

Εμπειρική Σχέση για την Πρόβλεψη Αστοχίας Λόγω Λυγισμού Υπόγειων Αγωγών υπό Ανάστροφη Διάρρηξη

Μελισσιανός Βασίλειος¹, Βαμβάτσικος Δημήτριος², Γαντές Χάρης³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων αποτελούν κρίσιμο τμήμα της ενεργειακής υποδομής μιας χώρας καθώς εξασφαλίζουν τη μεταφορά και διανομή καυσίμων με οικονομικό τρόπο και ασφάλεια. Στην περίπτωση διέλευσης αγωγών από σεισμογενείς περιοχές, η ενεργοποίηση ενός διασταυρούμενου σεισμικού ρήγματος είναι πιθανό να προκαλέσει βλάβη του αγωγού με κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Στην περίπτωση ανάστροφης διάρρηξης, ο αγωγός υπόκειται σε σημαντική θλιπτική καταπόνηση, λόγω της κίνησης του ανερχόμενου τεμάχους του ρήγματος. Οι πιθανές μορφές αστοχίας σε αυτήν την περίπτωση είναι ο τοπικός ή καθολικός λυγισμός και η εφελκυστική θραύση σε θέσεις συγκολλήσεων. Καθοριστικές παράμετροι για το ποιά μορφή αστοχίας θα είναι κυρίαρχη είναι η τοπική λυγηρότητα του αγωγού (λόγος διαμέτρου προς πάχος D/t) και το βάθος ταφής. Σκοπός της μελέτης είναι η διατύπωση μιας εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της μορφής αστοχίας. Συγκεκριμένα, μέσω παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων και στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της γραμμικής διακριτικής ανάλυσης, προτείνεται μια εμπειρική σχέση που διαχωρίζει της περιοχές εμφάνισης των διαφορετικών μορφών αστοχίας στο χωρίο «βάθος ταφής – λόγος D/t » συναρτήσει της γεωμετρίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αγωγοί καυσίμων εκτείνονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και διέρχονται από περιοχές με γεωλογική ετερογένεια, αντιμετωπίζοντας κατά συνέπεια διάφορους γεω-κινδύνους. Οι σεισμικά προκαλούμενες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, όπως η ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος, έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα των αγωγών [1]. Μια ενδεχόμενη αστοχία του αγωγού συνδέεται με διακοπή λειτουργίας και σημαντικές οικονομικές απώλειες, ακόμα και με καταστάσεις που θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.

¹ Μεταδιδάκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, melissia@mail.ntua.gr

² Επ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, divamva@mail.ntua.gr

³ Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, chgantes@central.ntua.gr

Η διάρρηξη ενός ανάστροφου σεισμικού ρήγματος υποβάλλει τον αγωγό σε σημαντική θλιπτική καταπόνηση. Οι παράμετροι επιρροής της μηχανικής απόκρισης του αγωγού είναι η γωνία βύθισης του ρήγματος (ψ), η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος (β) (βλ. Σχήμα 1), ο λόγος διαμέτρου προς πάχος (D/t) και το βάθος ταφής (H). Οι Yun and Kyriakides [2] διετύπωσαν για πρώτη φορά εμπειριστατωμένα το ποιοτικό κριτήριο πως αγωγοί με μεγάλο λόγο D/t (μεγάλη τοπική λυγηρότητα) και βαθιά θαμμένοι αναμένεται να λυγίσουν τοπικά, ενώ αντιθέτως αγωγοί με μικρό λόγο D/t (μικρή τοπική λυγηρότητα) και ρηχά θαμμένοι αναμένεται να λυγίσουν καθολικά. Επισημαίνεται, επίσης, ότι ο σχεδιασμός αγωγών υπό σεισμική διάρρηξη γίνεται σε όρους παραμορφώσεων, καθώς είναι πρόβλημα επιβαλλόμενη μετακίνησης (EC8 – Part 4 [3], ASCE-ALA [4], CSA Z662 [5]).

Η έρευνα για τη μηχανική συμπεριφορά των αγωγών πραγματοποιείται μέσω πειραματικών δοκιμών (π.χ. [6]-[7]), αναλυτικών προσεγγίσεων (π.χ. [8]-[9]) και υπολογιστικών μοντέλων (π.χ. [10]-[14]). Η αριθμητική επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υλοποιείται συνήθως με χρήση του μοντέλου της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους (π.χ. [12]-[14]), το οποίο χαρακτηρίζεται ως απλό και αξιόπιστο και προτείνεται για τους λόγους αυτούς από τους σχετικούς κανονισμούς. Ο αγωγός μοντελοποιείται ως μια ελαστοπλαστική δοκός που εδράζεται επί μη-γραμμικών ελατηρίων μετάθεσης σε τέσσερις διευθύνσεις. Τα ελατήρια προσομοιώνουν την εδαφική αντίσταση για κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος και συγκεκριμένα: (α) τη διαμήκη κίνηση που προσομοιώνει την τριβή, (β) την εγκάρσια οριζόντια κίνηση, (γ) την κατακόρυφη προς τα κάτω και (δ) την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση.

