#### ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

# ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

A.M.: 2002.05.0037

# <u>ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ</u>

# ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής Γενικού Τμήματος (Επιβλέπων)

# ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

# ΤΣΟΥΤΣΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

[XANIA 2008]

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, τόσο για την επιλογή του θέματος όσο και για την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επίσης, τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: τον κ. Γεώργιο Καρατζά, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, και τον κ. Θεοχάρη Τσούτσο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Βαρβάρα Ζανιά, υποψήφια διδάκτωρ του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη πολύτιμη βοήθεια της.

Τους ευχαριστώ όλους θερμά

#### ΔΗΜΗΤΡΑ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη απαλλαγής από συμβατικά καύσιμα που είναι επιζήμια για το περιβάλλον και με υψηλή τιμή πώλησης, έστρεψε τους καταναλωτές στη χρήση ενός νέου πιο φιλικού και οικονομικού καυσίμου, όπως είναι το φυσικό αέριο. Η χρήση του φυσικού αέριου αυξάνεται σημαντικά παγκοσμίως, αλλά και στην Ελλάδα όπου τα δίκτυα επεκτείνονται συνεχώς και εξυπηρετούν ένα μεγάλο μέρος της χώρας. Η μεταφορά του φιλικού αυτού καυσίμου στον καταναλωτή γίνεται μέσα από δίκτυα υπόγειων, κυρίως, σωληνώσεων τα οποία αποτελούν κομμάτι των δικτύων κοινής ωφέλειας (lifelines) όπως είναι και οι δρόμοι, τα δίκτυα ύδρευσης, οι τηλεπικοινωνίες κλπ. Όπως έχει διαπιστωθεί από τη βιβλιογραφία, οι σεισμοί αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για τέτοια δίκτυα προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στις τοπικές κοινωνίες που εξυπηρετούνται από αυτά. Ιδιαίτερα προβλήματα προκαλούνται από την αστοχία των δικτύων φυσικού αερίου αφού μια σοβαρή βλάβη στις σωληνώσεις μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή αερίου, σε έκρηξη (υπό ορισμένες συνθήκες πίεσης) άλλα και σε πυρκαγιά. Τα περισσότερα προβλήματα στα δίκτυα φυσικού αερίου προκύπτουν στις υπόγειες σωληνώσεις εξαιτίας του γεγονότος ότι η συμπεριφορά τους εξαρτάται σημαντικά από το έδαφος που τις περιβάλλει.

Η εργασία αυτή ασχολείται, αρχικά, με μια εισαγωγή στο φυσικό αέριο, στους τρόπους χρήσης του, καθώς και στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση αυτή. Στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφή των συνηθέστερων αστοχιών που έχουν σημειωθεί σε δίκτυα φυσικού αερίου, παγκοσμίως, έπειτα από πρόσφατους μεγάλους σεισμούς. Επίσης, αναφέρονται και αναλύονται οι κυριότεροι σεισμικοί κίνδυνοι που προκάλεσαν βλάβες σε υπόγειες σωληνώσεις. Μετά τον καθορισμό των κυριότερων σεισμικών κινδύνων, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους και στις μεθόδους ανάλυσης που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας σωλήνωσης, έτσι ώστε να μην

διερεύνηση για τη σημαντικότερη αιτία αστοχίας ενός υπόγειου δικτύου φυσικού αερίου, πιο συγκεκριμένα λόγω έντονης μετατόπισης υποκείμενου σεισμικού ρήγματος, και με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού εξετάζονται διάφορες παράμετροι (διάμετρος αγωγού, υλικό, κλπ) που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας σωλήνωσης εξαιτίας της μετατόπιση αυτής.

# ΣΕΛΙΔΑ

| Ευχαριστίες                               | i   |
|---|-----|
| Περίληψη                                  | iii |
| Περιεχόμενα                               | iv  |
| Κεφάλαιο 1: Φυσικό αέριο                  | 1   |
| 1.1 Γενικά στοιχεία                       | 1   |
| 1.2 Άντληση-Παραγωγή φυσικού αερίου       | 2   |
| 1.3 Χρήσεις φυσικού αερίου                | 4   |
| 1.4 Οφέλη                                 | 7   |
| 1.5 Μειονεκτήματα                         | 9   |
| 1.6 Σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου      | 9   |
| 1.7 Φυσικό αέριο στην Ελλάδα              | 9   |
| Κεφάλαιο 2: Φυσικό αέριο και σεισμός      | 14  |
| 2.1 Βασικά στοιχεία τεχνικής σεισμολογίας | 14  |
| 2.2 Σεισμός και υπόγεια έργα              | 15  |

| 2.3 Βλάβες λόγω σεισμού σε συστήματα φυσικού αερίου1                              | 5                    |
|---|----------------------|
| 2.3.1Εισαγωγή   | 15                   |
| 2.3.2 Οικιακά συστήματα- Έμμεσες βλάβες   | 16                   |
| 2.3.3 Συστήματα διανομής- Άμεσες βλάβες   | 17                   |
| 2.4 Αστοχίες δικτύων φυσικού αερίου σε παλαιότερους σεισμούς                      | 18                   |
| 2.4.1 Γενικά στοιχεία   | 18                   |
| 2.4.2 Σεισμός Northrigde  | 19                   |
| 2.4.3 Σεισμός Chi-chi Taiwan  | 26                   |
| 2.4.4 Σεισμός Kobe  | 29                   |
| 2.5 Σεισμική συμπεριφορά- Αντισεισμική προστασία ελληνικού δικτύου φυσι<br>αερίου | коύ<br><b>32</b>     |
| 2.6 Συμπεράσματα  | 33                   |
| Κεφάλαιο 3: Γενικές αρχές αντισεισμικού σχεδιασμού αγωγών φυσικοι<br>αερίου       | Ú<br>35              |
| 3.1 Γενικά στοιχεία   | 35                   |
|   | •••                  |
| 3.2 Κριτήρια σχεδιασμού   | 37                   |
| 3.2 Κριτήρια σχεδιασμού<br>3.2.1 Ταξινόμηση σωληνώσεων                            | 37<br>38             |
| 3.2 Κριτήρια σχεδιασμού<br>3.2.1 Ταξινόμηση σωληνώσεων<br>3.2.2 Κατηγορίες εδαφών | 37<br>38<br>10       |
| <ul> <li>3.2 Κριτήρια σχεδιασμού</li> <li>3.2.1 Ταξινόμηση σωληνώσεων</li></ul>   | 37<br>38<br>10       |
| <ul> <li>3.2 Κριτήρια σχεδιασμού</li></ul>  | 37<br>38<br>10<br>40 |

| 3.3 Άλλες βασικές σχεδιαστικές παράμετροι <b>48</b>  |
|--|
| 3.4 Προδιαγραφές κατασκευής ενός δικτύου <b>50</b>   |
| 3.5 Κριτήρια σχεδιασμού για PGD <b>51</b>  |
| 3.5.1 Κριτήρια σχεδιασμού για τη διαμήκη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση<br>(PGD) <b>52</b>     |
| 3.5.2 κριτηρία σχεσιάσμου για την εγκαρσία μονιμή εσαφική<br>παραμόρφωση (PGD) <b>54</b>   |
| 3.6 Κριτήρια σχεδιασμού για τη διασταύρωση μιας σωλήνωσης με ρήγμα <b>56</b>               |
| Κεφάλαιο 4: Σεισμική ανάλυση για μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις λόγω<br>αστοχίας εδάφους60 |
| 4.1 Σεισμικοί κίνδυνοι <b>60</b>   |
| 4.2 Σεισμική ανάλυση για PGD <b>61</b>   |
| 4.2.1 Διαμήκης PGD <b>62</b>   |
| 4.2.2 Εγκάρσια PGD <b>67</b>   |
| 4.3 Σεισμική ανάλυση για μετατόπιση ρήγματος <b>71</b>                                     |
| 4.3.1 Εισαγωγή <b>71</b>   |
| 4.3.2 Χαρακτηριστικά του ρήγματος και μόνιμη μετακινηση <b>73</b>                          |
| 4.3.3 Ρήγμα και αγωγός <b>75</b>   |
| 4.4 Μέθοδοι ανάλυσης για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης <b>76</b>                            |
| 4.4.1 Αλληλεπίδραση εδάφους- αγωγού <b>76</b>  |
| 4.4.2 Αναλυτικά μοντέλα για συνεχείς σωληνώσεις  |
| 4.4.3 Αναλυτικά μοντέλα για τμηματικές σωληνώσεις  |

| 4.4.4 Μέθοδοι Πεπερασμένων Στοιχείων                        | 89              |
|---|-----------------|
| 4.5 Μέθοδοι ανάλυσης για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα     | 90              |
| Κεφάλαιο 5: Σεισμική ανάλυση αγωγού επί ρήγματος οριζόντιας | ολίσθησης<br>92 |
| 5.1 Εισαγωγή  | 92              |
| 5.2 Λογισμικό SSF   | 93              |
| 5.3 Παραμετρική διερεύνηση                                  | 95              |
| 5.3.1 Επίδραση γωνίας διάρρηξης                             | 95              |
| 5.3.2 Επίδραση μετατόπισης ρηγματος                         | 99              |
| 5.3.3 Επίδραση διαμέτρου αγωγού                             | 102             |
| 5.3.4 Επίδραση πάχους τοιχώματος αγωγού                     | 106             |
| 5.3.5 Επίδραση βάθους τοποθέτησης αγωγού                    | 109             |
| 5.3.6 Επίδραση εδαφικών ιδιοτήτων                           | 112             |
| 5.3.7 Επίδραση του υλικού του αγωγού                        | 115             |
| 5.4 Συμπεράσματα  | 118             |
| Βιβλιογραφία  | 121             |

# ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

# 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το φυσικό αέριο είναι ένα άχρωμο και άοσμο ορυκτό καύσιμο το οποίο εξάγεται από τα πετρώματα του υπεδάφους. Βρίσκεται σε αέρια κατάσταση και αποτελείται από ένα μίγμα αερίων όπως μεθάνιο (85-95%), αιθάνιο (7-12%) και σε μικρότερες ποσότητες από προπάνιο, βουτάνιο και πεντάνιο (πίνακας 1.1). Μπορεί να περιέχει και άλλες προσμίξεις καυσίμων αερίων (υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο ή και αμμωνία σε ίχνη), ενώ συνήθως περιέχει και αδρανείς προσμίξεις, όπως άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα και ίχνη αδρανών αερίων. Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα με σχετική πυκνότητα 0.55. Σε περίπτωση διαρροής διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα σε αντίθεση με το υγραέριο (LPG) που είναι βαρύτερο από τον αέρα (σχετική πυκνότητα 1.8). Το φυσικό αέριο δεν πρέπει να συγχέεται με το υγραέριο το οποίο είναι ελαφράκων το οποίο αποτελείται από προπάνιο και βουτάνιο και είναι παράγωγο καύσιμο από τα διυλιστήρια.

Η ύπαρξη και η χρήση του φυσικού αερίου δεν είναι κάτι το καινούργιο για τον άνθρωπο. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το φυσικό αέριο είχε ανακαλυφθεί, αιώνες πριν, σε Ελλάδα, Ινδία και Περσία. Ιστορικά, υπάρχουν αναφορές στον Πλούταρχο (100-125 μΧ) για τις «αιώνιες φωτιές» στην περιοχή του σημερινού Ιράν, που προέρχονταν από την ανάφλεξη του αερίου που εκλύονταν από το έδαφος. Γύρω από τις φωτιές αυτές είχε δημιουργηθεί ένα μυστήριο αφού οι άνθρωποι μη μπορώντας να δώσουν μια λογική εξήγηση για την ύπαρξή τους, προσέδωσαν στις φωτιές ένα υπερφυσικό και ιερό χαρακτήρα. Οι άνθρωποι τότε έχτιζαν ακόμα και ναούς γύρω από τις «αιώνιες φωτιές» εκφράζοντας με τον τρόπο αυτό ένα είδος λατρείας. Οι Κινέζοι, 2.500 χρόνια πριν, διαπίστωσαν ότι το φυσικό αέριο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές της καθημερινής τους ζωής. Έτσι, άρχισαν να διοχετεύουν το αέριο, με σωλήνες από μπαμπού, από τα ρηχά φρεάτια και στη συνέχεια το έκαιγαν κάτω από τα μεγάλα τηγάνια, για να εξατμιστεί το θαλάσσιο νερό και να παράγουν αλάτι. Η ευρεία χρήση του φυσικού αέριου ξεκινάει στις αρχές του 19ου αιώνα, το 1821 όπου χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο στις λάμπες φωτισμού δρόμων στη Βαλτιμόρη. Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο άρχισαν να κατασκευάζονται τα πρώτα δίκτυα αγωγών φυσικού αερίου μεταφέροντας το καύσιμο σε μεγάλες αποστάσεις.

# 1.2 ΑΝΤΛΗΣΗ – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Το φυσικό αέριο βρίσκεται κάτω από το έδαφος και μετά τον σχηματισμό του ανέρχεται στην επιφάνεια λόγω της χαμηλής του πυκνότητας. Κατά την άνοδό του το αέριο παγιδεύεται σε υπόγειους σχηματισμούς και δεν μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια. Οι υπόγειοι σχηματισμοί αποτελούνται από στρώματα πορώδους και ένα πυκνότερο αδιαπέραστο στρώμα βράχου στην κορυφή. Ο αδιαπέραστος αυτός βράχος παγιδεύει το φυσικό αέριο κάτω από το έδαφος. Αν οι σχηματισμοί του υπεδάφους είναι μεγάλοι σε μέγεθος, τότε εγκλωβίζεται μια μεγάλη ποσότητα φυσικού αερίου δημιουργώντας μια υπόγεια δεξαμενή (ταμιευτήρας). Το φυσικό αέριο παγιδεύεται, είτε μόνο του, είτε μαζί με πετρέλαιο. Για να μπορέσει να φτάσει το παγιδευμένο αέριο στην επιφάνεια χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις για να τρυπήσουν τον βράχο και να αντλήσουν το φυσικό αέριο στην επιφάνεια. Με την έναρξη λειτουργίας μιας γεώτρησης το αέριο θα αρχίσει να ανέρχεται με φυσική κυκλοφορία (λόγω της πίεσης) στην επιφάνεια, αλλά στο τέλος πάντοτε απαιτείται κάποια μορφή άντλησης για να επιτευχθεί η ολική εξαγωγή του φυσικού αερίου από το υπέδαφος (σχήμα 1.1). Για την μεταφορά του φυσικού αερίου επιστρατεύονται διάφορα μέσα όπως αγωγοί και δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν το φυσικό αέριο σε υγροποιημένη μορφή. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas-LNG) αποθηκεύεται σε θερμοκρασία -160°C. Η διαδικασία της υγροποίησης έχει ως αποτέλεσμα και τη μείωση του όγκου του αερίου, αφού το LNG καταλαμβάνει 600 φορές μικρότερο όγκο από ισοδύναμη ποσότητα αερίου σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.1: Εγκλωβισμός και άντληση φυσικού αερίου

| Συστατικά  | % κατά όγκο σύσταση  |
|--|----------------------|
| Μεθάνιο (CH <sub>4</sub> )   | 70-90                |
| Αιθάνιο (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )   | 5-15                 |
| Προπάνιο (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) και Βουτάνιο (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) | < 5                  |
| CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, ктλ.                                | μικρότερες ποσότητες |

Πίνακας 1.1: % Κατ' όγκο σύσταση του φυσικού αερίου



Σχήμα 1.2: Εγκαταστάσεις άντλησης φυσικού αερίου

# 1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ

### <u>Βιομηχανία</u>

Η χρήση του φυσικού αερίου στη βιομηχανία είναι ευρεία, αφού χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και χημικών όπως αμμωνία, μεθανόλη, αιθυλένιο και προπυλένιο. Η χρήση του στον βιομηχανικό τομέα έχει αρκετά πλεονεκτήματα, αφού εξασφαλίζεται η συνεχής παροχή αερίου από το δίκτυο και το καύσιμο είναι αρκετά φιλικό προς το περιβάλλον. Η χρήση του φυσικού αερίου στη βιομηχανία απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις τόσο για την παροχή, όσο και για τη διανομή του αλλά και τη μετατροπή των υπαρχόντων καυστήρων σε καυστήρες φυσικού αερίου ή σε καυστήρες διττής καύσης.

Βασικά χαρακτηριστικά του Φυσικού Αεριού στον βιομηχανικό τομέα σύμφωνα με τη ΔΕΠΑ:

• Συνεχής παροχή καυσίμου που εξασφαλίζει απρόσκοπτη λειτουργία.

- Μειωμένες εκπομπές ρύπων, που συμβάλλουν αποφασιστικά στο καθαρότερο περιβάλλον και στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Μειωμένο λειτουργικό κόστος διαχείρισης καυσίμου και συντήρησης.
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και οικονομία.
- Βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων.
- Ευχέρεια χειρισμού και ελέγχου.

### Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στις μέρες μας η χρήση του φυσικού αερίου ως καύσιμο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά διαδεδομένη. Μέχρι σήμερα σε αρκετές χώρες του κόσμου οι βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν ως καύσιμο το κάρβουνο αφού αποτελεί την πιο φθηνή καύσιμη ύλη. Η καύση του κάρβουνου, όμως, δημιουργεί τεράστια περιβαλλοντικά προβλήματα αφού εκπέμπει στον ατμοσφαιρικό αέρα υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Δεν είναι τυχαίο που οι βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες πηγές ρύπανσης του αέρα. Έτσι, τα προβλήματα ρύπανσης οδηγούν τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να στραφούν σε ένα πιο φιλικό καύσιμο όπως είναι το φυσικό αέριο. Οι φυσικές αντιρρυπαντικές ιδιότητες του φυσικού αερίου σε συνδυασμό με το χαμηλό λειτουργικό κόστος και την υψηλή του απόδοση σε θερμική ενέργεια, καθιστούν το φυσικό αέριο μοναδικό καύσιμο στην ηλεκτροπαραγωγή. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη ΔΕΠΑ, η χρήση φυσικού αερίου για παραγωγή ηλεκτρισμού σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου αυξάνει το βαθμό απόδοσης παραγωγής ηλεκτρισμού σε 50-55% έναντι 35-40% των συμβατικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών.

### <u>Οικιακή Χρήση</u>

Το φυσικό αέριο στον οικιακό τομέα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού, για το μαγείρεμα και τη θέρμανση.

