Comprehensive Parametric Study on Local Buckling Response of Buried Pipelines", *Proceedings, Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference (CSCE), St. John's, N.L.*, Vol. 1, pp. 177-186, 2009a
- [9] Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas P., "Finite Element Analysis of Buried Steel Pipelines Under Strike-slip Fault Displacements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, pp. 1361-1376, 2010
- [10] Vazouras, P., Karamanos, S.A. and Dakoulas P., "Mechanical Behavior of Buried Steel Pipes Crossing Active Strike-slip fault", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 41, pp. 164-180, 2012
- [11] Zhang, J., Liang, Z. and Han, C.J., "Buckling Behavior analysis of Buried Gas Pipeline under Strike-Slip Fault", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 21, pp. 921-928, 2014
- [12] EN 1993-4-3 (2007). Eurocode 3: Design of steel structures. Part 4-3, Pipelines. CEN, Brussels
- [13] CSA. 2003. Oil and gas pipeline systems. CSA standard CSA Z662 2003 Canadian Standards Association
- [14] ADINA R & D Inc., Theory and modelling guide Volume I: ADINA, Report ARD 08-7, Watertown, USA, 2008
- [15] Crisfield, M.A., "A Fast Incremental/Iterative Solution Procedure that Handles "Snapthrough", *Computers & Structures*, Vol. 13, pp. 55 – 62, 1981
- [16] Bathe, K.J. and Dvorkin, E.N., "On the Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equations", *Computers & Structures*, Vol. 17, Nos. 5 – 6 , pp. 871 – 879, 1983
- [17] Riks, E., "An Incremental Approach to the Solution of Snapping and Buckling Problems", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 15, No. 7, pp. 529 – 551, 1979

LOCAL BUCKLING INVESTIGATION OF BURIED STEEL PIPELINES DUE TO SEISMIC FAULT ACTIVATION

Aggelos C. Karvelis

PhD Candidate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: karvelis.aggelos@gmail.com

Vasileios E. Melissianos

Dr. Civil engineer

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: melissianosv@gmail.com

Charis J. Gantes

Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

SUMMARY

Onshore buried pipelines are the main mean for fuel transportation in order to meet the increasing energy demands of the economy and extend over long distance. When seismic areas are attempted, eventual pipe – fault crossing is increased. A fault activation leads to imposed large permanent ground displacements on the pipe, which the latter has to follow. The main failure modes in this case are tensile fracture of the girth welds between the adjacent pipe parts and local buckling of the pipe wall. Pertinent safety checks are carried out in terms of tensile and compressive strains, respectively.

The occurrence of local buckling is numerically investigated in the present study and the pertinent code-based strain limits are evaluated. Firstly, a numerical model is formulated that is calibrated based on experimental results from four-point bending tests. Then, a simplified numerical model is developed in order on the one hand to investigate the main parameters affecting the local buckling occurrence and on the other hand to formulate the basis for the next step of the research, where the surrounding soil will be taken into account. The evaluation of the numerical results reveals the unstable post-buckling behavior of the pipe. Moreover, the effect of the diameter over thickness ratio on the ultimate load and the critical buckling strain is investigated.