Η συστηματική μελέτη των αγωγών υπό ανάστροφη διάρρηξη είναι σχετικά πρόσφατη, συγκριτικά με τις περιπτώσεις κανονικής διάρρηξης και διάρρηξης οριζόντιας ολίσθησης. Οι Joshi et al. [12] και Liu et al. [16] χρησιμοποίησαν το αριθμητικό μοντέλο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους για να εξετάσουν την επιρροή της γεωμετρίας της διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος και του βάθους ταφής, ενώ οι Zhang et al. [15] χρησιμοποίησαν συνεχές αριθμητικό μοντέλο για τον ίδιο σκοπό. Οι Rojhani et al. [17] πραγματοποίησαν για πρώτη φορά πειράματα με φυγοκεντρική (centrifuge tests) και επιβεβαίωσαν το ποιοτικό κριτήριο των Yun and Kyriakides [2]. Οι Jalali et al. [18] και Rofoei et al. [19] εκτέλεσαν πειράματα με διατμητικό κιβώτιο (shear-box experiments) προκειμένου να καταγράψουν τη μορφή αστοχίας του εδάφους, την παραμόρφωση της διατομής του αγωγού και να εξαγάγουν νέες σχέσεις για την κατακόρυφη εδαφική δύναμη προς τα άνω. Πρόσφατα, οι Demirci et al. [20], αξιολογώντας πειραματικά αποτελέσματα από φυγκεντρική, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η συμπεριφορά του αγωγού επηρεάζεται από τη σχετική δυσκαμψία αγωγού – εδάφους και πρότειναν τον περιορισμό του βάθους ταφής για την προστασία του αγωγού.

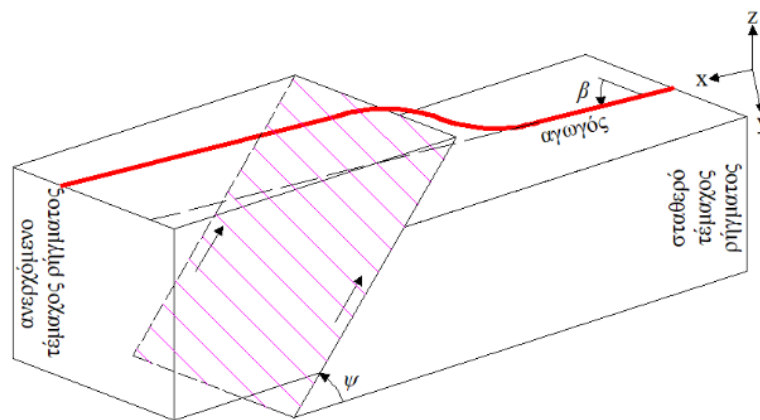
Η συμβολή των έως σήμερα δημοσιευμένων εργασιών είναι σημαντική για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός αγωγού υπό ανάστροφη διάρρηξη. Δεν έχουν καταφέρει, όμως, να απαντήσουν με συστηματικό τρόπο ως προς το όριο των παραμέτρων που διαχωρίζει τις αναμενόμενες μορφές αστοχίας. Δηλαδή, δεν υπάρχει έως σήμερα ποσοτικοποίηση του ποιοτικού κριτηρίου των Yun and Kyriakides [2]. Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να παρουσιάσει τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση της διατύπωσης μιας εμπειρικής σχέσης για την πρόβλεψη του αναμενόμενου τρόπου αστοχίας του αγωγού. Προς απάντηση αυτού του



ερωτήματος πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία μεγάλου πλήθους αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από παραμετρικές αναλύσεις προκειμένου να εξαχθεί η επιρροή της γεωμετρίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος στην αναμενόμενη μορφή αστοχίας.

2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΓΩΓΟΥ

Η διασταύρωση αγωγού – ρήγματος (Σχήμα 1) μοντελοποιείται με χρήση του εμπορικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA [21]. Αναπτύσσεται το αριθμητικό μοντέλο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους (Σχήμα 2), σύμφωνα τις προβλέψεις του ASCE-ALA [4] και τις οδηγίες του [13].