Σύμφωνα με τη ΔΕΠΑ τα βασικά χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου στον οικιακό τομέα είναι:

- Σταθερή και μόνιμη παροχή, χωρίς εξαρτήσεις.
- Ασφάλεια στη χρήση, χωρίς οσμές, θορύβους και ρύπους.
- Εύκολη και απλή εγκατάσταση εξοπλισμού με καθαριότητα και οικονομία χώρων.
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των συσκευών και του εξοπλισμού, με υψηλότερη απόδοση και μικρότερο κόστος συντήρησης, χωρίς πρόσθετες δαπάνες για την ομαλή λειτουργία του (δεξαμενές, αντλίες, προθερμαντήρες, κ.λπ.).
- Οικονομία σε πολλά επίπεδα λαμβανομένου υπ' όψιν ότι η κατανάλωση αερίου δεν προπληρώνεται όπως στην περίπτωση προμήθειας και καύσεως πετρελαίου για λειτουργία συστήματος κεντρικής θέρμανσης.

#### <u>Αυτοκίνηση</u>

Το φυσικό αέριο έχει θεωρηθεί ως εναλλακτικό καύσιμο για τον τομέα των μεταφορών εδώ και αρκετά χρόνια. Στην πραγματικότητα, το φυσικό αέριο έχει χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει με καύσιμα τα οχήματα από τη δεκαετία του '30.

Οι εφαρμογές του φυσικού αερίου συνεχώς επεκτείνονται σε παγκόσμιο επίπεδο. Πρόκειται για το καύσιμο του 21ου αιώνα ασφαλές και οικονομικό που θα συμβάλει ουσιαστικά στη λύση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού προβλήματος. Σύμφωνα με τη Natural Gas Vehicle Coalition, υπάρχουν αυτήν την περίοδο 130,000 Οχήματα φυσικού αερίου (NGVs) στις Ηνωμένες Πολιτείες και πάνω από 2.5 εκατομμύρια NGVs παγκοσμίως.

Στην Ελλάδα, το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο στα αστικά λεωφορεία. Η Δ.Ε.Π.Α διαθέτει και λειτουργεί 2 σταθμούς ανεφοδιασμού λεωφορείων φυσικού αερίου, που εφοδιάζουν σήμερα το 20% των λεωφορείων του Ο.Α.Σ.Α στην Αττική με φυσικό αέριο.



Σχήμα 1.3: Χρήση φυσικού αερίου στις Η.Π.Α

# 1.4 ΟΦΕΛΗ

Το φυσικό αέριο αποτελείται, κυρίως, από μεθάνιο το οποίο δεν είναι τοξικό έτσι καθίσταται ως ένα καύσιμο το οποίο είναι αρκετά φιλικό με το περιβάλλον. Η περιβαλλοντική φιλικότητα του καυσίμου αυτού, η εύκολη διαχείρισή του, οι υψηλοί βαθμοί απόδοσης που παρέχουν οι νέες τεχνολογίες κατά τη χρήση του, το καθιστούν εξαιρετικά ελκυστικό και ανταγωνιστικό. Η θερμογόνος δύναμη του φυσικού αερίου ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που περιέχεται σε αυτό, τμήμα της οποίας απελευθερώνεται κατά την καύση του. Διακρίνεται σε ανώτερη και κατώτερη και εκφράζεται συνήθως σε Kcal/m<sup>3</sup>. Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του φυσικού αερίου κυμαίνεται από 8500 έως 11000 Kcal/m<sup>3</sup>.

Το φυσικό αέριο είναι ένα καύσιμο καθαρό, ασφαλές, αποδοτικό και παράλληλα οικονομικό. Η χρήση του σε όλους τους τομείς της κατανάλωσης προσφέρει σημαντικά αναπτυξιακά και οικονομικά οφέλη, εξασφαλίζοντας ένα καθαρότερο περιβάλλον και καλύτερη ποιότητα ζωής για τους πολίτες.

# Προστασία του περιβάλλοντος

Το φυσικό αέριο είναι η καθαρότερη πηγή πρωτογενούς ενέργειας, μετά τις ανανεώσιμες πηγές. Οι εκπεμπόμενοι ρύποι (πίνακας 1.2) είναι σε χαμηλότερα

επίπεδα απ' ότι στα συμβατικά καύσιμα, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς περιορίζοντας σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση.

| Τύπος<br>καυσίμου | Σωματίδια | Οξείδια<br>του<br>Αζώτου | Διοξείδιο<br>του<br>Θείου | Μονοξείδιο<br>του<br>Άνθρακα | Υδρογονάνθρακες |
|-------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|
| Κάρβουνο          | 1.092     | 387                      | 2.450                     | 13                           | 2               |
| Μαζούτ            | 96        | 170                      | 1.400                     | 14                           | 3               |
| Ντήζελ            | 6         | 100                      | 220                       | 16                           | 3               |
| Ф.А.              | 4         | 100                      | 0,3                       | 17                           | 1               |

Πίνακας 1.2: Εκπεμπόμενοι ρύποι σε σχέση με άλλα καύσιμα κατά την καύση σε μονάδα ατμοπαραγωγής σε mg /mj εισαγόμενης θερμότητας καυσίμου

#### Εξοικονόμηση ενέργειας

Λόγω της "καθαρότητας" των προϊόντων καύσης, το φυσικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές χωρίς την παρεμβολή εναλλακτών που έχουν ως συνέπεια ενεργειακές απώλειες. Τέλος με την υποκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο στην τελική κατανάλωση, κυρίως στις οικιακές και εμπορικές χρήσεις, θα αποφευχθούν οι απώλειες μετατροπής της πρωτογενούς πηγής ενέργειας σε ηλεκτρισμό καθώς και οι απώλειές κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

### Μείωση εξάρτησης από το πετρέλαιο

Η χρήση του φυσικού αερίου θα έχει σημαντικές θετικές επιδράσεις καθώς θα μειωθεί η εξάρτησή από το πετρέλαιο του οποίου η ευρεία χρήση έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

### Τόνωση της απασχόλησης

Το φυσικό αέριο προσφέρει τη δυνατότητα εισαγωγής νέων τεχνολογιών σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους. Παρέχει το κίνητρο για τον εκσυγχρονισμό του ενεργειακού εξοπλισμού των μονάδων. Επίσης, η διεύρυνση της χρήσης του

στον οικιακό, εμπορικό και βιομηχανικό τομέα συμβάλλει αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση της ανεργίας με τη δημιουργία νέων θέσεων στην αγορά εργασίας.

# **1.5 MEIONEKTHMATA**

Πέρα από τα τεράστια πλεονεκτήματα που προσφέρει το φυσικό αέριο, είναι σημαντικό να τονιστούν και οι κίνδυνοι που απορρέουν από τη χρήση του. Το φυσικό αέριο δεν είναι τελείως ακίνδυνο γιατί είναι εύφλεκτο και μπορεί να γίνει επικίνδυνο, ειδικά σε κλειστούς χώρους. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα με αποτέλεσμα να διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητο τον εξαερισμό των χώρων για να αποφευχθεί τυχόν ανάφλεξη. Τέλος, η κατασκευή των συστημάτων μεταφοράς, διανομής, κλπ πρέπει να γίνεται με τις αυστηρότερες προδιαγραφές ασφαλείας για να αποφευχθεί τυχόν διαρροή και πιθανή ανάφλεξη του αερίου. Ειδική μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται σε χώρες με μεγάλη σεισμικότητα, όπως η Ελλάδα, για την ελαχιστοποίηση της σεισμικής τρωτότητας των δίκτυων φυσικού αερίου.

# 1.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Οι εταιρίες διαχείρισης φυσικού αερίου εγκαθιστούν ένα δίκτυο υπόγειων, κυρίως, αγωγών για τη μεταφορά του αερίου από το σημείο άντλησης στους καταναλωτές. Οι αγωγοί λειτουργούν σε διάφορες τιμές πίεσης κατά μήκος του συστήματος. Οι μεγάλοι αγωγοί μεταφοράς λειτουργούν σε μεγάλες τιμές πίεσης, ενώ οι αγωγοί διανομής φυσικού αερίου που παρέχουν το φυσικό αέριο στους καταναλωτές λειτουργούν σε μικρότερες πιέσεις. Εκτός από τους αγωγούς, στα δίκτυα υπάρχουν μετρητές πίεσης, ρυθμιστές πίεσης και βαλβίδες απότομης διακοπής της ροής φυσικού αερίου σε περίπτωση διαρροής.

# 1.7 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Υπεύθυνη κατασκευής και διαχείρισης του ελληνικού δικτύου φυσικού αερίου είναι η Δημόσια Επιχείρηση Παραγωγής Αερίου (ΔΕΠΑ) από την οποία έχουν

χρησιμοποιήθει αρκετές πληροφορίες. Η ΔΕΗ είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής της ΔΕΠΑ και χρησιμοποιεί φυσικό αέριο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με φυσικό αέριο λειτουργεί ο σταθμός του Αγ. Γεωργίου στο Κερατσίνι από το 1997, συνολικής ισχύος 360 MW. Επίσης λειτουργούν και δύο μονάδες συνδυασμένου κύκλου στο Λαύριο (Μεγάλο και Μικρό Λαύριο, ισχύος 560 και 177 MW αντίστοιχα) και μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου στην περιοχή της Θράκης, ισχύος 370- 480 MW.



Σχήμα 1.4 : Δεξαμενόπλοιο που περιέχει υγροποιημένο αέριο στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης της Ρεβυθούσας

### Δίκτυο μεταφοράς

Το φυσικό αέριο εισάγεται στη Ελλάδα από:

- τη Ρωσία (74% κατανάλωσης) (Gazexport) μέσω αγωγών μεταφοράς με σημείο παραλαβής τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα,
- την Αλγερία σε υγροποιημένη μορφή (LNG), με ειδικό δεξαμενόπλοιο στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης της Ρεβυθούσας (κόλπος Μεγάρων).

Στο δίκτυο μεταφοράς του φυσικού αερίου περιλαμβάνονται:

Κεντρικός αγωγός μεταφοράς (σχήμα 1.5) αερίου υψηλής πίεσης (70 bar)
 από τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα μέχρι την Αττική, συνολικού μήκους

512 χλμ. Η διάμετρος του αγωγού είναι 36΄΄ για τα πρώτα 100 χλμ και 30΄΄ για τα υπόλοιπα.

- Κλάδοι μεταφοράς υψηλής πίεσης προς την ανατολική Μακεδονία και
   Θράκη, τη Θεσσαλονίκη, το Βόλο και την Αττική, συνολικού μήκους 440 χλμ.
- Μετρητικοί και ρυθμιστικοί σταθμοί για τη μέτρηση της παροχής αερίου και τη ρύθμιση της πίεσης.
- Σύστημα τηλεχειρισμού, ελέγχου λειτουργίας και τηλεπικοινωνιών.
- Κέντρα λειτουργίας και συντήρησης, στην Αττική, τη Θεσσαλονίκη και τη Θεσσαλία.
- Συνοριακός σταθμός εισόδου.



Σχήμα 1.5: Κατασκευή αγωγού φυσικού αερίου

# Σύστημα διανομής

Το σύστημα διανομής αποτελείται από:

 δίκτυα μέσης πίεσης (1.9MPa) στην Αττική, Θεσσαλονίκη, Θεσσαλία και στις βιομηχανικές περιοχές Οινοφύτων, Πλατέος Ημαθίας, Ξάνθης, Καβάλας και ΒΙΠΕ Κομοτηνής  δίκτυα χαμηλής πίεσης (0.4MPa) σε Αττική, Θεσσαλονίκη και Θεσσαλία, προβλεπόμενου μήκους 6.500 χλμ.

## Τερματικός σταθμός αποθήκευσης Ρεβυθούσας

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου στην Ρεβυθούσα (σχήμα 1.4) περιλαμβάνουν:

- Δύο δεξαμενές αποθήκευσης συνολικής χωρητικότητας 130.000 κ.μ.
   (65.000 κ.μ. έκαστη)
- Εγκαταστάσεις ελλιμενισμού δεξαμενόπλοιων
- Κρυογενικές εγκαταστάσεις
- Αεριοποιητές, για την επαναεριοποίηση του LNG και την τροφοδοσία του συστήματος μεταφοράς
- Δύο αγωγούς διασύνδεσης της Ρεβυθούσας με το σύστημα μεταφοράς.
- Ναυλωμένο δεξαμενόπλοιο χωρητικότητας 29.500 κ.μ. Υ.Φ.Α.



Σχήμα 1.6: Μονάδα αποθήκευσης υγροποιημένου αερίου



Σχήμα 1.7: Δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου στην Ελλάδα

# ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΣ

# 2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

Ένας σεισμός προκαλεί:

- προσωρινές (transient) εδαφικές μετατοπίσεις και
- παραμένουσες εδαφικές μετατοπίσεις ((permanent ground deformations-PGD)

Η δόνηση του εδάφους (ground shaking) αναφέρεται στις προσωρινές παραμορφώσεις του εδάφους που προκαλούνται από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Από την άλλη πλευρά, οι παραμένουσες μετατοπίσεις οφείλονται στην αστοχία του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού και περιλαμβάνουν τις τεκτονικές διαρρήξεις ρηγμάτων, τις κατολισθήσεις, τις αστοχίες απότομων πρανών και τις αστοχίες πρανών ήπιας κλίσης λόγω ρευστοποίησης (πλευρική εξάπλωση). Οι προσωρινές μετατοπίσεις προκαλούν λιγότερα προβλήματα από τις παραμένουσες διότι οι μετατοπίσεις προκαλούν λιγότερα προβλήματα από τις παραμένουσες διότι οι μετατοπίσεις αυτές δεν έχουν μόνο προσωρινό χαρακτήρα άλλα προκαλούν και πιο ήπιες επιδράσεις σε σχέση με τις παραμένουσες. Βέβαια, η προσωρινή καταπόνηση λόγω των σεισμικών κυμάτων επιβάλλεται σε ολόκληρο το μήκος ενός υπόγειου έργου (αρκετά km) και όχι μόνο στην περιοχή του ρήγματος, συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται και αυτές σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό των υπόγειων έργων. Στην εργασία αυτή, θα δοθεί έμφαση στις αστοχίες που προκαλούνται στους αγωγούς λόγω των παραμενουσών παραμορφώσεων του εδάφους.

# 2.2 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ

Πέρα όμως από τους παράγοντες που οδηγούν στην αστοχία των υπόγειων αγωγών, πρέπει να σημειωθεί ότι η οξύτητα των επιδράσεων εξαρτάται και από διάφορους άλλους παράγοντες όπως:

- το μέγεθος του σεισμού,
- η απόσταση από την πηγή και τα
- εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής

Τα υπόγεια έργα διαχωρίζονται από τα επιφανειακά λόγω της μεγάλης σχετικά ευκαμψίας τους και της μικρής τους μάζας σχετικά με το έδαφος που τα περιβάλλει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η απόκρισή τους στις μετατοπίσεις που επιβάλλει το έδαφος να είναι άμεση, με περιορισμένα φαινόμενα κινηματικής ή αδρανειακής αλληλεπίδρασης.

Σύμφωνα με τους Liu και O'Rourke, οι σεισμικοί κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι υπόγειες σωληνώσεις είναι:

- Κίνδυνοι από διέλευση σεισμικών κυμάτων
- Κίνδυνοι μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης (PGD)

# 2.3 ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

### 2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, το φυσικό αέριο είναι μια σημαντική πηγή ενέργειας και υποστηρίζει πολλές πτυχές της καθημερινής ζωής των ανθρώπων. Γι' αυτό το λόγο τα δίκτυα φυσικού αερίου αποτελούν

μαζί με τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, ηλεκτρικού ρεύματος, μεταφορών και υγρών καυσίμων, ένα αναπόσπαστο τμήμα των δικτύων κοινής ωφέλειας (lifelines). Τα δίκτυα αυτά είναι ευάλωτα σε φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, ισχυροί άνεμοι και πλημμύρες. Η σωστή και αποτελεσματική λειτουργία των lifelines σε ένα ενδεχόμενο κίνδυνο κρίνεται απαραίτητη για τη διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας, της ζωτικότητας της οικονομίας και της ποιότητας ζωής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι γεωτεχνικοί κίνδυνοι είναι η σημαντικότερη αιτία αστοχίας τέτοιων εγκαταστάσεων και η απόδοση τους κατά τη διάρκεια μιας σημαντικής φυσικής καταστροφής, όπως είναι ο σεισμός, επιδρά σημαντικά στις τοπικές οικονομίες και στις συνθήκες διαβίωσης των πολιτών (O'Rourke et al, 1991).

Σε σύγκριση με δίκτυα άλλων μορφών ενέργειας, το δίκτυο φυσικού αέριου είναι πιο τρωτό σε ένα ενδεχόμενο σεισμό. Δεδομένου ότι είναι εύφλεκτο, η διαρροή λόγω βλάβης στους σωλήνες ή σε άλλες εγκαταστάσεις μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιές και στη χειρότερη περίπτωση, σε εκρήξεις (Shimizu). Στο σεισμό του Kobe στην Ιαπωνία το 1995 οι 8 πυρκαγιές, από τις 175 που εκδηλώθηκαν, συνδέονταν με τη διαρροή του αερίου και τη δυσλειτουργία των σχετικών εγκαταστάσεων (Japan Firefighters Association, 1996). Οι O'Rourke και Palmer έκαναν παρόμοιες διαπιστώσεις σχετικά με το σεισμό του Northridge (1994). Σύμφωνα με την California Earthquake Committee οι πιο συνηθισμένες βλάβες που επιφέρει ο σεισμός στα συστήματα φυσικού αέριου είναι αποτέλεσμα δομικών ζημιών στα κτίρια που έχουν τοποθετηθεί τέτοια συστήματα, αλλά και βλαβών στον εξοπλισμό με τον οποίο συνδέονται οι γραμμές του φυσικού αερίου (έμμεσες βλάβες). Πέρα από τις έμμεσες βλάβες, σύμφωνα πάντα με την ίδια πηγή, οι σεισμοί μπορούν παράγουν εδαφικές μετατοπίσεις, προκαλώντας άμεσες βλάβες στα συστήματα διάθεσης-διανομής φυσικού αερίου.