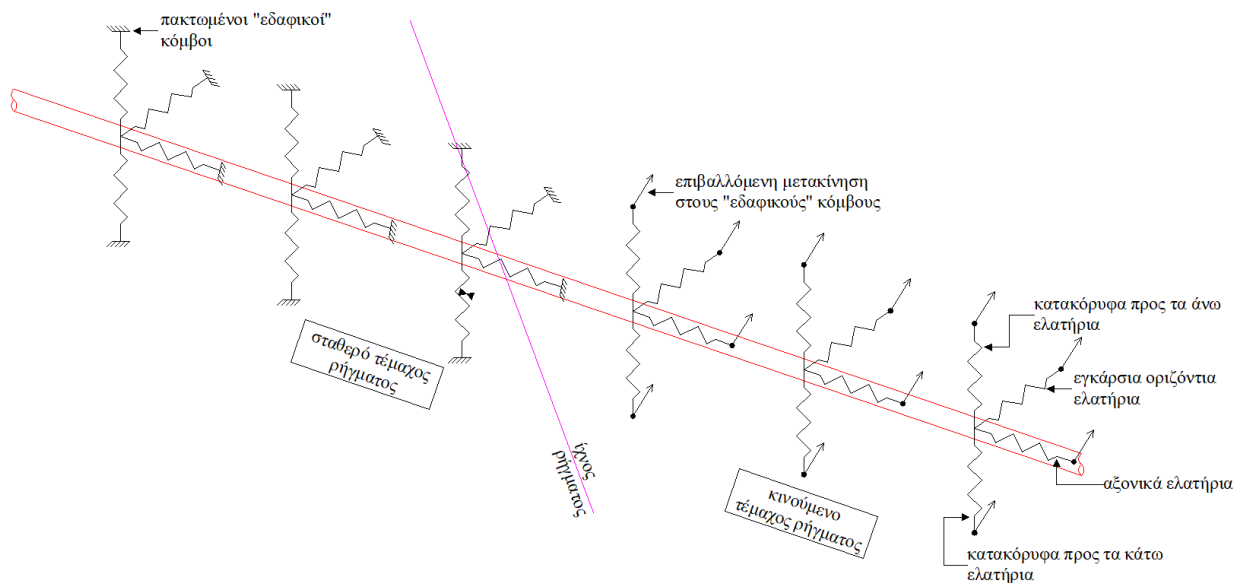


Σχήμα 1: Διασταύρωση αγωγού – ανάστροφου ρήγματος.

Εξετάζεται ένα ευθύγραμμο τμήμα αγωγού μήκους 1.500m, το οποίο προέκυψε κατόπιν παραμετρικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό του βέλτιστου μήκους προσομοίωσης προκειμένου στα άκρα να απαλείφεται η επιρροή σε όρους παραμορφώσεων της επιβαλλόμενης μετακίνησης στον αγωγό. Ο αγωγός διακριτοποιείται με στοιχεία αγωγού (PIPE elements), ώστε να συνυπολογίζεται η ένταση που οφείλεται στην οβαλοποίηση της διατομής μέσω επιπρόσθετων βαθμών ελευθερίας. Η διαμήκης διακριτοποίηση του αγωγού είναι ίση με 0.25m. Τέλος, η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα είναι διγραμμική (ελαστική – γραμμικώς κρατυνόμενη).

Το περιβάλλον έδαφος του αγωγού προσομοιώνεται με μη-γραμμικά (ελαστοπλαστικά) ελατήρια μετάθεσης σε τέσσερις διευθύνσεις [4], τα οποία συνδέουν τους κόμβους του αγωγού με τους «εδαφικούς» κόμβους. Οι τελευταίοι θεωρούνται πακτωμένοι στο σταθερό τέμαχος του ρήγματος, ενώ στους αντίστοιχους του ανερχόμενου τεμάχους του ρήγματος επιβάλλεται η μετακίνηση λόγω της διάρρηξης.

Η εγγενής μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας του προβλήματος αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή του αλγορίθμου Newton-Raphson. Ο αριθμός των βημάτων της ανάλυσης είναι επαρκώς μεγάλος για να επιτυγχάνεται αριθμητική σύγκλιση και να επιβάλλεται προοδευτικά η εδαφική μετακίνηση.

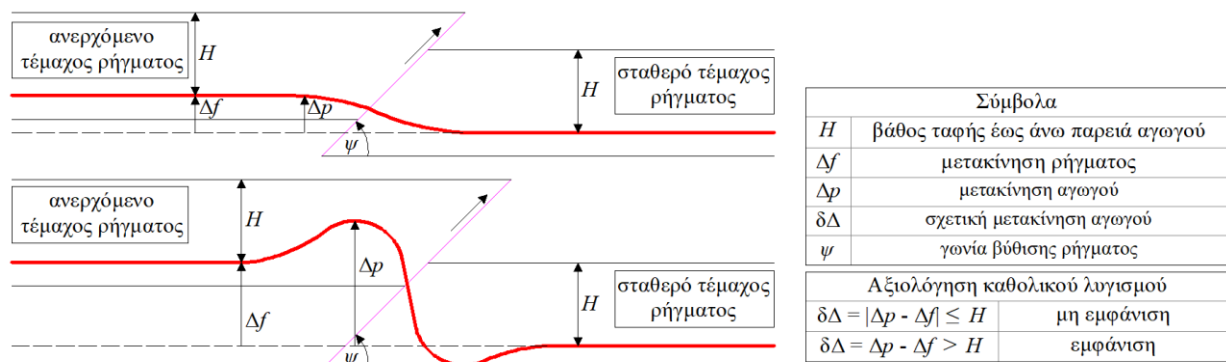


Σχήμα 2: Αριθμητικό μοντέλο διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος.