#### 2.3.2 ΟΙΚΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ- ΕΜΜΕΣΕΣ ΒΛΑΒΕΣ

Ο σημαντικότερος παράγοντας που συμβάλλει στην πρόκληση ζημιάς, σε περίπτωση σεισμού, στα ιδιωτικά-οικιακά συστήματα αερίου είναι κακή απόδοση των κτιρίων και του εξοπλισμού αερίου. Όπως αποδεικνύεται, από πρόσφατες σεισμικές δραστηριότητες, η μετατόπιση ή ανατροπή συσκευών που λειτουργούν με φυσικό αέριο όπως θερμοσίφωνες, λέβητες, φούρνοι, στεγνωτήρες και σόμπες, αποτελεί κύρια αιτία για τις περισσότερες μετασεισμικές πυρκαγιές (71% στο σεισμό Northridge). Στις περισσότερες οικιακές και εμπορικές εγκαταστάσεις, οι συσκευές φυσικού αερίου αποτελούνται, είτε από σωλήνα μικρής διαμέτρου κατασκευασμένο από χάλυβα (houseline) που συνδέεται άμεσα με τη συσκευή, είτε από κοντό εύκαμπτο σωλήνα ανοξείδωτου χάλυβα. Αν και η εύκαμπτη σύνδεση μεταξύ των σωληνώσεων μπορεί να δεχτεί μια μέτρια μετακίνηση συσκευών τόσο οι συνδέσεις όσο και η σωλήνωση είναι ευαίσθητες στη ζημία κατά τη διάρκεια μετακινήσεων σε σεισμό, ιδιαίτερα όταν είναι μεγάλου μεγέθους.

#### 2.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ- ΑΜΕΣΕΣ ΒΛΑΒΕΣ

Όσον αφορά τη διανομή φυσικού αερίου, το σύστημα αποτελείται από ένα υπόγειο δίκτυο σωληνώσεων και από περιορισμένες υπέργειες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής αερίου στο δίκτυο. Αρχικά, οι σεισμοί βλάπτουν τα δίκτυα φυσικού αερίου με μόνιμες μετατοπίσεις εδάφους όπως ρηγμάτωση επιφάνειας, καθίζηση εδάφους και αστοχία του εδάφους που παράγεται με την ισχυρή δόνηση του εδάφους. Για να αντέξουν τις επιδράσεις των μόνιμων εδαφικών μετατοπίσεων, οι υπόγειες σωληνώσεις πρέπει να έχουν την ικανότητα να κινηθούν μαζί με το έδαφος ή να έχουν ικανοποιητική δύναμη για να αναγκάσουν το έδαφος να κινηθεί γύρω από το σωλήνα. Οι παλαιότερες σωληνώσεις είναι πιο ευάλωτες στη ζημία από τη μόνιμη εδαφική μετατόπιση λόγω της αποδυνάμωσης τους εξαιτίας της διάβρωσης, των ξεπερασμένων μεθόδων κατασκευής και της χρήσης παλαιών υλικών. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν χυτοσίδηρο, γυμνούς σωλήνες από χάλυβα πολλών ετών και σωλήνες με συνδέσεις με σπειρώματα.

# 2.4 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ

#### 2.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η διανομή του φυσικού αερίου γίνεται μέσω σωληνώσεων που είναι τοποθετημένοι κάτω από την επιφάνεια της γης. Οι σωληνώσεις αυτές αποτελούνται από πολλά είδη υλικών και βρίσκονται σε περιοχές με διαμορφώσεις του εδάφους. διαφορετικές Εξαιτίας των παραπάνω παραγόντων, η σεισμική συμπεριφορά και αντοχή των υπόγειων σωληνώσεων προέρχεται τα εμπειρικά στοιχεία επισκευής που καταγράφονται από παλαιότερους σεισμούς. Μετά από έναν σεισμό, τα στοιχεία επισκευής, όσον αφορά τις υπόγειες σωληνώσεις, συλλέγονται από τον τομέα επιχειρήσεων και ερευνών της κάθε χώρας, ο οποίος καθορίζει, έπειτα από επεξεργασία των στοιχείων, το ποσοστό επισκευής των σωλήνων (ισούται με τον αριθμό επισκευών ανά μήκος μονάδων). Η σεισμική βλάβη στις σωληνώσεις επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως για παράδειγμα, οι εδαφολογικές συνθήκες της περιοχής και η ένταση της κίνησης του εδάφους ή της παραμόρφωσης. Επιπροσθέτως, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν διάφοροι παράμετροι των αγωγών, όπως το υλικό, η διάμετρος, η ένωση των σωληνώσεων και το βαθμό διάβρωσης των σωλήνων (Hwang et al, 1998).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται απαραίτητη η παράθεση στοιχείων σχετικά με τις αστοχίες που προέκυψαν μετά το πέρας ενός σεισμού σε συστήματα φυσικού αερίου. Τα στοιχεία αυτά βοηθούν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τα κύρια αίτια που προκαλούν βλάβες στα δίκτυα και με ποιο τρόπο μπορούν αυτές να αποφευχθούν στο μέλλον δημιουργώντας μια σειρά από προδιαγραφές για την ασφαλέστερη κατασκευή των μελλοντικών δικτύων φυσικού αερίου.

### 2.4.2 ΣΕΙΣΜΟΣ NORTHRIGDE

#### Σεισμολογικά στοιχεία

Ο σεισμός στο Northridge της Καλιφόρνιας πραγματοποιήθηκε στις 17 Ιανουαρίου 1994 και είχε στιγμιαίο μέγεθος 6.7 Ρίχτερ. Το επίκεντρο εντοπίστηκε στην πόλη Reseda, κοντά στο κέντρο του San Fernando Valley. Το υποκεντρικό βάθος του σεισμού ήταν 19 χιλιόμετρα και η διάρκεια του ήταν περίπου 10 με 20 δευτερόλεπτα. Ο σεισμός του Northridge προκλήθηκε από την ξαφνική ρήξη ενός αγνώστου, εξ ολοκλήρου κάτω από την επιφάνεια, 'τυφλού' ανάστροφου ρήγματος κοντά στο ρήγμα του Αγίου Αντρέα. Ο σεισμός αυτός στις 17 Ιανουαρίου του 1994 στο Northridge ήταν ο πιο καταστρεπτικός σεισμός στην ιστορία των Η.Π.Α από το 1906, δημιουργώντας πολλά προβλήματα στα δίκτυα φυσικού αερίου της περιοχής.

#### Δίκτυο φυσικού αερίου

Το σύστημα φυσικού αερίου στη περιοχή του Λος Άντζελες λειτουργεί κάτω υπό την εποπτεία της Southern Gas Company (SoCalGas) και αποτελεί το μεγαλύτερο σύστημα στην Αμερική εξυπηρετώντας 4,6 εκατομμύρια καταναλωτές. Σύμφωνα με στοιχεία της εταιρίας, υπάρχουν 6.123 χιλιόμετρα σωληνώσεις μεταφοράς από χάλυβα, 43.162 χιλιόμετρα κεντρικών αγωγών διανομής από χάλυβα και 24.045 αγωγών από πλαστικό. Οι σωληνώσεις μεταφοράς έχουν διάμετρο 200 ως 900 χιλιοστά και λειτουργούν σε πιέσεις που ξεπερνούν το 1MPa. Το σύστημα διανομής αποτελείται κυρίως από αγωγούς διαμέτρου 50 ως 30 χιλιοστά και λειτουργούν σε πιέσεις των 0.42 MPa (60psi). Οι αγωγοί από πλαστικό είναι κατασκευασμένοι πολυαιθυλένιο μεσαίας ή υψηλής πυκνότητας. Το σύστημα του φυσικού αερίου λειτουργεί σε μια περιοχή υψηλής σεισμικής δραστηριότητας, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τα πιο αξιόπιστα είδη αγωγών, για πιο τρωτά υλικά και για την επίδραση άλλων παραγόντων, όπως η ηλικία του αγωγού και ο τύπος κατασκευής (O'Rourke, M.ΕΕRΙ και M.C.Palmer).



Σχήμα 2.5: Χάρτης δικτύου μεταφοράς φυσικού αερίου στην περιοχή της ισχυρής εδαφικής κίνησης

#### <u>Αστοχίες δικτύου και απόδοση αγωγών</u>

Πραγματοποιήθηκαν, περίπου, 151.000 διακοπές λειτουργίας του δικτύου φυσικού αερίου σαν αποτέλεσμα της σεισμικής δόνησης στο Northridge. Η λειτουργία αποκαταστάθηκε μέσα σε μια βδομάδα από πέρας του σεισμού σε 84.000 καταναλωτές ενώ σε περίπου 120.000, επανήλθε ένα μήνα αργότερα. Η λειτουργία δεν αποκαταστάθηκε σε 9.100 καταναλωτές εξαιτίας της δομικής ζημίας που προκλήθηκε σε διάφορα κτίρια και κατοικίες.

Παρατηρήθηκαν γύρω στις 563 περιπτώσεις βλάβης στους μεταλλικούς σωλήνες διανομής λόγω διάβρωσης υλικού ή ατελειών που αφορούν την κατασκευή αλλά και λόγω βλαβών άγνωστης προέλευσης. Επίσης, υπήρξαν περίπου 27 περιστατικά βλαβών σε αγωγούς πολυαιθυλενίου η πλειοψηφία των οποίων εμφανίστηκε στις συζεύξεις και στα εξαρτήματα μεταφοράς.

Πραγματοποιήθηκαν περίπου στις 35 επισκευές που έγιναν στο σύστημα μεταφοράς, 27 εκ των οποίων ήταν στις ραγισμένες ή σπασμένες οξυακετυλινικές συγκολλήσεις των σωληνώσεων που κατασκευάστηκαν πριν από το 1932. Στη γραμμή 1001, η όποια μεταβιβάζει το αέριο μεταξύ του Newhall και του Fillmore, παρατηρήθηκαν 24 σπασίματα στις οξυακετυλινικές συγκολλήσεις και τοπική κάμψη σε μία ένωση (joint). Τα περισσότερα

σπασίματα εμφανίστηκαν στα Pico και Potreto Canyons. Η γραμμή 1001 κατασκευάστηκε το 1925 και λειτουργούσε την περίοδο που πραγματοποιήθηκε ο σεισμός σε εσωτερική πίεση 1.6892 MPa. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι εμφανίστηκε διαρροή αερίου σε ένα σημείο ενός σπασίματος στη γραμμή 1001, κάτω από την εθνική οδό 126, που οδήγησε σε ανάφλεξη εξαιτίας ενός κατεστραμμένου ηλεκτροφόρου καλωδίου.

Στην περιοχή νότια του επικέντρου του σεισμού, βρίσκεται ο χώρος αποθήκευσης αερίου του Aliso Canyon. Η εγκατάσταση στο Aliso Canyon χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει το φυσικό αέριο σε μια υπόγεια δεξαμενή όποια χρησιμοποιούνταν παλαιότερα για την παραγωγή πετρελαίου. Οι επιδράσεις του σεισμού στην εγκατάσταση περιλαμβάνουν: παραμορφώσεις των υπέργειων στηρίξεων των σωλήνων, μετατοπίσεις των γραμμών συλλογής και των γραμμών τροφοδότησης και δομική ζημία σε ένα πτερύγιο της μονάδας ανεμιστήρων που χρησιμοποιείται για να ψύξει το συμπιεσμένο αέριο πριν από την έγχυσή του στα φρεάτια αποθήκευσης. Η παροχή αερίου από το φαράγγι του Aliso διακόπηκε για πέντε μέρες.

Ένα άλλο σημείο του δικτύου που παρουσίασε βλάβες είναι στην Balboa Boulevard (σχήμα 2.3) όπου υπήρξε βλάβη στην γραμμή 120, σε μια σωλήνωση από χάλυβα διαμέτρου 0.55 μέτρων που κατασκευάστηκε το 1930 με τη χρήση συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου. Την περίοδο του σεισμού, η γραμμή αυτή λειτουργούσε σε πίεση περίπου 1.206 MPa. Η σωλήνωση αστόχησε σε εφελκυσμό σε μια ζώνη εφελκυστικής εδαφικής παραμόρφωσης 275 μέτρα βόρεια μιας ζώνης θλιπτικής εδαφικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.6: Κατεστραμμένη δεξαμενή αποθήκευσης αερίου στην Aliso Canyon



Σχήμα 2.7: Κατεστραμμένοι αγωγοί αερίου στην Balboa Boulevard



Σχήμα 2.8: Αστοχία οξυακετυλινική συγκόλληση



**Σχήμα 2.9:** Τοπικός λυγισμός σε αγωγό φυσικού αερίου

### Σεισμικές βαλβίδες απότομης διακοπής αερίου

Σημαντικό κομμάτι ενός συστήματος σωληνώσεων φυσικού αερίου είναι οι βαλβίδες αυτόματης διακοπής αερίου. Μια βαλβίδα αερίου, ενεργοποιείται με το σεισμό και αποτελείται από ένα μηχανισμό αίσθησης που ανιχνεύει τη σεισμική κίνηση και από ένα μηχανισμό βαλβίδων που διακόπτει τη ροή αέριου σε απάντηση στην κίνηση αυτή. Οι βαλβίδες αυτές δεν είναι ευαίσθητες στις αλλαγές ροής ή της πίεσης του αερίου και είναι συνήθως εγκατεστημένες στη γραμμή φυσικού αερίου ενός κτιρίου.

Διενεργήθηκε μια έρευνα που καλύπτει 407 σεισμικές βαλβίδες διακοπής αερίου, που αποτελούν περίπου το 2% των βαλβίδων της περιοχής, έτσι ώστε να καθορίσει ποιες βαλβίδες δεν λειτούργησαν κατά τη διάρκεια του σεισμού Northridge, ποιες βαλβίδες προστάτευσαν τα συστήματα που υπέστησαν διαρροές αερίου, ποιες βαλβίδες διέκοψαν αποτελεσματικά τη ροή, τα μεγέθη, οι τύποι, οι κωδικοί των μοντέλων και οι ημερομηνίες εγκατάστασης τους. Η Καλιφόρνια θέτει ως όρια διακοπής φυσικού αερίου μεταξύ 0,08 και 0,30g οριζόντιας επιτάχυνσης στα 2,5 Hz.

Οι βαλβίδες διέκοψαν αποτελεσματικά τη ροή του φυσικού αερίου στο Anaheim, στην Santa Ana και στη Ventura. Τρεις βαλβίδες στην έρευνα σταμάτησαν τη ροή αερίου εκεί όπου οι σωλήνες έσπασαν εντός κάποιων κτιρίων. Στην πρώτη περίπτωση μία βαλβίδα λειτούργησε στο Santa Monica College (Σχήμα 2.10), σε μια γραμμή φυσικού αερίου που βρισκόταν πάνω στην οροφή ενός κτιρίου και παρουσίαζε αρκετά σπασίματα. Επίσης, σε μια βιομηχανική εγκατάσταση στο Chatsworth, μια βαλβίδα διέκοψε τη ροή αερίου σε ένα κτίριο όπου οι σωληνώσεις παρουσίαζαν βλάβες σε πολλά σημεία. Στην τρίτη περίπτωση, η βαλβίδα λειτούργησε αποτελεσματικά στην κύρια γραμμή αερίου του California State University στο Northridge που προμήθευε φυσικό αέριο σε τρία κτίρια.



**Σχήμα 2.10**:Σεισμική βαλβίδα διακοπής αέριου που διέκοψε τη ροή φυσικού αερίου σε δύο κτίρια στο Santa Monica College που υπέστησαν ζημιές

### 2.4.3 ΣΕΙΣΜΟΣ CHI-CHI TAIWAN

#### Σεισμολογικά στοιχεία

Στις 21 Σεπτεμβρίου 1999, πραγματοποιήθηκε ένας ισχυρός σεισμός στιγμιαίου μεγέθους M<sub>W</sub> 7,6 κοντά στην πόλη Chi-Chi στην κεντρική Ταϊβάν. Ο σεισμός ήταν αποτέλεσμα ρήξης του ρήγματος Chelungpu, ενός σημαντικού θλιπτικού ανάστροφου ρήγματος στην περιοχή της Ταϊβάν (Shin και Teng, 2001). Ο σεισμός στην πόλη Chi-Chi ήταν ένας από τους πιο καταστρεπτικούς σεισμούς που εμφανίστηκε στο νησί της Ταϊβάν από το 1935. Ο σεισμός αυτός παρήγαγε περίπου 100 χλμ ρηγμάτωσης επιφανείας (surface faulting) και ισχυρή παραμόρφωση εδάφους, ιδιαίτερα κοντά στην περιοχή του ρήγματος.

#### Δίκτυο φυσικού αερίου

Το σύστημα διανομής φυσικού αερίου στην πόλη Taichung λειτουργεί κάτω από την εποπτεία της επιχείρησης φυσικού αερίου Shin-Chung. Το Εθνικό Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας της Ταιπέι συνέταξε μια βάση δεδομένων για τις σωληνώσεις φυσικού αερίου στην πόλη Taichung. Για κάθε σωλήνωση, στη βάση δεδομένων, συλλέχθηκαν στοιχεία σχετικά με τη θέση της σωλήνωσης, το μήκος, το υλικό, τη διάμετρο και την πίεση. Το δίκτυο αποτελείται από σωληνώσεις συνολικού μήκους περίπου 1.000 χλμ και η πλειοψηφία των οποίων βρίσκεται στις σταθερές αλλουβιακές αποθέσεις. Οι σωλήνες αποτελούνται από τρία είδη υλικών: χάλυβα (S), πολυαιθυλένιο (PE), και χυτοσίδηρο (CI). Το ποσοστό των υλικών των σωλήνων παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.