3 ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Οι κύριες μορφές αστοχίας του αγωγού που υπόκειται σε ανάστροφη διάρρηξη είναι η εφελκυστική θραύση των συγκολλήσεων, ο τοπικός και ο καθολικός λυγισμός. Η συγκέντρωση θλιπτικών παραμορφώσεων προκαλεί την ανάπτυξη ρυτίδωσης (τοπικού λυγισμού) στο κέλυφος του αγωγού. Το όριο θλιπτικής παραμόρφωσης του EC8 – Part 4 [3] για την αποφυγή τοπικού λυγισμού είναι $\varepsilon_c = \min \{1\%, 40t / D\%$, όπου t είναι το πάχος και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού.

Τέλος, ο καθολικός λυγισμός αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας κυρίως για τους υποθαλάσσιους αγωγούς που εδράζονται στον πυθμένα και οφείλεται συχνά σε θερμοκρασιακή μεταβολή (π.χ. [22]-[23]). Στην περίπτωση των χερσαίων αγωγών, η σχετική έρευνα είναι περιορισμένη και οι ελάχιστες σχετικές κανονιστικές προβλέψεις είναι κυρίως ποιοτικού χαρακτήρα. Ο καθολικός λυγισμός θεωρείται ότι επέρχεται ως μορφή αστοχίας όταν ο αγωγός εμφανισθεί στην επιφάνεια του εδάφους [5] και προσδιορίζεται με βάση το Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Εκδήλωση καθολικού λυγισμού χερσαίου αγωγού υπό ανάστροφη σεισμική διάρρηξη.

4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.1 Παράμετροι

Εξετάζεται ένας τυπικός αγωγός με ποιότητα χάλυβα API5L-X65 και μεταβλητή διατομή, ο οποίος είναι θαμμένος σε μεταβλητό βάθος εντός ορύγματος που επιχώνεται με μη-συνεκτικό έδαφος με γωνία τριβής 36° και ειδικό βάρος 18kN/m^3 . Σε κάθε περίπτωση, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κάτωθεν του ορύγματος, αποκλείοντας φαινόμενα επίπλευσης του αγωγού. Ο αγωγός θεωρείται ελεύθερος από ελαττώματα που οφείλονται σε μηχανικές δράσεις ή στη διάβρωση. Τα φορτία λειτουργίας και εσωτερικής πίεσης και εν γένει οι μη-σεισμικές δράσεις αμελούνται.

Η μηχανική συμπεριφορά ενός αγωγού που υπόκειται σε ανάστροφη διάρρηξη εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία της διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος και ειδικότερα από τη γωνία βύθισης του ρήγματος ψ και τη γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος β . Οι βασικές παράμετροι επί των οποίων γίνεται η αξιολόγηση για την πρόβλεψη της αστοχίας είναι ο λόγος D/t και το αδιάστατο βάθος ταφής H/D . Οι υπό εξέταση παράμετροι και τα όρια εντός των οποίων κυμαίνονται οι τιμές τους στην παρούσα διερεύνηση συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Παράμετροι υπό εξέταση.

Παράμετρος	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βήμα διακριτοποίησης
Αδιάστατο βάθος ταφής αγωγού (H/D)	1.00	3.60	0.20
Γωνία βύθισης ρήγματος (ψ)	30°	80°	10°
Γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος (β)	30°	90°	10°

Προκειμένου να παραχθεί ένα εύχρηστο εργαλείο για την εκτίμηση της αστοχίας του αγωγού υπό ανάστροφη διάρρηξη, οι επιλεχθείσες τιμές για το λόγο D/t είναι εμπορικά διαθέσιμες (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Λόγος διαμέτρου προς πάχος (D/t).

Διάμετρος (D)	Πάχος τοιχώματος (t)	Λόγος D/t
168.30mm (6in)	(7.11 – 21.95)mm	23.67 – 7.67
219.10mm (8in)	(6.35 – 22.23)mm	34.50 – 9.86
237.10mm (10in)	(6.35 – 28.58)mm	43.01 – 9.56
323.90mm (12in)	(6.35 – 33.32)mm	51.01 – 9.72
406.40mm (16in)	(6.35 – 40.49)mm	64.00 – 10.04
508.00mm (20in)	(6.53 – 50.01)mm	77.79 – 10.16
610.00mm (24in)	(6.35 – 59.54)mm	96.06 – 10.25
711.00mm (28in)	(7.92 – 15.88)mm	89.77 – 44.77