Οι σωλήνες χάλυβα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα σωληνώσεων φυσικού αερίου στην πόλη Taichung είναι γαλβανισμένοι σωλήνες χάλυβα, σωλήνες χάλυβα με επιστρώση πολυαιθυλενίου και σωλήνες απλού χάλυβα. Οι περισσότεροι από τους σωλήνες χάλυβα συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μηχανικές ενώσεις. Οι ονομαστικές διάμετροι (περίπου ίσες με τις εσωτερικές διαμέτρους) των σωλήνων χάλυβα κυμαίνονται από 25 χιλ. ως 250 χιλ.. Διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες από τις σωληνώσεις με διάμετρο λιγότερο από 65 χιλ. είναι οι σωλήνες που συνδέουν τους μετρητές αερίου των καταναλωτών με τις σωληνώσεις διανομής. Το σχήμα 2.11 παρουσιάζει το δίκτυο των σωληνώσεων αερίου από χάλυβα στην πόλη Taichung.

| Υλικό         | <b>Μήκος Αγωγών</b><br>(km) | Ποσοστό<br>(%) |
|---------------|-----------------------------|----------------|
| Χάλυβας       | 803.08                      | 83.13          |
| Πολυαιθυλένιο | 140.03                      | 14.50          |
| Χυτοσίδηρος   | 22.96                       | 2.37           |
| Σύνολο        | 966.07                      | 100.00         |

Πίνακας 2.1: Ποσοστό υλικών στο δίκτυο αερίου της Taichung



**Σχήμα 2.11:** Σημεία επιδιόρθωσης στις σωληνώσεις αερίου από χάλυβα στην πόλη Taichung.
#### Αστοχίες δικτύου και συμπεριφορά αγωγών

Όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1, η πλειοψηφία των σωλήνων αποτελείται από χάλυβα, γι' αυτό η έρευνα στράφηκε στις ζημίες που προκλήθηκαν στις σωληνώσεις φυσικού αερίου που κατασκευάστηκαν από το συγκεκριμένο υλικό. Μετά από το σεισμό, οι Ταϊβανέζοι ερευνητές συνέλεξαν, από την εταιρία λειτουργίας και από τις επιθεωρήσεις πεδίου, 679 αρχεία επισκευής των σωληνώσεων αερίου από χάλυβα (NCREE, 1999). Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν περιλαμβάνουν τις θέσεις των σημείων επισκευής, τη διάμετρο και την πίεση των σωληνώσεων και τις συνθήκες ζημίας.

Το σύστημα μεταφοράς λειτούργησε αρκετά καλά κατά τη διάρκεια του σεισμού. Δεν παρουσιάστηκε βλάβη στις δεξαμενές αερίου, στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης, στις εγκαταστάσεις υγροποιημένου αερίου, στους σταθμούς συμπιεστών, στις εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ή στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις που εξυπηρετούνται από το σύστημα. Οι ζημιές εντοπίστηκαν κυρίως στο σύστημα διανομής σε τμήματα δύο παράλληλων σωληνώσεων και προέκυψαν από тŋ ρήξη επιφανειακού ρήγματος κάτω από μια ασφαλτοστρωμένη οδό.

Αμέσως μετά το σεισμό, πέντε τοπικές εταιρίες διανομής διέκοψαν την λειτουργία των συστημάτων τους σε απόσταση 19 περίπου χιλιομέτρων από το επίκεντρο, εξαιτίας των καταγραφών που ανιχνεύουν την ισχυρή κίνηση και υπερέβησαν τα προκαθορισμένα επίπεδα και προκύπτουν από σχετικά όργανα. Η λειτουργία διεκόπη σε περίπου 400.000 καταναλωτές.

Тα μέρη που παρουσίασαν ζημιές περιλαμβάνουν αγωγούς (χάλυβα, χυτοσιδήρου, PE), εξαρτήματα, ενώσεις, μετρητές και βαλβίδες. Από τους αγωγούς χάλυβα που αστόχησαν, 50% είχαν αποδυναμωθεί από τη διάβρωση. Οι περισσότεροι αγωγοί χυτοσιδήρου και πολυαιθυλενίου αστόχησαν στις ενώσεις. Οι μετρητές και οι βαλβίδες εμφάνισαν ζημιές στα κτήρια που είχαν καταρρεύσει. Μερικοί μετρητές πιστεύεται ότι παρουσίασαν ζημιές εξαιτίας της Εκτός από διακοπές ισχυρής δόνησης. τις λειτουργίας λόγω των

28

κατεστραμμένων κτιρίων, η λειτουργία του συστήματος διανομής αερίου επηρεάστηκε αρνητικά από τις καθιζήσεις στο δρόμο ή τις διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ του εδάφους και των κτηρίων.

#### 2.4.4 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΟΒΕ

#### Σεισμολογικά στοιχεία

Ο σεισμός του Kobe πραγματοποιήθηκε στις 17 Ιανουαρίου του 1995 στις 5.46 π.μ. Ο σεισμός ήταν (μέσου μεγέθους Ms=7.2 σύμφωνα με την κλίμακα της Ιαπωνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας JMA) στιγμιαίου μεγέθους Mw=6.9. Ο σεισμός θεωρήθηκε αρκετά σημαντικός, από επιστημονική άποψη, γιατί ήταν ο πρώτος μεγάλος σεισμός που πραγματοποιήθηκε σε μια περιοχή με σύγχρονα κατασκευαστικά στάνταρ. Το επίκεντρο του σεισμού εμφανίστηκε κοντά στο βόρειο άκρο του Awaji Island σε βάθος 20 χιλιομέτρων. Η ζημία που προκλήθηκε ήταν τεράστια και η χειρότερη στην Ιαπωνία από το μεγάλο σεισμό του Kanto το 1923. Ο καταστροφικός σεισμός του Kobe κλόνισε επιστήμονες και μηχανικούς που ασχολούνται και μελετούν τους σεισμούς.

#### Δίκτυο φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο για τις περιοχές που επηρεάστηκαν σοβαρά από το σεισμό, όπως Kobe, Ashiya, Amagasaki και Nishinomiya, παρέχεται από την εταιρία Osaka Gas Company, Ltd. Η εταιρία προμηθεύει αέριο σε περισσότερο από 5,6 εκατομμύρια καταναλωτές, αποτελώντας το 30% του συνολικού όγκου πωλήσεων αερίου στην Ιαπωνία. Το δίκτυο αποτελείται από κύριες γραμμές κορμού (trunk) , σωληνώσεις και αγωγούς διανομής συνολικού μήκους 49430 χλμ. Το σύστημα της Osaka Gas μπορεί να συγκριθεί σε μήκος με το σύστημα διανομής αερίου της Southern California Gas Company, που αποτελεί το μεγαλύτερο προμηθευτή αερίου στις ΗΠΑ με 4,6 εκατομμύρια καταναλωτές και 74000 km δίκτυο μεταφοράς και διανομής. Το υγροποιημένο αέριο (LNG) αποτελεί το 94% του αποθέματος αερίου της Osaka Gas system με τρεις LNG σταθμούς (2 στο Senboku και 1 στο Himeji) να αποτελούν τις κύριες πηγές αερίου.

Το αέριο μεταβιβάζεται περιφερειακά μέσω ενός συστήματος κύριων γραμμών κορμού (trunk) που λειτουργούν σε πιέσεις των 4 MPa. Οι κύριοι αγωγοί κορμού αποτελούνται από X-42 ή X-52 σωλήνες χάλυβα με περιμετρικές συγκολλήσεις πλήρους διάτρησης (penetration) και ηλεκτρικού τόξου. Επιπροσθέτως, η μεταφορά του αερίου επιτυγχάνεται μέσα από ένα σύστημα αγωγών μεσαίας πίεσης που αποτελείται από τις A-lines ( με εσωτερικές πιέσεις 0,3 MPa ως 1,0 MPa) και από τις B-lines (με εσωτερικές πιέσεις από 0,1 MPa ως 0,3 MPa). Οι A-lines αποτελούνται από σωλήνες χάλυβα με συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου ή σωληνώσεις από όλκιμο σίδηρο με εύπλαστους μηχανικούς συνδέσμους. Οι μηχανικοί σύνδεσμοι είναι εφοδιασμένοι με ένα μηχανισμό κλειδώματος που επιτρέπει 6 εκατοστά διαστολή και 2 εκατοστά συστολή. Την περίοδο του σεισμού υπήρχαν 1245 χλμ A-lines και 3800 χλμ B-lines.

Επίσης, το σύστημα αποτελείται από ένα δίκτυο διανομής χαμηλής πίεσης 43895χλμ που λειτουργεί σε εσωτερικές πιέσεις περίπου 1,8 kPa.To σύστημα χαμηλής πίεσης στο Kobe αποτελείται κυρίως από σωλήνες χάλυβα με χαλύβδινες συζεύξεις με σπειρώματα ή βιδωτούς συνδέσμους. Ένα μικρό ποσοστό του συστήματος χαμηλής πίεσης, περίπου το 5%, αποτελείται από αγωγούς πολυαιθυλενίου.

Τέλος, το σύστημα φυσικού αερίου αποτελείται από έξυπνους μετρητές που παρέχουν γρήγορη διακοπή της ροής αερίου όταν παρουσιαστεί ζημία στις σωληνώσεις και στις σχετικές εγκαταστάσεις. Την περίοδο του σεισμού είχαν εγκατασταθεί 34 μετρητές σε όλο το δίκτυο λειτουργίας. Ο μετρητής αποτελείται από ένα σεισμικό αισθητήρα που ενεργοποιείται με επιτάχυνση που ξεπερνάει τα 0.2g, έναν αισθητήρα πίεσης και ένα μετατροπέα του ρυθμού ροής. Οι αισθητήρες πίεσης και ροής ανιχνεύουν ασυνήθιστες τιμές στην πίεση και στη ροή, οι οποίες αποτελούν ένδειξη αστοχίας και βλάβης στα δίκτυα φυσικού αερίου. Ένας υπολογιστής καταγράφει τα εισερχόμενα στοιχεία και διακόπτει τη

ροή όταν απαιτείται. Οι μετρητές έχουν μια μπαταρία λιθίου για παροχή ενέργειας στον υπολογιστή και μια βαλβίδα διακοπής αερίου.



Σχήμα 2.12: Χάρτης δικτύου Kobe

Αστοχίες δικτύου και απόδοση αγωγών

Στους σταθμούς υγροποιημένου αερίου (LNG terminals) και στους σταθμούς διανομής δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική βλάβη αν και δέχτηκαν υψηλά επίπεδα επιτάχυνσης. Επίσης, δεν αναφέρθηκαν βλάβες στις γραμμές κορμού του δικτύου (trunk lines). Στις γραμμές μεσαίας πίεσης υπήρξαν συνολικά 35 επισκευές στις A-lines και 61 στις B-lines. Οι κυρίαρχες αστοχίες εμφανίζονται με τη μορφή διαρροής εκεί όπου οι συμπιεστικοί μεταλλοπλαστικοί σύνδεσμοι είχαν χαλαρώσει (σύνδεσμοι Dresser). Το δίκτυο χαμηλής πίεσης υπέστη αρκετές ζημιές.

Επιπροσθέτως, αστόχησαν 14 χαμηλού βαθμού συγκολλήσεις περιμέτρου στις σωληνώσεις από χάλυβα. Οι χαμηλού βαθμού συγκολλήσεις που κατασκευάστηκαν μετά το 1962. Στις γραμμές χαμηλής πίεσης παρουσιάστηκαν βλάβες στους συνδέσμους με σπειρώματα ή στους βιδωτούς συνδέσμους των

των σωλήνων από χάλυβα και ρωγμές στους σωλήνες από χυτοσίδηρο και όλκιμο σίδηρο. Χρειάστηκαν 5190 επισκευές στους αγωγούς διανομής φυσικού αερίου και στις διακλαδώσεις που περνούν κάτω από τους δρόμους της πόλης. Τέλος, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι δεν παρουσιάστηκαν αστοχίες στους σωλήνες από πολυαιθυλένιο.

| Αιτιές                          | Μορφές Αστοχίας   |
|---------------------------------|---|
| Διάβρωση υλικού αγωγών          | Αστοχία λόγω περιφερειακής<br>θλιπτικής παραμόρφωσης<br>(wrinkling) |
| Ατέλειες στην κατασκευή δικτύων | Αστοχία αγωγών λόγω εφελκυσμού                                      |
| Κακή ποιότητα συγκόλλησης       | Σπασίματα σε οξυακετυλινικές<br>συγκολλήσεις                        |
| Κακή ποιότητα συνδέσμου         | Χαλάρωση μεταλλοπλαστικών<br>συνδέσμων                              |
| Παλαιότητα των δικτύων          | Βλάβες σε βιδωτούς συνδέσμους<br>και συνδέσμους με σπειρώματα       |
| Ένταση σεισμικού κινδύνου       | Υπερβολική περιστροφή<br>συνδέσμων                                  |

Πίνακας 2.2: Συνοπτική παρουσίαση συνηθέστερων βλαβών και των αιτιών που τις προκάλεσε, σε δίκτυα φυσικού αερίου λόγω σεισμού

## 2.5 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ- ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Οι παραπάνω περιπτώσεις σεισμών που αναλύθηκαν επιλέχθηκαν σαν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα περιοχών με ανεπτυγμένα δίκτυα φυσικού αερίου που έχουν κατασκευαστεί κοντά σε ρήγματα και στις οποίες έχει αναπτυχθεί έντονη σεισμική δραστηριότητα. Τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος στη χρήση υλικών κατασκευής στους αγωγούς μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Η καταγραφή της απόδοσης των αγωγών στους παρελθόντες σεισμούς, βοηθά στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, έτσι ώστε τα μελλοντικά συστήματα φυσικού αερίου να κατασκευάζονται με ασφάλεια.

Είναι σημαντικό, πέρα από τις περιπτώσεις αστοχιών σε δίκτυα παγκοσμίως, να παραθέσουμε και την συμπεριφορά του ελληνικού δικτύου φυσικού αερίου στο

σεισμό στην Πάρνηθα το 1999. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι πρόκειται για ένα σχετικά προσφάτως κατασκευασμένο δίκτυο που δεν έχει δεχθεί τη φθορά του χρόνου και έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τις πιο σύγχρονες προδιαγραφές κατασκευής και τους τελευταίους αντισεισμικούς κανονισμούς.

Τα ελληνικά δίκτυα φυσικού αερίου κατασκευάζονται κυρίως από αγωγούς πολυαιθυλενίου αλλά και από αγωγούς χάλυβα. Το πολυαιθυλένιο αποτελεί ένα υλικό εύκαμπτο οπότε η ίδια η ελαστικότητά του, επιτρέπει το να ακολουθεί τις μετακινήσεις του εδάφους την ώρα του σεισμού και άρα να μην παρουσιάζει βλάβες. Ο τελευταίος σεισμός του 1999 στην Αττική, κατά τον οποίο πραγματοποιήθηκαν πολλές ζημιές σε κτίρια, δεν παρατηρήθηκε η παραμικρή ζημιά στα δίκτυα φυσικού αερίου. Όσον αφορά τα χαλύβδινα δίκτυα, έχει γίνει ειδική αντισεισμική μελέτη και μερικά από αυτά που βρέθηκαν στο επίκεντρο του σεισμού το 1999 είχαν άριστη συμπεριφορά. Στις συνδέσεις των καταναλωτών με τα δίκτυα αγωγοί πίεσης 0.4 MPa, τοποθετείται στον παροχετευτικό αγωγό βαλβίδα αυτόματης διακοπής της ροής σε περίπτωση που υπάρξει μέσα στον αγωγό μεγαλύτερη ροή από την καθορισμένη. Επειδή η μεγάλη ροή είναι ένδειξη προβλήματος, η βαλβίδα αυτή αυτόματα και ακαριαία διακόπτει τη ροή και προστατεύει τους καταναλωτές. Όσον αφορά τις εσωτερικές εγκαταστάσεις, υπάρχουν αντικραδασμικά συστήματα: χιτώνια προστασίας των σωληνώσεων και στηρίγματα, καθώς και βάνες αντισεισμικής προστασίας.

## 2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι αγωγοί με συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου και οι αγωγοί με οξυακετυλινικές συγκολλήσεις είναι τρωτοί σε μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις (PGD) όπως πλευρική διάδοση και κατολισθήσεις. Κατά τη διάρκεια του σεισμού του Northridge, οι γραμμές 120 και 104 παρουσίασαν βλάβες από μόνιμη εδαφική παραμόρφωση. Και οι δύο γραμμές κατασκευάστηκαν με συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου.

- Οι αγωγοί διανομής αερίου από πολυαιθυλένιο παρουσιάστηκαν αρκετά ανθεκτικοί στις επιδράσεις που επέφερε ο σεισμός.
- Οι βαλβίδες απότομης διακοπής αερίου δούλεψαν αρκετά καλά.
- Μεταξύ των τύπων βλάβης, οι αστοχίες των γραμμών μεταφοράς στο πέρασμα ενός ρήγματος είναι πιθανώς αναπόφευκτες. Εντούτοις, με τον κατάλληλο προγραμματισμό και ειδικό σχεδιασμό εγκατάστασης σωλήνων, οι γραμμές μετάδοσης μπορεί να παρουσιάσουν καλύτερη συμπεριφορά στην εδαφική μετακίνηση.
- Το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος των αστοχιών των δικτύων διανομής που αποτελείται από σωλήνες χάλυβα σχετιζόταν με τη διάβρωση, υποδεικνύει ότι οι αγωγοί αυτοί πρέπει να αντικατασταθούν με άλλους από ΡΕ ή αλλιώς πρέπει να βελτιωθεί το πρόγραμμα προστασίας των σωλήνων από τη διάβρωση.
- Οι βαλβίδες διακοπής αερίου έκτακτης ανάγκης διαδραμάτισαν έναν σημαντικό ρόλο στην αποφυγή εκρήξεων και πυρκαγιών.

# ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΓΩΓΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

## 3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η χρήση αγωγών για την μεταφορά και την διανομή επικίνδυνων περιβαλλοντικά υγρών και αερίων υλών, όπως είναι το φυσικό αέριο, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη παγκοσμίως και επεκτείνεται με ραγδαίους ρυθμούς και στην χώρα μας. Σε χώρες υψηλής σεισμικότητας, όπως η Ελλάδα, ο αντισεισμικός σχεδιασμός σωληνώσεων θεωρείται επιτακτικός, αφού μια ενδεχόμενη αστοχίας τους, έπειτα από σεισμικό επεισόδιο, μπορεί βλάψει σημαντικά την ασφάλεια και την υγεία του πληθυσμού μιας περιοχής και ακόμη περισσότερο το περιβάλλον.

Πιο συνοπτικά, στα συστήματα σωληνώσεων πρέπει πραγματοποιείται αντισεισμικός σχεδιασμός για τους παρακάτω λόγους:

- Ασφάλεια κοινού και εργαζομένων.
- Προστασία του περιβάλλοντος.
- Ζωτικής σημασίας λειτουργία μετά από καταστροφικό σεισμό.

Ο στόχος του αντισεισμικού σχεδιασμού ενός δικτύου φυσικού αερίου είναι να διασφαλίσει ότι σε περίπτωση σεισμού, το σύστημα σωληνώσεων θα συνεχίσει ομαλά τη λειτουργία του εξασφαλίζοντας: τη διατήρηση θέσης του (ο σωλήνας δεν καταρρεύσει), την αποφυγή διαρροών (ο σωλήνας δεν θα παρουσιάσει διαρροές) και την επαρκή λειτουργία του (το σύστημα σωληνώσεων θα παράγει και θα ρυθμίζει τη ροή).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εργασία αυτή θα ασχοληθεί με τη σεισμική συμπεριφορά και τον αντισεισμικό σχεδιασμό των υπόγειων σωληνώσεων, εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης τους στα συστήματα φυσικού αερίου σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι σωληνώσεις τοποθετούνται, συνήθως, κάτω από το έδαφος για αισθητικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς λόγους αλλά και για λόγους ασφαλείας.

Οι υπόγειες σωληνώσεις είναι εγκατεστημένες σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, με πληθώρα εδαφολογικών συνθηκών, έχοντας ως συνέπεια την αντιμετώπιση διαφορετικών σεισμικών κινδύνων. Προκειμένου να οριστεί η ζημιά που μπορεί να δεχτούν οι υπόγειες σωληνώσεις κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο τύποι σωληνώσεων: οι συνεχείς (σωλήνες κυρίως από χάλυβα και πολυαιθυλένιο) και οι τμηματικές σωληνώσεις. Στις συνεχείς σωληνώσεις, οι συχνότερες αστοχίες οφείλονται σε μεγάλες παραμορφώσεις εφελκυσμού στις συγκολλημένες ενώσεις, αλλά και στην τοπική κάμψη λόγω μεγάλων αξονικών παραμορφώσεων λόγω θλίψης στα τοιχώματα των σωλήνων. Επίσης, οι αγωγοί μπορεί να υποστούν κάμψη δοκού και αστοχία ολίσθησης στις ενώσεις οι οποίες έχουν χαμηλότερη αντοχή από αυτή του υλικού των σωλήνων. Από την άλλη πλευρά, οι τμηματικές σωληνώσεις, μπορεί να δεχτούν αξονική αποσυναρμολόγηση στις ενώσεις, συντριβή στις ενώσεις και κυκλικές καμπυλωτές ρωγμές στα τμήματα των σωλήνων μακριά από τις ενώσεις.

Ο αντισεισμικού σχεδιασμός πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι σωληνώσεις να είναι σε θέση να διατηρήσουν την ικανότητα παροχής ακόμα και αν έχουν υποστεί ιδιαίτερη τοπική ζημία λόγω ενός σεισμού υψηλής έντασης. Οι

σωληνώσεις πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν ικανοποιητική ακαμψία, αντοχή και ολκιμότητα για να αντιστέκονται στις επιδράσεις από τις σεισμικές κινήσεις του εδάφους. Το δυσκολότερο μέρος στο σχεδιασμό μιας σωλήνωσης είναι η αξιολόγηση του σεισμικού κίνδυνου που συνδέεται με αυτήν. Όσον αφορά το σεισμικό κίνδυνο, ο κυριότερος παράγοντας για το σχεδιασμό των σωληνώσεων είναι οι μετατοπίσεις του εδάφους λόγω εδαφολογικής αστοχίας. Ενώ όσον αφορά τον ίδιο τον αγωγό ο σχεδιασμός βασίζεται στις παραμορφώσεις που παράγουν οι μετατοπίσεις του εδάφους.

Η σωλήνωση πρέπει να ελέγχεται για όλους τους πιθανούς σεισμικούς κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσει. Η ασφάλεια των σωληνώσεων πρέπει να ελέγχεται για σεισμικά φορτία, ταυτόχρονα, με τα φορτία λειτουργίας όπως πίεση, θερμοκρασία, αρχική κάμψη, κ.λ.π.. Σε αυτές τις οδηγίες περιγράφεται η αντίδραση των σωληνώσεων και τα κριτήρια σχεδιασμού για μερικούς γενικούς σεισμικούς κινδύνους. Για συγκεκριμένους εντοπισμένους κινδύνους, η σεισμική αξιολόγηση της σωλήνωσης πρέπει να πραγματοποιείται με αναφορά σε εξειδικευμένες εκθέσεις. Στις παρακάτω παραγράφους θα γίνει η παρουσίαση των παραμέτρων που πρέπει να περιλαμβάνονται σε ένα αντισεισμικό σχεδιασμό υπόγειων σωληνώσεων.

## 3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Για τη ορθή κατάρτιση των κριτηρίων σχεδιασμού απαιτούνται οι ακόλουθες πληροφορίες :

## Πληροφορίες σωληνώσεων

- α) Γεωμετρία σωλήνων (διάμετρος, πάχος)
- β) Σχέση τάσης-παραμόρφωσης του υλικού σωλήνων;
- γ) Λειτουργία σωληνώσεων και μετασεισμική

απαίτηση απόδοσης

- δ) Προδιαγραφές εξωτερική επικάλυψης σωλήνα
- ε) Πίεση λειτουργίας στο σωλήνα

ζ) Θερμοκρασία εγκατάστασης και λειτουργίας

η) Λεπτομέρεια ευθυγράμμισης σωληνώσεων (σχέδιο, σχεδιάγραμμα,

θέση των συναρμολογήσεων, κ.λ.π.)

θ) Μειωμένο όριο παραμόρφωσης για τις υπάρχουσες σωληνώσεις.

## Εδαφολογικές πληροφορίες

α) Βάθος τοποθέτησης της σωλήνωσης;

β) ορισμός του εδάφους επίχωσης στην τάφρο που τοποθετείται ο αγωγός

γ) Βάθος της στάθμης νερού

δ) Βασικές εδαφολογικές ιδιότητες (βάρος μονάδων,

συνοχή, εσωτερική γωνία τριβής και επί τόπου

πυκνότητα).

## Πληροφορίες σεισμικής επικινδυνότητας

α) Αναμενόμενη ένταση της σεισμικής κίνησης του εδάφους στην περιοχή

β) Αναμενόμενη έκταση της μόνιμης παραμόρφωσης του εδάφους

γ) Μήκος της σωλήνωσης που εκτίθεται σε μόνιμη εδαφική παραμόρφωση

δ) Θέσεις ενεργών ρηγμάτων, αναμενόμενο μέγεθος της μετατόπισης του

ρήγματος και προσανατολισμός της σωλήνωσης όσον αφορά την κατεύθυνση της μετακίνησης του ρήγματος.

## 3.2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των σωληνώσεων απαιτείται μια κατηγοριοποίηση των αγωγών σε κατηγορίες ανάλογα με τη λειτουργία για την οποία προορίζονται και το πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η λειτουργία αυτή σε μια κοινωνία. Οι αγωγοί παροχής νερού, για παράδειγμα, διαδραματίζουν πιο σημαντικό ρόλο για την καταστολή πυρκαγιάς, μετά από ένα σεισμό, από εκείνους που παρέχουν νερό άρδευσης, ανεξάρτητα από το μέγεθος και την ικανότητά των αγωγών. Κατά συνέπεια, οι σωληνώσεις που παρέχουν το νερό για την καταστολή πυρκαγιάσουν σε υψηλότερο επίπεδο σε σεισμικές συνθήκες από εκείνους που χρησιμοποιούνται απλά για άρδευση.

Οι σωληνώσεις έχουν ταξινομηθεί σε τέσσερις ομάδες (πίνακας 3.1), σύμφωνα με τις αμερικάνικες οδηγίες, ανάλογα με την απαίτηση λειτουργίας τους σε περίπτωση σεισμού ως εξής:

Τάξη Κλάσης-Ι: Περιλαμβάνει πολύ ουσιαστικές σωληνώσεις νερού που χρησιμοποιούνται για να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών και προορίζονται να παραμείνουν λειτουργικές κατά τη διάρκεια και μετά από ένα σεισμό. Επίσης, περιλαμβάνει αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου υψηλής πίεσης που απαιτούνται να παραμείνουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια και μετά από ένα σεισμό. Τέλος, στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι σωληνώσεις που μπορούν να προκαλέσουν εκτενή απώλεια ζωής ή ένα σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον σε περίπτωση αστοχίας ή βλάβης.

Τάξη Κλάσης-ΙΙ: Περιλαμβάνει τις κρίσιμες σωληνώσεις νερού που εξυπηρετούν μια μεγάλη κοινότητα, έχοντας σημαντική οικονομική επίδραση σε αυτήν ή επιφέρουν ουσιαστικό κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή και την ιδιοκτησία, σε περίπτωση αστοχίας. Επίσης, περιλαμβάνουν αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αέριου μεσαίας πίεσης οι οποίες είναι ζωτικής ενεργειακής σημασίας, αλλά η λειτουργία τους μπορεί να διακοπεί για μια μικρή περίοδο μέχρι να πραγματοποιηθούν κάποιες μικρές επισκευές.

**Τάξη Κλάσης-ΙΙΙ:** Περιλαμβάνει τις περισσότερες από τις σωληνώσεις παροχής νερού για συνηθισμένη χρήση. Επίσης, περιλαμβάνει σωληνώσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου χαμηλής πίεσης.

Τάξη Κλάσης-ΙV: Περιλαμβάνει σωληνώσεις νερού που έχουν πολύ μικρή σημασία και επίδραση πάνω στην ανθρώπινη ζωή και στην κοινωνία σε περίπτωση αστοχίας. Τέλος, περιλαμβάνει σωληνώσεις που δεν απαιτούν γρήγορη επισκευή μετά από ένα σεισμικό γεγονός.

| Τάξη Κλάσης | Σεισμική Σημασία           |  |  |
|-------------|----------------------------|--|--|
| I           | Ουσιαστική                 |  |  |
| Ш           | Κρίσιμη                    |  |  |
| 111         | Συνηθισμένη, κανονική      |  |  |
| IV          | Πολύ χαμηλής ως<br>καθόλου |  |  |

Πίνακας 3.1: Συνοπτική παρουσίαση ταξινόμησης σωληνώσεων

Για τις σωληνώσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου η ταξινόμηση μπορεί να γίνει και με βάση την εσωτερική πίεση στους αγωγούς σε (JSCE, 2000b):

| <b>Υψηλής πίεσης :</b> Ρ ≥ 0.98 MPa          |
|--|
|  |
| <b>Μέσης πίεσης:</b> 0.29 MPa < P < 0.98 MPa |
|  |
| <b>Χαμηλής πίεσης:</b> Ρ ≤ 0.29 MPa          |

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση σωληνώσεων με βάση την πίεση

## 3.2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΔΑΦΩΝ

Μια άλλη ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι η κατηγοριοποίηση των εδαφών. Γενικά υπάρχουν πολλοί τρόποι διαχωρισμού των εδαφών σε κατηγορίες. Σύμφωνα όμως με τη NERHP (1997) υπάρχει η εξής κατηγοριοποίηση εδαφών: Α) Σκληρός

βράχος Vs>1500 (m/s) B) Βράχος με Vs από 760 έως 1500 (m/s) Γ) πολύ στιφρά εδάφη και μαλακοί βράχοι με Vs από 360 έως 760 (m/s), Δ) στιφρά εδάφη με Vs από 180 έως 360 (m/s) και E) μαλακά εδάφη Vs<180 (m/s). Η παραπάνω ταξινόμηση παρουσιάζεται εκτενέστερα στον πίνακα 3.3.

|           |                |                    |              | Μη          |
|-----------|----------------|--------------------|--------------|-------------|
| Κατηγορία | Τύπος          | Ταχύτητα           | Αστράγγιστη  | διορθωμένη  |
| Εδάφους   | Εδάφους        | διατμητικού        | διατμητική   | πρότυπη     |
|           |                | κύματος (Vs)       | δύναμη (Su)  | αντίσταση   |
|           |                | m/sec              | kN/m²        | διάτρησης   |
|           |                |                    |              | (N)         |
|           | Σκληρός        | Vs > 1500          |              |             |
| Α         | βράχος         |                    |              |             |
| B         | Βράνος         | 760 < \/s <1500    |              |             |
|           | Βρυχος         | 700 < V3 21500     |              |             |
| 0         |                |                    |              | NIN 50      |
| C         | εοαφος και     | $360 < VS \le 760$ | Su ≥ 98      | N > 50      |
|           | μαλακος        |                    |              |             |
|           | βράχος         |                    |              |             |
|           | Πυκνό /        |                    |              |             |
| D         | Δύσκαμπτο      | 180 < Vs ≤ 360     | 49 ≤ Su ≤ 98 | 15 ≤ N ≤ 50 |
|           | έδαφος         |                    |              |             |
|           | Χαλαρά/        |                    |              |             |
|           | Μαλακά εδάφη   | Vs < 180           | Su < 49      | N < 50      |
|           | Μαλακό         |                    |              |             |
| E         | έδαφος με      |                    | Su < 24      |             |
|           | PI**>10 και    |                    |              |             |
|           | Φυσική         |                    |              |             |
|           | Περιεκτικότητα |                    |              |             |
|           | σε Υγρασία     |                    |              |             |
|           | ≥ 40%          |                    |              |             |
|           |                |                    |              |             |

Πίνακας 3.3: Ταξινόμηση εδαφών

#### 3.2.3 ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ

Από προηγούμενες παρατηρήσεις, περίπου 3% των αστοχιών σε σωληνώσεις φυσικού αερίου στις ΗΠΑ οφείλονται στην δόνηση του εδάφους λόγω της σεισμικής επίδρασης. Οι κύριοι σεισμικοί κίνδυνοι (seismic hazards) που ευθύνονται για την αστοχία υπόγειων αγωγών περιλαμβάνουν:

- 1. Σεισμική διάδοση κυμάτων
- Μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους (PGD) σχετική με τις εδαφολογικές αστοχίες:
  - Διαμήκης PGD
  - Εγκάρσια PGD



Σχήμα 3.1: Αίτια αστοχίας σωληνώσεων φυσικού αερίου στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια 1884-1990

#### 3.2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Η ανάλυση σεισμικού κινδύνου, χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του επιπέδου της δόνησης του εδάφους και για τον προσδιορισμό του σεισμού σχεδιασμού για μια υπόγεια κατασκευή, όπως είναι μια υπόγεια σωλήνωση. Η ανάλυση σεισμικού κινδύνου περιγράφει την πιθανότητα για ισχυρές κινήσεις του εδάφους, εξετάζοντας την πιθανότητα παρουσίας ενεργού ρήγματος σε μια περιοχή, καθώς και την πιθανότητα μετακίνησης του ρήγματος. Βέβαια, μερικές φορές, η εξέταση των παραπάνω είναι δύσκολη σε μερικές περιοχές (ανατολική ΗΠΑ) όπου η ρηγμάτωση δεν είναι εύκολο να ανιχνευτεί.

Σύμφωνα με τους Hashash et al (2001), υπάρχουν δύο μέθοδοι ανάλυσης σεισμικού κινδύνου: (α) ντετερμινιστική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (DSHA) και (β) η πιθανολογική ανάλυση σεισμικού κινδύνου (PSHA). Η DSHA είναι χρήσιμη για την εξέταση της απόδοσης ενός ολοκληρωμένου δικτύου αγωγών σε μία χωρικά μεγάλη περιοχή και περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου "σεισμού σεναρίου" (scenario earthquake) για να περιγράψει τον κίνδυνο της εδαφικής κίνησης σε μια περιοχή. Το σενάριο αυτό απαιτεί τη δημιουργία ενός σεισμού συγκεκριμένου μεγέθους και σε συγκεκριμένη περιοχή. Ο Reiter (1990) περιέγραψε μια διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά από τα 4 παρακάτω σταδία:

Στάδιο 1: Προσδιορισμός των Πηγών Σεισμού

Στάδιο 2: Αξιολόγηση Απόστασης Πηγής-Περιοχής

Στάδιο 3: Προσδιορισμός Παραμέτρων Κίνησης Εδάφους

Στάδιο 4: Επίσημος Καθορισμός Σεισμικού Κινδύνου

Η DSHA παρέχει ένα άμεσο πλαίσιο για την αξιολόγηση των χειρότερων σεναρίων σεισμού σε μια περιοχή. Εντούτοις, δεν παρέχει καμία πληροφορία για την πιθανότητα ή για τη συχνότητα πραγματοποίησης του ελεγχόμενου σεισμού. Εάν απαιτούνται τέτοιου είδους πληροφορίες, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια πιθανολογική προσέγγιση για να προσδιορίσει καλύτερα τον σεισμικό κίνδυνο.

Η PSHA παρέχει ένα πλαίσιο στο οποίο αβεβαιότητες που αφορούν το μέγεθος, τη θέση και το ρυθμό επανάληψης ενός σεισμού μπορούν να προσδιοριστούν και να συνδυαστούν κατά ένα λογικό τρόπο. Μια τέτοια ανάλυση παρέχει στους σχεδιαστές μια πληρέστερη περιγραφή του σεισμικού κινδύνου σε μια περιοχή, όπου μπορούν να εξεταστούν οι διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων. Για αυτόν τον τύπο ανάλυσης, τα μελλοντικά γεγονότα σεισμού θεωρούνται χωρικά και χρονικά ανεξάρτητα. Ο Reiter (1990) περιέγραψε μια διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά από τα 4 παρακάτω σταδία:

Στάδιο 1: Προσδιορισμός των Πηγών Σεισμού

Στάδιο 2: Δημιουργία Σχέσεων Επανάληψης

Στάδιο 3: Προσδιορισμός Παραμέτρων Κίνησης Εδάφους

Στάδιο 4: Επίσημος Καθορισμός Σεισμικού Κινδύνου



Σχήμα 3.4: Διαδικασία σχεδιασμού ενός δικτύου φυσικού αερίου (Hashash et al)

Στον πίνακα 3.4 παρατίθεται μια βάση σχεδιασμού 50-ετών για να είναι συνεπής με την τυποποιημένη πρακτική εφαρμοσμένης μηχανικής, αν και πολλοί σωλήνες μπορούν να αντέξουν για πολύ περισσότερο χρονικό διάστημα.

| Τάξη<br>Κλάσης<br>Αγωγού | Πιθανότητα Εμφάνισης<br>σε 50 χρόνια | Περίοδος<br>επιστροφής |  |
|--------------------------|--------------------------------------|------------------------|--|
| I                        | 2%                                   | 2475                   |  |
| II                       | 5%                                   | 975                    |  |
| III                      | 10%                                  | 475                    |  |
| IV                       | Δεν απαιτείται σεισμικός σχεδιασμός  |                        |  |

Πίνακας 3.4 : Προτεινόμενα επίπεδα σχεδιασμού σεισμικού κινδύνου

#### 3.2.5 ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

#### <u>Βάση σχεδιασμού σεισμικού κινδύνου</u>

Η βάση της σεισμικής εδαφικής κίνησης σχεδιασμού (από άποψη επιτάχυνσης και ταχύτητας) και της εδαφικής παραμόρφωσης (ρηγμάτωση, εγκάρσια και διαμήκης μόνιμη εδαφική παραμόρφωση, κατολίσθηση, κ.λ.π.) που αντιστοιχεί στην Τάξη Κλάσης ΙΙΙ των σωληνώσεων, πρέπει να υπολογίζεται σύμφωνα με τη ανάλυση κινδύνου για μια συγκεκριμένη περιοχή και για έναν σεισμό με πιθανότητα 10% και περίοδο επιστροφής τα 475 χρόνια. Σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας, ο σχεδιασμός με περίοδο επιστροφής τα 475 χρόνια, θεωρείται επαρκής.