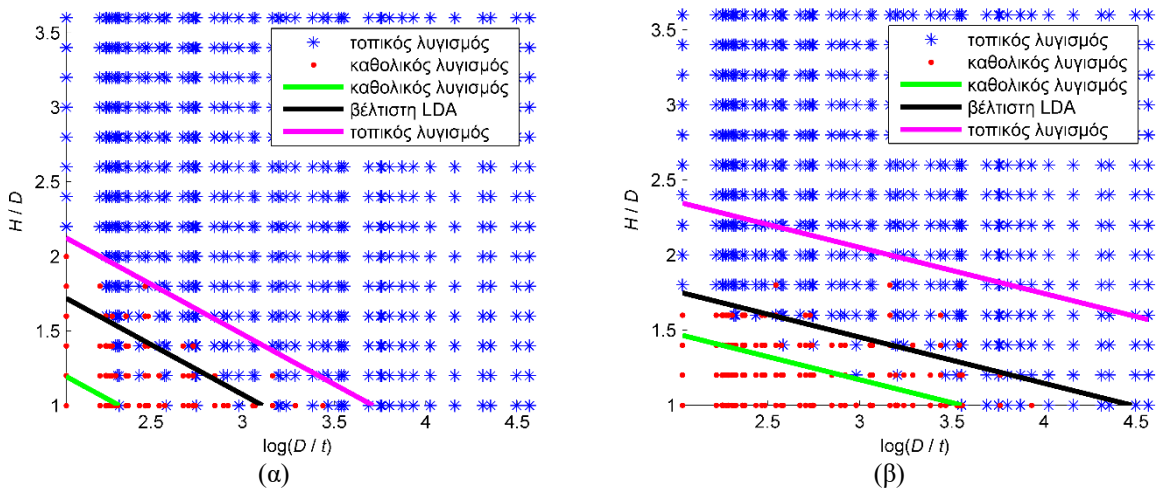
4.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία για τη διατύπωση της εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης της αναμενόμενης μορφής αστοχίας του αγωγού υπό ανάστροφη διάρρηξη περιλαμβάνει αρχικά την εκτέλεση αριθμητικών αναλύσεων για όλους τους συνδυασμούς της γεωμετρίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος και για όλες τις παραμέτρους του Πίνακα 2. Σημειώνεται πως η περίπτωση γωνίας βύθισης $\psi = 90^\circ$ δεν εξετάζεται, καθώς (α) πρόκειται για θεωρητική περίπτωση δεδομένου ότι η καθετότητα της επιφάνειας διάρρηξης στην περιοχή του αγωγού είναι εξαιρετικά σπάνια στη φύση λόγω της διάδοσης της διάρρηξης στην εδαφική στρωματογραφία και (β) προέκυψε από τη σχετική

διερεύνηση ότι στην περίπτωση αυτή όπου ο αγωγός υπόκειται κυρίως σε κάμψη, δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός των μορφών αστοχίας στο χωρίο «βάθος ταφής – λόγος D/t ». Επισημαίνεται πως η εφελκυστική θραύση δεν εμφανίζεται ως μορφή αστοχίας στο εύρος των παραμέτρων που ερευνήθηκαν και λόγω των ορίων του EC8 – Part 4 [3] που υιοθετούνται και κατά συνέπεια δεν εξετάζεται περαιτέρω.

Ενδεικτικά αποτελέσματα των αναλύσεων απεικονίζονται στο Σχήμα 4. Εφαρμόζεται η Γραμμική Διακριτική Ανάλυση (Linear Discriminant Analysis – LDA) [24] για το διαχωρισμό των περιοχών εκδήλωσης των μορφών αστοχίας, από την οποία προκύπτει η ευθεία «βέλτιστη LDA». Διαπιστώνεται, όμως, ότι στην περιοχή εκατέρωθεν της «βέλτιστης LDA» δεν είναι εφικτός ο ασφαλής διαχωρισμός των μορφών αστοχίας, λόγω της ευαισθησίας του συστήματος σε μικρές μεταβολές των παραμέτρων. Σημειώνεται ότι ενδεχομένως για πολύ μικρή αύξηση της μετακίνησης ρήγματος να προκληθεί διαφορετική μορφή αστοχίας από αυτή που καταγράφεται και κατά συνέπεια να υπάρχει «αλληλεπίδραση» των μορφών αστοχίας. Το στοιχείο αυτό δεν εξετάζεται, καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο η μορφή αστοχίας που επέρχεται για τη μικρότερη τιμή της εδαφικής μετακίνησης.

Ακολούθως, προκειμένου να οριοθετηθούν οι περιοχές αποκλειστικής εκδήλωσης τοπικού και καθολικού λυγισμού αντίστοιχα, δημιουργούνται παράλληλα όρια προς την ευθεία «βέλτιστη LDA». Ειδικότερα, στην περιοχή αριστερά του ορίου «καθολικός λυγισμός» αναμένεται η εκδήλωση αποκλειστικά καθολικού λυγισμού, ενώ στην περιοχή δεξιά του ορίου «τοπικός λυγισμός» αναμένεται η εκδήλωση αποκλειστικά τοπικού λυγισμού.

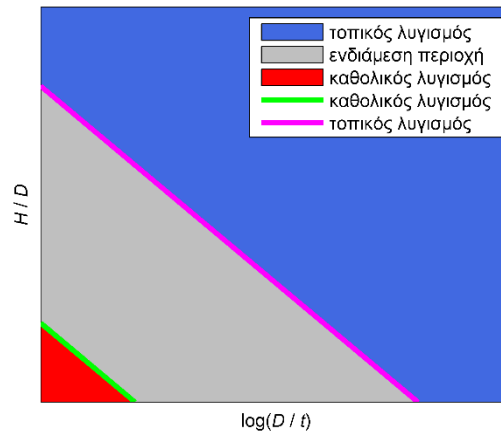


Σχήμα 4: Μορφές αστοχίας αγωγού υπό αναστροφή διάρρηξη για (α) γωνίες $\psi = 40^\circ$ και $\beta = 60^\circ$ και (β) γωνίες $\psi = 70^\circ$ και $\beta = 30^\circ$.