#### <u>Σεισμός σχεδιασμού</u>

Αφού προσδιορίστει ο σεισμικός κίνδυνος στην επιθυμητή περιοχή τοποθέτησης των υπόγειων σωληνώσεων, πρέπει να ορίστει το επίπεδο του σεισμού σχεδιασμού. Η υπάρχουσα φιλοσοφία για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των υπόγειων έργων απαιτεί δύο κριτήρια σχεδιασμού, το ένα κριτήριο σχετίζεται με ένα υψηλό επίπεδο σεισμού σχεδιασμού με σκοπό την προστασία της ανθρώπινης ζωής και το δεύτερο περιλαμβάνει ένα χαμηλότερο επίπεδο σεισμού σχεδιασμού για οικονομικούς σκοπούς. Τα δύο αυτά επίπεδα ορίζονται ως «μέγιστος σεισμός σχεδιασμού» και «σεισμός σχεδιασμού λειτουργίας». Πιο συγκεκριμένα:

Μέγιστος Σεισμός Σχεδιασμού (MDE): ορίζεται στην DSHA ως το μέγιστο επίπεδο δόνησης που μπορεί να εμφανιστεί σε μια περιοχή, ενώ στην PSHA ορίζεται ως ένα γεγονός με μικρή πιθανότητα εμφάνισης κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Σκοπός του MDE είναι η διατήρηση της δημόσιας ασφάλειας κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες φόρτισης.

Σεισμός Σχεδιασμού Λειτουργίας (ODE): ορίζεται σαν ένα σεισμικό γεγονός το οποίο αναμένεται λογικά να εμφανιστεί τουλάχιστον μία φορά κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της εγκατάστασης. Σε έναν ODE ο στόχος είναι ότι το όλο σύστημα θα συνεχίζει να λειτουργεί κατά τη διάρκεια και μετά τον ODE και θα παρουσιάσει ελάχιστες ή καθόλου βλάβες.

#### <u>Παράμετροι PGA και PGV</u>

Αφού καθορίσουμε τον σεισμό σχεδιασμού MDE ή λειτουργίας ODE πρέπει να ορίσουμε διάφορες παραμέτρους εδαφικής κίνησης. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οποιεσδήποτε από τις προσεγγίσεις σχεδιασμού που περιγράφονται σε αυτές τις οδηγίες, ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει την κατάλληλη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) για τις πάνω από το έδαφος εγκαταστάσεις, τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) για τις υπόγειες εγκαταστάσεις και τιμές PGD για τη σωλήνωση. Ο υπολογισμός της PGD μπορεί επίσης να απαιτήσει γνώση της PGA, τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης και άλλων παραγόντων.

## 3.3 ΑΛΛΕΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Σύμφωνα με τις ινδικές οδηγίες σχεδιασμού δικτύων φυσικού αερίου, για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό σωλήνωσης, απαιτείται ο υπολογισμός μιας σειράς άλλων βασικών παραμέτρων όπως:

## <u>Εσωτερική πίεση</u>

Η διαμήκης τάση λόγω της εσωτερικής πίεσης μπορέστε να υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$Sp = \frac{PD\mu}{2t}$$
(3.1)

## Όπου:

Sp = Διαμήκης τάση εφελκυσμού στο σωλήνα λόγω της εσωτερικής πίεσης

Ρ = Μέγιστη εσωτερική λειτουργούσα πίεση του σωλήνα

D = Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα

μ = Αναλογία Poisson (γενικά λαμβάνεται ίση με 0.3 για το χάλυβα)

t = Ονομαστικό πάχος τοιχώματος του σωλήνα

## Αλλαγή θερμοκρασίας

Η διαμήκης τάση εφελκυσμού λόγω της αλλαγής θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Sr = E\alpha t (T_2 - T_1) \tag{3.2}$$

Όπου:

Sr= Διαμήκης τάση εφελκυσμού στο σωλήνα λόγω μιας αλλαγής στη θερμοκρασία του Ε= Συντελεστής ελαστικότητας

- at= Γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής του χάλυβα
- Τ1= Θερμοκρασία στο σωλήνα κατά την διάρκεια της εγκατάστασης
- Τ2= Θερμοκρασία στο σωλήνα κατά την διάρκεια της λειτουργίας

## Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες παραμορφώσεις για τις υπόγειες συνεχείς σωληνώσεις δίνεται στον πίνακα 3.5.

| Τμήμα παραμόρφωσης |                                    | Κατηγορία<br>σωλήνων | Επιτρεπόμενη<br>παραμόρφωση |                                |
|--------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                    |                                    |                      | Εφελκυσμός                  | Θλίψη                          |
|                    | <u>Για PGD</u>                     | Όλκιμοι Σωλήνες      |                             | <u>Για PGD</u>                 |
| Συνεχείς           | $\epsilon_{oper} + \epsilon_{PGD}$ | Χυτοσιδήρου          | 2%                          |                                |
| Σωληνώσεις         |                                    | Σωλήνες χάλυβα       | 3%                          | αρχή του                       |
| Πετρελαίου         |                                    | Σωλήνες από          |                             | wrinkling (ɛ <sub>cr-c</sub> ) |
| και Φυσικού        |                                    | Πολυαιθυλένιο        | 20%                         |                                |
| αέριου             |                                    | Συνδέσεις            | 1%                          |                                |
|                    |                                    |                      |                             | wrinkling (0,5                 |
|                    |                                    |                      |                             | ως 1 ε <sub>cr-c</sub> )       |

| <b>Πίνακας 3.5:</b> Επιτρεπόμενες | ; παραμορφώσεις για | τους αγωγούς |
|-----------------------------------|---------------------|--------------|
|-----------------------------------|---------------------|--------------|

Για τους αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου, η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση δεν πρέπει να υπερβαίνει, σε καμία περίπτωση, το 4%. Η οριακή θλιπτική παραμόρφωση εξετάζεται σαν την παραμόρφωση στην αρχή της περιφερειακής θλιπτικής παραμόρφωσης (wrinkling) και ισούται με:

$$\varepsilon cr - c = 0.175 \frac{t}{R} \tag{3.3}$$

Όπου:

t = Πάχος του αγωγού

R = Ακτίνα του αγωγού

## 3.4 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι πριν την κατασκευή ενός υπόγειου δικτύου φυσικού αερίου, αφού ο σεισμός αποτελεί την κυριότερη αιτία αστοχίας του. Στην παράγραφο αυτή, αναφέρονται οι οδηγίες για τον ασφαλή σχεδιασμό του έτσι ώστε ο αγωγός να αντέξει ακόμα και στα πιο ακραία σενάρια σεισμού.

Το σημαντικότερο τμήμα του σχεδιασμού είναι ο καθορισμός του σεισμικού κινδύνου. Γενικά, ο σεισμικός κίνδυνος είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια και επιτυγχάνεται, κυρίως, μέσα από διαθέσιμα στοιχεία, την εμπειρία και μέσα από διάφορες υποθέσεις. Στο σχεδιασμό, από τα διαφορετικά είδη του σεισμικού κινδύνου, θεωρούμε ότι η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση είναι πιο σημαντική από τη σεισμική δόνηση του εδάφους (λόγω σεισμικών κυμάτων). Σύμφωνα με τις αμερικάνικες οδηγείες και τις ινδικές προκύπτουν τα παρακάτω:

- Στην περίπτωση εδαφικής διάρρηξης, οι οδηγίες καθιστούν απαραίτητη την εγκατάσταση ειδικών βαλβίδων διακοπής αερίου, στις σωληνώσεις φυσικού αερίου, για την αποφυγή διαρροών.
- Τα εξαρτήματα που εγκαθίστανται στις σωληνώσεις πρέπει να είναι όλκιμα σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας
- Η διάβρωση του αγωγού πρέπει να ελέγχεται με οποιοδήποτε μέσο γιατί ένας διαβρωμένος σωλήνας μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές βλάβες σε περίπτωση σεισμού

Στην περίπτωση των τμηματικών σωληνώσεων, η ικανότητα απορρόφησης της μετατόπισης του συνδέσμου (joint) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη μετακίνηση του συνδέσμου σε μια σεισμική δραστηριότητα σχεδιασμού.

## 3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (PGD)

Σύμφωνα με στοιχεία από παλαιότερους σεισμούς, έχει παρατηρηθεί ότι η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση παρατηρείται σε απομονωμένες περιοχές εδαφικής αστοχίας, προκαλώντας σημαντική ζημιά στις σωληνώσεις. Οι αμερικάνικοι και ινδικοί κανονισμοί υποδεικνύουν, ότι για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση της σωλήνωσης ενάντια στην PGD πρέπει:

- Όταν η αναμενόμενη μετατόπιση υπερβεί την ικανότητα απορρόφησης της μετατόπισης του αγωγού, πρέπει να ληφθούν μέτρα, όπως η βελτίωση του εδάφους
- Η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ εδάφους και αγωγού μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση επικάλυψης ενός σωλήνα. Αυτό που χρησιμοποιείται, συνήθως, είναι η επικάλυψη από πολυαιθυλένιο η οποία χρησιμοποιείται για την προστασία του αγωγού από τη διάβρωση, αλλά και για τη μείωση της δύναμης τριβής μεταξύ εδάφους και αγωγού.
- Τάφροι, παραμορφώσιμοι τοίχοι ή άλλα μέσα κατασκευάζονται για να απορροφήσουν τις παραμορφώσεις του εδάφους.
- Όταν αναμένεται μεγάλη παραμόρφωση, απαιτούνται ειδικές ενώσεις για τους σωλήνες ή ειδικά εξαρτήματα που επιτρέπουν την εκτροπή (deflection) των συνδέσμων, τη διαστολή ή συστολή τους.

Στις τμηματικές σωληνώσεις απαιτείται ειδικός σχεδιασμός για τις συνδέσεις για να αντέξουν την κίνηση του εδάφους κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης.

3.5.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΜΗΚΗ ΜΟΝΙΜΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (PGD)

Η μετατόπιση σχεδιασμού του εδάφους στην διαμήκη διεύθυνση δίνεται από τη σχέση:

$$\delta^{l} design = \delta^{l} * \mathbf{I}_{p}$$
(3.4)

Όπου:

δ<sup>Ι</sup>= μέγιστη διαμήκης μετατόπιση του εδάφους

Ι<sub>p</sub> = Συντελεστής σημασίας

| Class | Διέλευση<br>κυμάτων | Ρηγμάτωση | PGD  | Κατολίσθηση |
|-------|---------------------|-----------|------|-------------|
| I     | 1.5                 | 2.3       | 1.5  | 2.6         |
| п     | 1.25                | 1.5       | 1.35 | 1.6         |
| ш     | 1.0                 | 1.0       | 1.0  | 1.0         |
| IV    | *                   | *         | *    | *           |

Πίνακας 3.6: Συντελεστής σημασίας για τις διάφορες κατηγορίες αγωγών

## Συνεχείς σωληνώσεις

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέραμε ότι κατά την ανάλυση των συνεχών σωληνώσεων διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

 Όταν το δ<sup>Ι</sup> είναι μεγάλο και η παραμόρφωση του αγωγού εξαρτάται από το μήκος (*L*) της PGD ζώνης, τότε η μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού για θλίψη και εφελκυσμό ισούται με:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{t_{u}L}{2\pi DtE} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{t_{u}L}{2\pi Dt\sigma_{y}} \right)^{r} \right]$$
(3.5)

 Όταν το μήκος (*L*) της PGD ζώνης είναι μεγάλο και η παραμόρφωση του αγωγού εξαρτάται από το μέγεθος της κίνησης σχεδιασμού του εδάφους δ<sup>I</sup>, τότε η μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού για θλίψη και εφελκυσμό ισούται με:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{t_u L_e}{\pi D t E} \left[ 1 + \frac{n}{1 + r} \left( \frac{t_u L_e}{\pi D t \sigma_y} \right)^r \right]$$
(3.6)

Όπου:

Le: το ενεργό μήκος της σωλήνωσης πέρα από το οποίο δρα η δύναμη τριβής tu και προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\delta^{l} design = \frac{t_{u}L_{e}^{2}}{\pi D t E} \left[ 1 + \left(\frac{2}{2+r}\right) \left(\frac{n}{1+r}\right) \left(\frac{t_{u}L_{e}}{\pi D t \sigma_{y}}\right)^{r} \right]$$
(3.7)

Η παραμόρφωση σχεδιασμού του αγωγού (ε<sub>seismic</sub>) για τη διαμήκη εδαφική παραμόρφωση πρέπει να λαμβάνει μικρότερη τιμή από την τιμή της παραμόρφωσης που προκύπτει από τις σχέσεις 3.5 και 3.6. Επίσης, πρέπει να βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια που βρίσκονται στον πίνακα 3.5.

Εκτός από τις τιμές της παραμόρφωσης, οι οδηγίες σχεδιασμού περιλαμβάνουν τη χρήση ενώσεων που έχουν την ικανότητα επιμήκυνσης (expansion joints) έτσι ώστε να μετριάσουν την επίδραση της διαμήκους PGD στις συνεχείς σωληνώσεις. Πρέπει να τοποθετούνται τουλάχιστον δύο ενώσεις, μία στην κορυφή της PGD ζώνης και μία στην άκρη της.

#### <u>Τμηματικές σωληνωσεις</u>

Η μετατόπιση σχεδιασμού της ένωσης κάθε τμήματος του αγωγού:

$$\Delta seismic = \left(\frac{\delta^{\prime} design}{L/2}\right) \times L_{a}$$
(3.8)

Όπου: L<sub>α</sub>= μήκος τμήματος του αγωγού L= Μήκος ζώνης της PGD ζώνης

Η μετατόπιση του συνδέσμου σχεδιασμού πρέπει να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη μετατόπιση του:

#### $\Delta_{\text{seismic}} + \Delta_{\text{oper}} \leq \Delta_{\text{allowable}}$

Οι ενώσεις πρέπει να τοποθετούνται και στην κορυφή και στην άκρη της PGD ζώνης, ενώ τουλάχιστον τρεις ενώσεις πρέπει να εγκαθίστανται έξω από τα όρια της PGD ζώνης.

## 3.5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΜΟΝΙΜΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (PGD)

Ομοίως με τη διαμήκη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση, η κίνηση σχεδιασμού του εδάφους στην εγκάρσια διεύθυνση δίνεται από τη σχέση:

$$\delta^{t} design = \delta^{t} * \mathbf{I}_{p}$$
(3.9)

Όπου: δ<sup>t</sup>= μέγιστη εγκάρσια κίνηση του εδάφους Ι<sub>p</sub> = Συντελεστής σημασίας

#### <u>Συνεχείς σωληνώσεις</u>

Η μέγιστη παραμόρφωση λόγω κάμψης στον αγωγό υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$1. \quad \varepsilon_b = \pm \frac{\pi D \delta^t_{design}}{W^2} \tag{3.10}$$

$$2. \quad \varepsilon_b = \pm \frac{P_u W^2}{3\pi E t D^2} \tag{3.11}$$

Όπου:

D= εξωτερική διάμετρος του αγωγού δ<sup>t</sup><sub>design</sub>= εγκάρσια κίνηση σχεδιασμού του εδάφους W= πλάτος της PGD ζώνης t= πάχος του αγωγού P<sub>u</sub>= μέγιστη πλευρική αντίσταση του εδάφους ανά μήκος αγωγού E= Μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού

## <u>Τμηματικές σωληνωσεις</u>

Η μετατόπιση σχεδιασμού μιας ένωσης (Δseismic) λόγω εγκάρσιας PGD μπορεί να υπολογιστεί σαν το άθροισμα της αξονικής επιμήκυνσης (axial extension) και της επιμήκυνσης της ένωσης λόγω της περιστροφικής επίδρασης. Η αναμενόμενη μετατόπιση του συνδέσμου ισούται με:

$$\Delta seismic = \frac{\pi^2 L_o \delta^t design^2}{W^2} \left[ \frac{2D}{\delta^t design} \right]$$
(3.12)

 $\gamma$ ια 0.268≤ D/ $\delta$ <sup>t</sup><sub>design</sub> ≤ 3.73

και

$$\Delta seismic = \frac{\pi^2 L_o \delta' design^2}{2W^2} \left[ 1 + \left( \frac{D}{\delta' design} \right)^2 \right]$$
(3.13)

για άλλες τιμές του D/δ<sup>t</sup><sub>design</sub>.

# 3.6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΙΑΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΜΕ ΡΗΓΜΑ

Η ξαφνική μετατόπιση ενός ρήγματος συνδέεται, κυρίως, με το σεισμικό γεγονός. Η μετατόπιση αυτή ασκεί σημαντική επίδραση στα υπόγεια έργα, όπως είναι οι σωληνώσεις φυσικού αερίου. Τα ακόλουθα κριτήρια σχεδιασμού πρέπει να χρησιμοποιούνται έτσι ώστε η σωλήνωση να αντέξει μια ενδεχόμενη μετατόπιση ενός ρήγματος.

- Όταν μια υπόγεια σωλήνωση διασχίζει ένα ρήγμα, πρέπει να τοποθετείται σε τέτοια διεύθυνση ώστε να αποφεύγεται η θλίψη της. Η βέλτιστη γωνία του περάσματος του ρήγματος εξαρτάται από το βάθος (dip) του επιπέδου του ρήγματος και τον αναμενόμενο τύπο της κίνησης.
- Η ολκιμότητα μιας σωλήνωσης πρέπει να αυξάνεται σε περιοχή διάσχισης ενός ρήγματος έτσι ώστε να αντέξει τη μεγάλη μετακίνηση ενός ρήγματος χωρίς να αστοχήσει.
- Πρέπει να αποφεύγονται οι μεγάλες αλλαγές στο πάχος του τοιχώματος των αγωγών ή αλλαγές σε άλλα στοιχεία που συγκεντρώνουν τις παραμορφώσεις μέσα στη ζώνη του ρήγματος.
- Σε όλες τις περιοχές που αναμένεται μια πιθανή αστοχία εδάφους, οι σωληνώσεις πρέπει να τοποθετούνται σε ευθεία, αποφεύγοντας απότομες αλλαγές στην κατεύθυνση και στην ανύψωση.
- Στη σωλήνωση που περνά από την περιοχή ενός ρήγματος πρέπει να χρησιμοποιείται ένα σκληρό και ομαλό επίστρωμα (coating) όπως ένα εποξικό επίστρωμα, για να μειωθεί η γωνία τριβής μεταξύ της σωλήνωσης και του εδάφους.