Η εξίσωση ευθείας για τα όρια «καθολικός λυγισμός» και «τοπικός λυγισμός» είναι:

$$A(\psi, \beta) \cdot \log_{10}\left(\frac{D}{t}\right) + B(\psi, \beta) \cdot \left(\frac{H}{D}\right) + 1 = 0 \quad (1)$$

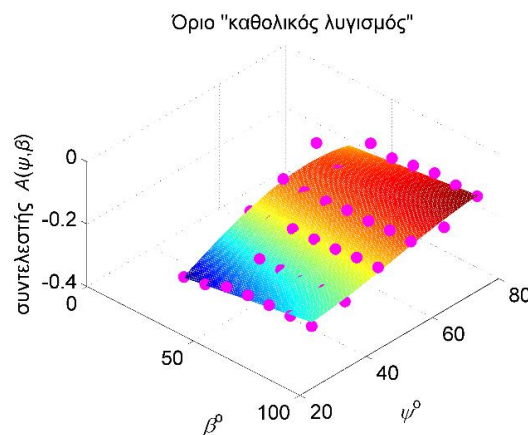
Η ανωτέρω ανάλυση και ο καθορισμός των περιοχών αποτυπώνεται γραφικά στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Γραφική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας του αγωγού στο χωρίο «βάθος ταφής – λόγος D/t ». Από κάθε συνδυασμό της γεωμετρίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος, δηλαδή από κάθε ζεύγος γωνιών (ψ, β) προκύπτουν δύο εξισώσεις της μορφής της σχέσης (1) για τα όρια «καθολικός λυγισμός» και «τοπικός λυγισμός». Συγκεντρώνοντας όλες τους συντελεστές $A(\psi, \beta)$ και $B(\psi, \beta)$ για κάθε μία από τις δύο ευθείες, εφαρμόζεται τρισδιάστατη προσαρμογή καμπύλης (3D curve fitting) με συνάρτηση της μορφής:

$$f(\psi, \beta) = p_1 + p_2\beta + p_3\psi + p_4\beta\psi + p_5\psi^2 + p_6\beta\psi^2 + p_7\psi^3 \quad (2)$$

όπου p_1, p_2, \dots, p_7 είναι οι σταθεροί όροι. Η σχέση (2) δίνει μεγαλύτερη έμφαση στη γωνία βύθισης ψ , καθότι έχει μεγαλύτερη επιρροή συγκριτικά με τη γωνία διασταύρωσης β . Ενδεικτικό αποτέλεσμα προσαρμοζόμενης καμπύλης για το συντελεστή $A(\psi, \beta)$ του ορίου «καθολικός λυγισμός» απεικονίζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Προσαρμοζόμενη καμπύλη για το συντελεστή $A(\psi, \beta)$ του ορίου «καθολικός λυγισμός». Οι συντελεστές $A(\psi, \beta)$ και $B(\psi, \beta)$ για όλες τις ευθείες παρατίθενται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Συντελεστές $A(\psi, \beta)$ και $B(\psi, \beta)$ για τα όρια «καθολικός λυγισμός» (ΚΛ) και «τοπικός λυγισμός» (ΤΛ).

Συντελεστές	Σταθεροί όροι						
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
$A_{\text{ΚΛ}}(\psi, \beta)$	-0.6272	0.0048	0.0091	-1.6529E-04	1.9910E-05	1.4529E-06	-9.2010E-07
$B_{\text{ΚΛ}}(\psi, \beta)$	0.9514	-0.0131	-0.0582	4.7404E-04	7.7825E-04	-4.0458E-06	-3.0738E-06
$A_{\text{ΤΛ}}(\psi, \beta)$	-0.7917	0.0052	0.0221	-1.7401E-04	-2.2553E-04	1.4552E-06	5.8575E-07
$B_{\text{ΤΛ}}(\psi, \beta)$	0.3473	-0.0080	-0.0254	2.8801E-04	2.8805E-04	-2.4685E-06	-7.3355E-07

4.3 Σφάλμα

Στη διαδικασία κατηγοριοποίησης [25], η ακρίβεια πρόβλεψης (precision) είναι το κλάσμα των θετικών προβλέψεων σε σχέση με τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ενώ η ευαισθησία είναι το κλάσμα των θετικών προβλέψεων ως προς το συνολικό αριθμό των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Η ισόρροπη ακρίβεια (balanced accuracy) είναι ένα εναλλακτικό μέτρο για τον προσδιορισμό της ακρίβειας της πρόβλεψης με έμφαση στις περιπτώσεις όπου τα δεδομένα είναι άνισα κατανομημένα. Για τον υπολογισμό αυτών των μέτρων χρησιμοποιούνται οι τιμές: TP (true positive) είναι το πλήθος των σημείων που προβλέφθηκαν ορθά, TN (true negative) είναι το πλήθος των σημείων που ορθώς απορρίφθηκαν, FP (false positive) είναι το πλήθος των σημείων που προβλέφθηκαν εσφαλμένα και FN (false negative) είναι το πλήθος των σημείων που εσφαλμένα απορρίφθηκαν.

Ο υπολογισμός του σφάλματος υλοποιείται θεωρώντας ως θετική πρόβλεψη τον τοπικό λυγισμό. Σκοπός είναι η εκτίμηση του σφάλματος που προκύπτει από την υιοθέτηση των ορίων «καθολικός λυγισμός» και «τοπικός λυγισμός» με τις παραμέτρους του Πίνακα 3. Τέλος, η ευαισθησία πρόβλεψης, η ακρίβεια πρόβλεψης και η ισόρροπη ακρίβεια δίδονται από τις σχέσεις (3), (4) και (5), αντίστοιχα:

$$\text{Ακρίβεια πρόβλεψης} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{Ευαισθησία πρόβλεψης} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$\text{Ισόρροπη ακρίβεια} = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{FN}{FN + TP} + \frac{FP}{FP + TN} \right] \quad (5)$$

Εξετάζοντας το σύνολο των σημείων (σύνολο αποτελεσμάτων αναλύσεων για όλους τους συνδυασμούς γεωμετρίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος), η ακρίβεια πρόβλεψης, η ευαισθησίας πρόβλεψης και η ισόρροπη ακρίβεια παρατίθενται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Ακρίβεια πρόβλεψης, ευαισθησία πρόβλεψης και ισόρροπη.

	Ακρίβεια πρόβλεψης	Ευαισθησία πρόβλεψης	Ισόρροπη ακρίβεια
«καθολικός λυγισμός»	0.9867	0.5000	0.5056
«τοπικός λυγισμός»	0.9981	0.8176	0.9047

Από τον Πίνακα 4 προκύπτει πως η ακρίβεια πρόβλεψης για καθολικό και τοπικό λυγισμό είναι υψηλή. Η ευαισθησία πρόβλεψης και η ισόρροπη ακρίβεια για το όριο «καθολικός λυγισμός» έχει τιμή πλησίον του 50%, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι το εμβαδό του χωρίου εκδήλωσης καθολικού λυγισμού είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με το εμβαδό της ενδιάμεσης περιοχής ή διαφορετικά περιέχει πολύ λιγότερα σημεία με συνέπεια τη μη πρόβλεψη πολλών σημείων καθολικού λυγισμού. Εν κατακλείδι, με βάση την ανωτέρω μεθοδολογία μπορούν να προβλεφθούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια οι περιοχές εκδήλωσης αποκλειστικά τοπικού λυγισμού και καθολικού λυγισμού.

4.4 Πρακτική εφαρμογή

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και τα αποτελέσματα έχουν άμεση εφαρμογή στην πράξη. Κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό του αγωγού είναι γνωστά η διατομή (λόγος D/t) και η γεωμετρία της διασταύρωσης με το ρήγμα, όπως προκύπτει από τη γεωλογική μελέτη για τη γωνία βύθισης ψ και από την όδευση του αγωγού για τη γωνία διασταύρωσης β . Έτσι, με γνωστό το ζεύγος γωνιών (ψ, β) δημιουργούνται τα όρια τοπικού και καθολικού λυγισμού από τις σχέσεις (1) και (2) και τον Πίνακα 3 και ακολούθως το γράφημα του Σχήματος 5. Έπειτα, για δεδομένο λόγο D/t και βάθος ταφής H/D προκύπτει σε ποια περιοχή βρίσκεται ο αγωγός. Εάν βρίσκεται στην περιοχή όπου κυριαρχεί είτε ο τοπικός είτε ο καθολικός λυγισμός, τότε ο μηχανικός οφείλει να λάβει τα κατάλληλα μέτρα προστασίας του αγωγού έναντι της αντίστοιχης μορφής λυγισμού. Εάν βρίσκεται στην ενδιάμεση περιοχή, τότε απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του αγωγού είναι η γεωμετρία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος, το βάθος ταφής και η λυγηρότητα του αγωγού (λόγος διαμέτρου προς πάχος, D/t). Η παρούσα έρευνα αφορά μια αρχική προσπάθεια ποσοτικοποίησης της διαπίστωσης πως αγωγοί με μεγάλο λόγο D/t και βαθιά θαμμένοι αστοχούν λόγω τοπικού λυγισμού, ενώ αγωγοί με μικρό λόγο D/t και ρηγά θαμμένοι αστοχούν λόγω καθολικού λυγισμού. Εκτελώντας πλήθος αριθμητικών παραμετρικών αναλύσεων και μέσω στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων εντοπίζονται στο χωρίο «βάθος ταφής – λόγος D/t » τρεις περιοχές: (α) περιοχή αποκλειστικής εκδήλωσης τοπικού λυγισμού, (β) ενδιάμεση περιοχή και (γ) περιοχή αποκλειστικής εκδήλωσης καθολικού λυγισμού. Διαπιστώνεται πως η γωνία βύθισης του ρήγματος διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στην εκδήλωση των μορφών αστοχίας συγκριτικά με τη γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος. Δημιουργούνται εμπειρικές σχέσεις για τα όρια που χωρίζουν τις περιοχές. Οι σχέσεις αυτές μπορούν να εφαρμοσθούν στην πράξη ώστε ο μηχανικός να λάβει τα κατάλληλα μέτρα προστασίας του αγωγού, ανάλογα με την αναμενόμενη κρίσιμη μορφή αστοχίας.