- Το βάθος τοποθέτησης της σωλήνωσης πρέπει να ελαχιστοποιείται μέσα στη ζώνη του ρήγματος προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση του εδάφους στη σωλήνωση κατά την κίνηση του ρήγματος.
- Εάν η αναμενόμενη μετατόπιση του ρήγματος είναι πολύ μεγάλη, είναι ενδεδειγμένο να τοποθετείται η σωλήνωση πάνω από το έδαφος (σχήμα 3.5) και να σχεδιάζονται με στηρίξεις ολίσθησης (σχήμα 3.6) για να αντέξουν την μετατόπιση του εδάφους.
- Η ικανότητα απορρόφησης του αγωγού κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος αυξάνεται με τη μείωση της αντίστασης μεταξύ του εδάφους και του αγωγού, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μέσα. Για να επιτύχουμε την ελάχιστη αντίσταση του εδάφους, η σωλήνωση πρέπει να τοποθετείται σε μια ρηχή τάφρο με χαλαρό προς μεσαίο κοκκώδες έδαφος. Είναι σημαντική, όμως, η τοποθέτηση καλής γεωτεχνικής μεμβράνης μεταξύ του τοπικού εδάφους και του εδάφους επίχωσης (backfill soil), η οποία θα διαχωρίζει το τοπικό έδαφος από το υψηλής ποιότητας υλικό επίχωσης.



Σχήμα 3.5: Σωλήνωση πάνω από το έδαφος στην Αλάσκα που περνάει πάνω από το Denali Fault



Σχήμα 3.6: Στηρίξεις ολίσθησης

## Συνεχείς σωληνώσεις

Η μέση παραμόρφωση του αγωγού κατά το πέρασμα ενός ρήγματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = 2I_p \left[ \frac{\delta_{f-\alpha x}}{2L_a} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_{f-lat}}{2L_a} \right)^2 \right]$$
(3.14)

## Τμηματικές σωληνώσεις

Στην περίπτωση των σωληνώσεων που αποτελούνται από πολλά τμήματα σωλήνων ενωμένα μεταξύ τους, θεωρούμε ότι οι ενώσεις δέχονται τη μετατόπιση του ρήγματος με τον ίδιο τρόπο σε οποιοδήποτε πλευρά της γραμμής του

ρήγματος και να βρίσκονται. Η μετατόπιση σχεδιασμού μιας ένωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta seimic = \delta_{f-\alpha x} \times I_p \tag{3.15}$$

Ακολουθώντας πιστά τις γενικές αρχές του αντισεισμικού σχεδιασμού μιας υπόγειας σωλήνωσης είναι σίγουρο ότι ο αγωγός μας δεν θα αστοχήσει ακόμα και στις πιο ακραίες περιπτώσεις σεισμού. Για να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του συστήματος κοινής ωφέλειας που σχεδιάστηκε, σύμφωνα με τις παραπάνω οδηγείες, ο αγωγός πρέπει να περάσει στο στάδιο της ανάλυσης για να εξεταστεί η απόδοση του και αν τελικά ο σχεδιασμός που καταρτίστηκε ήταν ακριβής.

# ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΜΟΝΙΜΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

## 4.1 ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο οι σεισμικοί κίνδυνοι κατηγοριοποιούνται σε:

- Κινδύνους μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης
- Κινδύνους διέλευσης σεισμικών κυμάτων

Η μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους (PGD) μπορεί να είναι α) χωρικά κατανεμημένη, όταν παράγεται από κατολισθήσεις ή από πλευρική εξάπλωση λόγω ρευστοποίησης β) απότομη, όταν προκαλείται από ενεργά ρήγματα ή από μεγάλη σεισμική καθίζηση.

Η δεύτερη κατηγορία κινδύνου μετατόπισης του εδάφους συνδέεται άμεσα με τη διέλευση σεισμικών κυμάτων που προέρχονται από το επίκεντρο και απελευθερώνουν ενέργεια που διαλύει κατά μήκος τα εδαφολογικά στρώματα που διασχίζονται από τα κύματα αυτά.

## 4.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ PGD

Οι κύριες μορφές της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης (PGD) είναι η ρηγμάτωση επιφάνειας, οι κατολισθήσεις, η καθίζηση εδάφους και η πλευρική εξάπλωση λόγω ρευστοποίησης. Η αστοχία ενός αγωγού που υποβάλλεται σε PGD εξαρτάται από το μέγεθος (amount) και την χωρική επέκταση (spatial extend) της PGD. Μια σωλήνωση μπορεί να διασχίζει τη ζώνη της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης σε οποιαδήποτε διεύθυνση (σχήμα 4.2). Κατά το σχεδιασμό της σωλήνωση για τον προσδιορισμό της κρίσιμης απόκρισης της στη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση (PGD), θεωρούμε δύο συνθήκες όπως την παράλληλη και την κάθετη διασταύρωση του αγωγού με τη ζώνη της PGD.



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης λόγω της αστοχίας του εδάφους



**Σχήμα 4.2:** Πέρασμα σωληνώσεων από ζώνη μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης σε αυθαίρετη γωνία

#### 4.2.1 ΔΙΑΜΗΚΗΣ PGD

#### <u>Συνεχείς σωληνώσεις</u>

Η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση μπορεί να διαχωριστεί στη διαμήκη (σχήμα 4.3) και στην εγκάρσια συνιστώσα. Η παράγραφος αυτή περιγράφει τη συμπεριφορά των συνεχών σωληνώσεων που υποβάλλονται σε διαμήκη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση, όπου η κίνηση του εδάφους είναι παράλληλη στον άξονα του αγωγού.

Μια συνεχής σωλήνωση, κάτω από την επίδραση της διαμήκους PGD μπορεί να οδηγήσει σε:

- > Αστοχία των συγκολλημένων ενώσεων
- Τοπικός λυγισμός (wrinkle) στη ζώνη θλίψης και
- θραύση εφελκυσμού στη ζώνη εφελκυσμού.
- Κάμψη δοκού όταν το βάθος τοποθέτησης είναι μικρό

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο ξεχωριστά μοντέλα της για τη συμπεριφορά του αγωγού στη διαμήκη PGD. Στο πρώτο μοντέλο, η σωλήνωση θεωρείται ότι είναι γραμμικά ελαστική, ενώ στο δεύτερο θεωρείται ότι ακολουθεί μια σχέση τάσης-παραμόρφωσης Ramber-Osgood.Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιείται για υπόγειους αγωγούς με ενώσεις ολίσθησης, ενώ το δεύτερο μοντέλο χρησιμοποιείται για σωλήνες με μετωπικές συγκόλλησεις τόξου (arc welded butt joints) στις ενώσεις.



**Σχήμα 4.3:** Σωλήνωση που διαπέρνα τη ζώνη της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης στην κατεύθυνσης της κίνησης του εδάφους (διαμήκης PGD)

#### <u>1° μοντέλο- ελαστικό μοντέλο</u>

Οι O'Rourke και Nordberg ανέπτυξαν διάφορα μοντέλα για τη διαμήκη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση όπως την ορθογώνικη κατανομή, μονοκλινή κατανομή, τριγωνική κατανομή, τραπεζοειδής κατανομή, μη συμμετρική τριγωνική κατανομή, κλπ.(O'Rourke et al, 1995). Για την κρίσιμη απόκριση του αγωγού, χρησιμοποιείται η ορθογωνική κατανομή γιατί δίνει τη μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης σε έναν ελαστικό αγωγό.

Για την ορθογωνική κατανομή της PGD, η παραμόρφωση σε έναν ελαστικό αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\alpha L}{2L_{em}} \qquad \text{yi}\alpha \quad L < 4L_{em}$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha L}{\sqrt{LL_{em}}} \qquad \text{yi}\alpha \quad L > 4L_{em} \qquad (4.1)$$

#### Όπου:

L<sub>em</sub> (embedment length): το μήκος πέρα από το οποίο η σταθερή δύναμη ολίσθησης tu (δύναμη τριβής/ μονάδα μήκους) πρέπει να ενεργεί για να προκαλέσει μια παραμόρφωση ε στον αγωγό ίση με την παραμόρφωση α του εδάφους και ισούται με:

$$L_{\rm em} = \frac{\alpha EA}{f_m}$$
(4.2)

και L είναι το μήκος της PGD ζώνης.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το ελαστικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αποτελεσματικά για την ανάλυση της συμπεριφοράς των αγωγών που έχουν ενώσεις ολίσθησης χαμηλής αντοχής, καθώς και ενώσεις συγκόλλησης τόξου μη επενδεδυμένου (unshielded) ηλεκτροδίου (βλέπε σεισμός Northridge).






Σχήμα 4.5: Κατανομή μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης (O'Rourke et al, 1995)

# 2° μοντέλο-ανελαστικό μοντέλο

Οι O'Rourke et al (1995) υπέθεσαν μια ορθογωνική κατανομή για τον καθορισμό των συνθηκών που οδηγούν τον αγωγό σε τοπική κάμψη λόγω της διαμήκους PGD, χρησιμοποιώντας το μοντέλο υλικού Ramber-Osgood (Ramber-Osgood material model). Το ανελαστικό μοντέλο διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις:

1<sup>η</sup> περίπτωση: το μέγεθος της κίνησης του εδάφους, δ, είναι μεγάλο και η παραμόρφωση του αγωγού εξαρτάται από το μήκος L της PGD ζώνης

2<sup>η</sup> περίπτωση: το L είναι μεγάλο και η παραμόρφωση του αγωγού εξαρτάται από το δ

Το μοντέλο Ramber-Osgood περιγράφεται από τη σχέση:





Σχήμα 4.6: Οι δύο περιπτώσεις του ανελαστικού μοντέλου για τη διαμήκη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση

Με τη χρήση του μοντέλου Ramber-Osgood, οι O'Rourke et all (1995) κατέληξαν στις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης (peak axial strain) στον αγωγό :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\beta_p L}{2E} \left[ 1 + \left(\frac{n}{1+r}\right) \left(\frac{\beta p L}{2\sigma_y}\right)^r \right]$$
(4.4)

$$\delta_{cr} = \frac{\beta_p L^2_{cr}}{E} \left\{ 1 + \frac{2}{2+r} \frac{n}{1+r} \left( \frac{\beta_p L_{cr}}{\sigma_y} \right)^r \right\}$$
(4.5)

όπου :

Ε: μέτρο ελαστικότητας για το υλικό του αγωγού (=200.000 Mpa για το χάλυβα) n και r : οι παράμετροι Ramber-Osgood

 $σ_y$ : τάση διαρροής (effective yield stress)

β<sub>p</sub>: παράμετρος βάθους τοποθέτησης που δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$\beta_p = \frac{f_m}{\pi \phi_p t} = \frac{\tan \phi \gamma_m H}{t}$$
 για κοκκώδη εδάφη  
 $\beta_p = \frac{a_o S u}{t}$  για συνεκτικά εδάφη

όπου α₀ είναι ένας εμπειρικός συντελεστής που εξαρτάται από το Su

|                      | Grade- B | X- 42 | X- 52 | X- 60 | X- 70 |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| σ <sub>y</sub> (MPa) | 227      | 310   | 358   | 413   | 517   |
| n                    | 10       | 15    | 9     | 10    | 5.5   |
| r                    | 100      | 32    | 10    | 12    | 16.6  |

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Ramberg-Osgood για ήπιο χάλυβα και X-grade χάλυβα

#### <u>Τμηματικές σωληνώσεις που υπόκεινται σε διαμήκη PGD</u>

Σύμφωνα με τον Suzuki (1988), οι βλάβες στους ενωμένους αγωγούς εμφανίζονται, συνήθως, λόγω της διαμήκους PGD. Ο Suzuku κατέληξε στην άποψη αυτή βασιζόμενος στις καταγεγραμμένες βλάβες των τμηματικών αγωγών φυσικού αερίου στο σεισμό του Niikata το 1964.

Υπάρχουν τρεις τρόποι αστοχίας για τις τμηματικές σωληνώσεις:

- > Αξονική αποσυναρμολόγηση (pullout) των ενώσεων
- Σπάσιμο των συνδέσμων (bell and spigot) στις ενώσεις
- Κυκλικές ρωγμές κάμψης στο τμήμα του σωλήνα μακριά από τις ενώσεις

Όπως και με τις συνεχείς σωληνώσεις, η διαμήκης PGD προκαλεί αξονικές επιδράσεις στην ενωμένη σωλήνωση. Πιο συγκεκριμένα, προκαλεί αξονική παραμόρφωση στα τμήματα του αγωγού και αξονική μετατόπιση στις ενώσεις. Εντούτοις, σε αντίθεση με την συμπεριφορά των συνεχών σωληνώσεων, οι βλάβες στις τμηματικές σωληνώσεις που υπόκεινται σε διαμήκη PGD εμφανίζονται στις ενώσεις των σωλήνων, αφού η αντοχή των ενώσεων είναι λιγότερη από την αντοχή του ίδιου του σωλήνα. Η αστοχία των ενώσεων και από τα χαρακτηριστικά της PGD.

# 4.2.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ PGD

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εγκάρσια PGD αναφέρεται στην κίνηση του εδάφους κάθετα στον άξονα του αγωγού. Όταν μια συνεχής σωλήνωση υποβάλλεται σε εγκάρσια PGD, τότε θα τεντωθεί και θα λυγίσει προσπαθώντας να προσαρμοστεί στην εγκάρσια μετατόπιση του εδάφους. Έτσι, ο τρόπος αστοχίας του σωλήνα εξαρτάται από το ποσό της αξονικής τάσης εφελκυσμού (tension) και της παραμόρφωσης (strain) λόγω κάμψης. Δηλαδή, εάν η αξονική τάση είναι χαμηλή, ο τοίχος του σωλήνα μπορεί να λυγίσει (buckle) στη θλίψη

λόγω της υπερβολικής κάμψης. Αφ' ετέρου, εάν η αξονική τάση είναι υψηλή, ο σωλήνας μπορεί να σπάσει σε εφελκυσμό λόγω των συνδυασμένων επιδράσεων αξονικής τάσης και κάμψης ( bending).

Παρόμοια με τη διαμήκη PGD, η απόκριση των σωληνώσεων στην εγκάρσια PGD είναι ένας συνδυασμός του μεγέθους δ της PGD, το πλάτος W της PGD ζώνης όπως και της κατανομής της εδαφικής παραμόρφωσης. Υπάρχουν δύο κατανομές για την εγκάρσια PGD (χωρικά κατανεμημένη και τοπικά απότομη όπου η γωνία τομής αγωγού-ρήγματος 90°). Στην παρούσα εργασία, το προφίλ της εγκάρσιας μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης θεωρούμε ότι είναι μια χωρικά κατανεμημένη εδαφική κίνηση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Κατανομές της εγκάρσιας PGD



Σχήμα 4.8: Γράφημα PGD όπου η κίνηση του εδάφους είναι χωρικά κατανεμημένη

#### Συνεχείς σωληνώσεις που υπόκεινται σε εγκάρσια PGD

Οι αναλυτικές εκφράσεις που θα χρησιμοποιήσουμε εδώ βασίζονται σε ένα απλοποιημένο μοντέλο του O'Rourke (O'Rourke et al, 1999) για την συμπεριφορά των σωληνώσεων στη χωρικά κατανεμημένη μόνιμη εδαφική παραμόρφωση σε μη ρευστοποιήσιμο έδαφος. Θεωρούμε δύο συνθήκες, όπως : α) μεγάλο πλάτος ζώνης της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης και η σωλήνωση θεωρείται ότι είναι εύκαμπτη, και β) στενό πλάτος ζώνης της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης και η σωλήνωση θεωρείται ότι είναι δύσκαμπτη.



**Σχήμα 4.9:** Αναλυτικό μοντέλο για σωλήνωση που υποβάλλεται σε χωρικά κατανεμημένη εγκάρσια PGD (O'Rourke, 1989)



Σχήμα 4.10: Συμπεριφορά αγωγού στην εγκάρσια PGD

Για την περίπτωση α) (μεγάλο πλάτος/ εύκαμπτος αγωγός) η μέγιστη παραμόρφωση κάμψης (bending), ε<sub>b</sub>, στο σωλήνα, δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_b = \pm \frac{\pi^2 \delta D}{W^2} \tag{4.6}$$

Όπου:

D = Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα δ = Εγκάρσια εδαφική κίνηση W = Πλάτος ζώνης μόνιμης εδάφικης παραμόρφωσης t = Πάχος του σωλήνα

Για την περίπτωση β) (στενό πλάτος/δύσκαμπτος αγωγός). Η μέγιστη παραμόρφωση, ε<sub>b</sub>, στο σωλήνα, δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_b = \pm \frac{p_u W}{3\pi E t D^2}$$
(4.7)

Όπου:

P<sub>u</sub> = Μέγιστη πλευρική αντίσταση του εδάφους ανά μονάδα μήκος του αγωγού

Ε = Μέτρο ελαστικότητας του υλικού του σωλήνα

# <u>Τμηματικές σωληνώσεις που υποβάλλονται σε εγκάρσια PGD</u>

Μια σωλήνωση που αποτελείται από τμήματα σωλήνων συνδεδεμένα μεταξύ τους με ενώσεις που έχουν χαμηλότερη αντοχή και ακαμψία σχετικά με τον κύλινδρο του σωλήνα ονομάζεται ενωμένη σωλήνωση (segmented pipeline). Στις σωληνώσεις αυτές, η εγκάρσια PGD προκαλεί ένα συνδυασμό από αξονικές επιμηκύνσεις (axial extensions) και γωνιακές περιστροφές στην ένωση των σωλήνων.