6 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Πρόγραμμα Horizon 2020 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μέσω του έργου 821054 — HYPERION — H2020-LC-CLA-2018-2019-2020 (“Development of a Decision Support System for Improved Resilience & Sustainable Reconstruction of historic areas to cope with Climate Change & Extreme Events based on Novel Sensors and Modelling Tools”).

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. O'Rourke MJ, Liu X. Seismic design of buried and offshore pipelines. Monograph No. 4''. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, U.S.A., 2012.
2. Yun HD, Kyriakides S. On the beam and shell modes of buckling of buried pipelines. *Soil Dyn Earthq Eng.* 1990;9(4):179-93.

3. European Committee for Standardization. Eurocode 8, Part 4: Silos, tanks and pipelines. CEN EN1998-4, Brussels, Belgium, 2006.
4. ALA American Lifelines Alliance. Guideline for the design of buried steel pipe – July 2001 (with addenda through February 2005). American Society of Civil Engineers, New York, U.S.A., 2001.
5. CSA Z662. Oil and gas pipeline systems, Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 2007.
6. Sarvanis GC, Karamanos SA, Vazouras P, Mecozzi E, Lucci A, Dakoulas P. Permanent earthquake-induced actions in buried pipelines: Numerical modeling and experimental verification. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2018;47(4):966–987.
7. Ha D, Abdoun TH, O’Rourke MJ, Symans MD, O’Rourke TD, Palmer MC, Stewart HE. Earthquake faulting effects on buried pipelines – case history and centrifuge study. *J Earthq Eng*. 2010;14(5):646–669.
8. Trifonov OV, Cherniy VP. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacement with account for service loads. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2012;33(1):54–62.
9. Sarvanis GC, Karamanos SA. Analytical model for the strain analysis of continuous buried pipelines in geohazard areas. *Eng Struct*. 2017;152:57–69.
10. Vazouras P, Dakoulas P, Karamanos SA. Pipe–soil interaction and pipeline performance under strike–slip fault movements. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2015;72:48–65.
11. Banushi G, Squelia N, Thiele K. Innovative analysis of a buried operating pipeline subjected to strike-slip fault movement. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2018;107:234–249.
12. Joshi S, Prashant A, Deb A, Jain SK. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2011;31(7):930–940.
13. Melissianos VE, Gantes CJ. Numerical modeling aspects of buried pipeline – fault crossing. In: Papadrakakis M, Plevris V, Lagaros ND (EDS). *Computational Methods in Earthquake Engineering, Computational Methods in Applied Sciences, VOL. 44*. Berlin: Springer Verlag; 2017. p 1–26.
14. Melissianos VE, Korakitis GP, Gantes CJ, Bouckovalas GD. Numerical evaluation of the effectiveness of flexible joints in buried pipelines subjected to strike-slip fault rupture. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2016;90:395–410.
15. Zhang J, Liang Z, Han CJ, Zhang H. Numerical simulation of buckling behavior of the buried steel pipeline under reverse fault displacement. *Mech Sci*. 2015;6:203-210.
16. Liu X, Zhang H, Wu K, Xia M, Chen Y, Li M. Buckling failure mode of buried X80 steel gas pipeline under reverse fault displacement. *Eng Fail Anal*. 2017;77:50-64.
17. Rojhani M, Moradi M, Galandarezadeh A, Takada S. Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting. *Can Geotech J*. 2012;49:659-670.
18. Jalali HH, Rofooei FR, Attari NKA. Performance of buried gas distribution pipelines subjected to reverse fault motion. *J Earthq Eng* 2018;22(6):1068-1091.
19. Rofooei FR, Attari NKA, Jalali HH. New method of modeling the behavior of buried steel distribution pipes subjected to reverse faulting. *ASCE J Pipeline Syst Eng Pract* 2018;9(1):04017029.
20. Demici HE, Bhattacharya S, Karamitros D, Alexander N. Experimental and numerical modeling of buried pipelines crossing reverse faults. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2018;114:198-214.
21. ADINA R & D Inc. ADINA 9.3.3 Release Notes, Watertown, U.S.A., 2017.
22. Shi R, Wang L, Guo Z, Yuan F. Upheaval buckling of a pipeline with prop imperfection on a plastic seabed. *Thin-Walled Struct*. 2013;65:1-6.
23. Wang L, Shi R, Yuan F, Guo Z, Yu L. Global buckling of pipeline in the vertical plane with soft seabed. *Appl Ocean Res*. 2011;33:130-136.
24. McLachlan GJ. Discriminant analysis and statistical pattern recognition. Wiley Interscience, New Jersey, U.S.A., 2004.
25. Olson DL, Delen D. Advanced data mining techniques, 1st edition. Springer, Berlin, Germany, 2008.