Σχήμα 4.11 <sup>α-β</sup>: Επιμήκυνση και περιστροφή της ένωσης κατά την χωρικά κατανεμημένη εγκάρσια PGD (M.O'Rourke και Nordberg, 1991)

Η μετατόπιση της ένωσης του σωλήνα (Δx) που οφείλεται σε εγκάρσια PGD μπορεί να υπολογιστεί σαν το άθροισμα της αξονικής επέκτασης και της επέκτασης λόγω περιστροφικής επίδρασης. Η μετατόπιση της ένωσης που προκύπτει ισούται με:

$$\Delta x = \begin{cases} \frac{\pi^2 Lo \,\delta^2}{W^2} \left[ \frac{2D}{\delta} \right] & 0.268 \le D \,/ \,\delta < 3.73 \\ \frac{\pi^2 Lo \,\delta^2}{2W^2} \left[ 1 + (D \,/ \,\delta)^2 \right] & \text{Alleg tipes} \end{cases}$$
(4.8)

όπου: Lo = Μήκος του τμήματος σωλήνα δ = μετατόπιση εδάφους στη ζώνη της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωση

# 4.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

# 4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που προκαλεί βλάβες στις υπόγειες σωληνώσεις είναι η μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους (PGD). Από τις διάφορες κατηγορίες PGD που υπάρχουν, αυτή που αξιολογείται ως πιο επικίνδυνη για τα υπόγεια δίκτυα σωληνώσεων είναι η μετατόπιση ρήγματος. Το ρήγμα είναι η επιφάνεια κατά την οποία χωρίζεται το πέτρωμα σε δύο μέρη (τεμάχη) κατά την δημιουργία ενός σεισμού. Τα ρήγματα επιτρέπουν στα τεμάχη (blocks) να κινούνται σχετικά μεταξύ τους. Ως ενεργό ρήγμα ορίζεται η ασυνέχεια δύο τμημάτων του φλοιού της γης στο οποίο πραγματοποιούνται σχετικές κινήσεις (κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου ένα ρήγμα θεωρείται ενεργό όταν έχει μετακινηθεί τα τελευταία 11000 χρόνια). Αυτή η μετακίνηση μπορεί να οφείλεται στην ξαφνική μετατόπιση ή μπορεί να οφείλεται στη βαθμιαία συσσώρευση. Η ξαφνική μετατόπιση ενός ρήγματος συνδέεται συνήθως με το σεισμικό γεγονός. Η μετατόπιση ενός ρήγματος έχει πολύ σημαντική επίδραση στις υπόγειες κατασκευές που διασχίζουν ένα ρήγμα, όπως είναι οι υπόγειες σωληνώσεις. Το είδος ενός ρήγματος καθορίζεται από τη σχετική κίνηση των δύο τεμαχών στα οποία χωρίζεται το πέτρωμα στη διάρκεια της διάρρηξης. Ανάλογα με την μετακίνηση που παρουσιάζουν τα δύο μέρη μεταξύ τους τα ρήγματα διακρίνονται σε κανονικά, ανάστροφα και οριζόντιας ολίσθησης.

- Κανονικό ρήγμα ονομάζεται το ρήγμα στο οποίο η πάνω πλευρά (το επάνω μέρος) κινείται προς τα κάτω.
- <u>Ανάστροφο</u> ονομάζεται το ρήγμα στο οποίο η πάνω πλευρά κινείται προς τα κάτω. Ανάστροφα ρήγματα παρατηρούνται κύρια κατά μήκος του Ελληνικού τόξου.
- <u>Ρ ή γ μ α ο ρ ι ζ ό ν τ ι α ς ο λ ί σ θ η σ η ς</u> είναι αυτό που κινείται οριζόντια και μπορεί να είναι δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο. Τα ρήγματα ολίσθησης είναι λίγα και παρατηρούνται στην περιοχή μεταξύ Κεφαλληνίας και Λευκάδας. Επίσης παρατηρούνται στην περιοχή του βόρειου Αιγαίου.



γ) ανάστροφο ρήγμα

β) ρήγμα κανονικής ολίσθησης

δ) πλάγιο ρήγμα

**Σχήμα 4.12**: Είδη Ρηγμάτων

# 4.3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΙΜΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ

Το ποσό της μετατόπισης ενός ρήγματος επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά ενός αγωγού. Το ποσό της μετατόπισης της επιφάνειας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, αλλά βρίσκεται, κυρίως, σε συνάρτηση με τον τύπο του ρήγματος, το μέγεθος του σεισμού, εστιακό βάθος και η γεωλογία της περιοχής. Οι μετακινήσεις των ρηγμάτων δεν χρειάζεται περιορίζονται σε ένα μόνο επίπεδο ρήγματος ή ζώνη, αλλά μπορεί επίσης να εμφανιστούν σε σημαντική απόσταση από το κύριο ίχνος του ρήγματος (ASCE, 1984).

Με βάση την παγκόσμια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει 421 ιστορικούς σεισμούς, οι Wells και Coppersmith επέλεξαν 244 σεισμούς και ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση για τη μετατόπιση ρήγματος και το στιγμιαίο μέγεθος. Σύμφωνα με την παρατήρησή τους, η μετατόπιση ρήγματος ποικίλλει από 0.05 ως 8.0m για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, 0.08 ως 2.1m για κανονικά ρήγματα και 0.06 ως 1.5m για τα ανάστροφα ρήγματα (Όταν τα χαρακτηριστικά του ρήγματος δεν είναι γνωστά, ο σχεδιασμός μπορεί να βασιστεί στη μετατόπιση ενός ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης για ένα συντηρητικό σχεδιασμό).

Η εμπειρική σχέση που δίνεται από τους Wells και Coppersmith (1994) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η μετατόπιση ρήγματος σύμφωνα με τις εξισώσεις :

# Για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης:

 $\log \delta fs = -6.32 + 0.90M$ 

Για κανονικά ρήγματα:

 $\log \delta fn = -4.45 + 0.63M$ 

Για ανάστροφα ρήγματα:

 $\log \delta fr = -0.74 + 0.08M$ 

Για ένα άγνωστο ή τυφλό ρήγμα:

 $\log \delta fb = -4.80 + 0.69M$ 

Όπου:

δ = Μέση μετατόπιση ρήγματος σε μέτρα

Μ = Στιγμιαίο Μέγεθος του σεισμού

Για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, η μετακίνηση του ρήγματος κατά μήκος και εγκάρσια στη σωλήνωση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

**δ** *f* – *ax* = **δ** *fs* **cosβ** (αξονική διεύθυνση )

δ f –lat =δ fs sin β (εγκάρσια διεύθυνση)

Όπου:

δ fs = μετακίνηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης σε μέτρα



Σχήμα 4.13: Πέρασμα σωλήνωσης από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης

Για ένα ρήγμα κανονικής ολίσθησης, η μετακίνηση του ρήγματος κατά μήκος, εγκάρσια και κατακόρυφα στη σωλήνωση προσδιορίζεται από:

δ f -ax =δ fn\* cosψ \*sin β (αξονική διεύθυνση )

δ f -lat =δ fn\* cosψ\*cosβ (εγκάρσια διεύθυνση)

δ f -ver =δ fn\* sinψ (κατακόρυφη διεύθυνση )

Όπου:

δ fn = Η μετακίνηση ενός κανονικού ρήγματος σε μέτρα



Σχήμα 4.14: Πέρασμα σωλήνωσης από ρήγμα κανονικής ολίσθησης

Στα ανάστροφα ρήγματα, οι συνιστώσες της μετατόπισης εξετάζονται με τον ίδιο τρόπο σαν ρήγμα κανονικής ολίσθησης με αρνητική ολίσθηση.

# 4.3.3 ΡΗΓΜΑ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΣ

Το είδος του ρήγματος επιδρά με διαφορετικό τρόπο στους οριζόντιους υπόγειους αγωγούς. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης η κίνηση που κυριαρχεί είναι η οριζόντια, η οποία παραμορφώνει μια συνεχή σωλήνωση, για παράδειγμα, λόγω θλίψης ή εφελκυσμού ανάλογα με τη γωνία τομής μεταξύ ρήγματος και αγωγού. Στην περίπτωση των κανονικών και των ανάστροφων ρηγμάτων η μετατόπιση του εδάφους είναι κάθετη. Όταν έχουμε κανονικό ρήγμα ο αγωγός παραμορφώνεται λόγω εφελκυσμού, ενώ όταν έχουμε ανάστροφο ρήγμα, τότε ο αγωγός παραμορφώνεται λόγω θλίψης.

#### Διασταύρωση συνεχών σωληνώσεων με ρήγματα

Υπάρχουν τρία είδη αστοχίας των συνεχών σωληνώσεων που διαπερνούν ένα ρήγμα:

- Θραύση λόγω εφελκυσμού (tensile rupture)
- Τοπική κάμψη (wrinkling) λόγω θλίψης
- Κάμψη Δοκού(Beam buckling) σε θλίψη

#### Διασταύρωση τμηματικών σωληνώσεων με ρήγματα

Η συμπεριφορά των τμηματικών σωληνώσεων, είναι παρόμοια με αυτή των συνεχών σωληνώσεων, με τη αναμενόμενη γωνία τομής, β, μεταξύ ρήγματος και αγωγού να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην συμπεριφορά τη σωλήνωσης.

# 4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΡΗΓΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την ανάλυση της απόκρισης των σωληνώσεων στη μετατόπιση ενός ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης:

- > Οι αναλυτικές μέθοδοι όπως αυτές των Newmark Hall και Kennedy et al.
- > Ανάλυση με τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

# 4.4.1 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΓΩΓΟΥ

Η πλειοψηφία των μεθόδων ανάλυσης των υπόγειων σωληνώσεων βασίζεται στην αλληλεπίδραση εδάφους- αγωγού. Με τον όρο αλληλεπίδραση εννοούμε ότι η συμπεριφορά του αγωγού, κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, συνδέεται άμεσα με τη κίνηση του εδάφους, αφού η οποιαδήποτε κίνησή του εδάφους προκαλεί παραμορφώσεις στον αγωγό. Οι υπόγειοι αγωγοί παρουσιάζουν σημαντικές ζημιές λόγω των παραμορφώσεων και των δυνάμεων που επιβάλλονται σε αυτούς (αγωγούς) μέσα από την αλληλεπίδραση μεταξύ του αγωγού και του εδάφους. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, η παραμόρφωση του εδάφους διαχωρίζεται στη διαμήκη συνιστώσα (κίνηση εδάφους παράλληλη στον άξονα του αγωγού) και στην εγκάρσια (κίνηση εδάφους εγκάρσια στον άξονα του αγωγού). Όταν, όμως, γίνεται αναφορά σε αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού θεωρείται ότι το έδαφος δε θα αστοχήσει, αλλά οι μετατοπίσεις του (εδάφους) θα παράγουν δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια εδάφους-αγωγού (R.Flores-Berrones και Χ. Li Liu), οι οποίες προσομοιώνονται με ελατήρια (σχήμα 4.25) τα οποία τοποθετούνται σε αξονική, εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση.



**Σχήμα 4.15 :** Αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού που προκαλείται από PGD λόγω σεισμού (O'Rourke, 1998)

#### Διαμήκης κίνηση εδάφους για μη ρευστοποιήσιμα εδάφη- αξονικά ελατήρια

Η κίνηση παράλληλα στον άξονα του αγωγού οδηγεί σε διαμήκεις δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια εδάφους-αγωγού. Οι αξονικές δυνάμεις που ασκούν τα ελατήρια αντιπροσωπεύουν την τριβή που ασκεί το έδαφος στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια κατά μήκος του αγωγού. Η ASCE δίνει τις παρακάτω εξισώσεις για άμμο και για άλλα μη συνεκτικά εδάφη:

$$t_u = \frac{\pi}{2} * D * \gamma * H(1 + K_o) \tan \delta$$
(4.9)

$$x_u = (2.54 - 5.08 * 10^{-3} m)$$
 για πυκνή και χαλαρή άμμο (4.10)

Όπου:

- tu: μέγιστη αξονική αντίσταση ανά μονάδα μήκους
- xu: μέγιστη σχετική μετατόπιση ανά μονάδα μήκους
- Κ \_ :συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων γαιών
- Η : απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως τον άξονα του αγωγού
- D : εξωτερική διάμετρος αγωγού
- γ : υπό άνωση ειδικό βάρος εδάφους
- δ : γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους

Εγκάρσια οριζόντια κίνηση εδάφους για μη ρευστοποιήσιμα εδάφη- εγκάρσια οριζόντια ελατήρια

Η κίνηση κάθετα στον άξονα του αγωγού στο οριζόντιο επίπεδο προκαλεί εγκάρσιες δυνάμεις στην διεπιφάνεια εδάφους-αγωγού. Τα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος σε οποιαδήποτε οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Σύμφωνα με την ASCE προκύπτει:

$$p_u = \gamma * H * N_{qh} * D \tag{4.11}$$

*y<sub>u</sub>* =0.07-0.10 (H+D/2) για χαλαρή άμμο (4.12) 0.02- 0.03 (H+D/2) για πυκνή άμμο Όπου:

pu: μέγιστη εγκάρσια οριζόντια αντίσταση ανά μονάδα μήκους

N<sub>qh</sub>: συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (για μη συνεκτικά εδάφη υπολογίζεται από το σχήμα 4.16)



Σχήμα 4.16 : Προσδιορισμός συντελεστού οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (O'Rourke και Trautmann, 1983)

# εγκάρσια κατακόρυφη (ανοδική) κίνηση εδάφους για μη ρευστοποιήσιμα εδάφηεγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια

Η ανοδική κίνηση κάθετα στον άξονα του αγωγού οδηγεί σε πλευρικές δυνάμεις στη διεπιφάνεια εδάφους- αγωγού. Σύμφωνα με την ASCE:

$$q_{\mu} = \gamma * H * N_{q\nu} * D \tag{4.13}$$

$$z_{\mu} = (0.01 - 0.015)H \tag{4.14}$$

Όπου:

q<sub>u</sub>: μέγιστη ανοδική αντίσταση N<sub>qv</sub>: συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης (σχήμα 4.17) z<sub>u</sub>: ανοδική μετατόπιση

# Εγκάρσια κατακόρυφη (καθοδική) κίνηση εδάφους για μη ρευστοποιήσιμα εδάφηεγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια

Η καθοδική κίνηση κάθετα στον άξονα του αγωγού στο κατακόρυφο επίπεδο οδηγεί σε πλευρικές δυνάμεις στη διεπιφάενεια εδάφους-αγωγού. Σύμφωνα με την ASCE προκύπτει:

$$q_{u} = \gamma * H * N_{q} * D + \frac{1}{2} \gamma * D^{2} * N_{\gamma}$$
 (4.15)

$$z_{\mu} = (0.1 - 0.15)H \tag{4.16}$$

Ν<sub>q</sub>, Ν<sub>γ</sub>: συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω (σχήμα 4.17)



Σχήμα 4.17: Προσδιορισμός συντελεστού κατακόρυφης ανύψωσης (O'Rourke και Trautmann, 1983)



**Σχήμα 4.18:** Κατακόρυφοι (προς τα κάτω) συντελεστές φέρουσας ικανότητας προτεινόμενοι από τον Meyerhof (1955)

# 4.4.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για να εξεταστεί το πρόβλημα της συμπεριφοράς των lifelines στην απότομη μετακίνηση του εδάφους. Οι Newmark and Hall (1975), για παράδειγμα, ανέπτυξαν από τα πρώτα αναλυτικά μοντέλα για το πέρασμα μιας σωλήνωσης από ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης σε μια γωνία , έτσι ώστε η διάρρηξη του εδάφους (ground rupture) να καταλήγει σε εφελκυστική παραμόρφωση του αγωγού. Υπέθεσαν ότι ο σωλήνας είναι σταθερά συνδεδεμένος με το έδαφος (δηλ., καμία σχετική μετατόπιση σωληνώσεων) σε δύο σημεία αγκύρωσης σε κάποια απόσταση από το ίχνος του ρήγματος και δεν λαμβάνουν υπόψη την καμπτική ακαμψία των σωληνώσεων και τις οριζόντιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του εδάφους και του αγωγού.

Οι Kennedy et al. (1977) επέκτειναν τις απόψεις των Newmark και Hall λαμβάνοντας υπόψη τις πλευρικές αλληλεπιδράσεις εδάφους και αγωγού. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ο αγωγός συμπεριφέρεται ως καλώδιο και δεν έχει καμπτική ακαμψία.

Τέλος, οι Wang και Yeh (1985) πρότειναν κάποιες τροποποιήσεις στην μορφή του αναλυτικού μοντέλου των Kennedy et al.

# <u>Μεθοδος Newmark-Hall</u>

Οι Newmark-Hall (1975) ήταν οι πρώτοι που ανέλυσαν το πρόβλημα της διάσχισης ρήγματος μέσα από αγωγούς. Θεώρησαν ένα μοντέλο (σχήμα 4.15) με μια συνολική μετακίνηση ρήγματος  $\delta_f$  στο οποίο μια σωλήνωση τέμνει ένα δεξιόστροφο ρήγμα ολίσθησης σε μια γωνία β. Για μια γωνία τομής αγωγούρήγματος  $\beta \leq 90^\circ$ , το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης οδηγεί τον αγωγό σε εφελκυστική παραμόρφωση.

Στο μοντέλο αυτό θεωρείται ότι ο αγωγός είναι σταθερά συνδεδεμένος με το έδαφος (δηλ. δεν υπάρχει σχετική μετατόπιση μεταξύ αγωγού και εδάφους) σε δύο σημεία αγκύρωσης σε απόσταση L<sub>a</sub> από το ίχνος του ρήγματος.

Οι συγγραφείς αγνοούν την καμπτική ακαμψία αγωγού καθώς και τις πλευρικές αλληλεπιδράσεις αγωγού-εδάφους. Ουσιαστικά, προβλέπουν μια τάφρο με κεκλιμένα πλευρικά τοιχώματα (σχήμα 4.20) για τα οποία θεωρείται μόνο διαμήκης αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους. Η συνολική επιμήκυνση του σωλήνα αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη οφείλεται στην αξονική συνιστώσα της μετακίνησης ρήγματος (δ, cosβ), ενώ η δεύτερη προκαλείται από την πλευρική συνιστώσα της μετακίνησης ρήγματος (δ, sinβ).



Σχήμα 4.19: Μέθοδος Newmark- Hall



**Σχήμα 4.20:** Ειδική τάφρος για το πέρασμα αγωγού από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (NIST, 1996)

Λόγω συμμετρίας, λαμβάνεται υπόψη μόνο η μία πλευρά του ίχνους του ρήγματος. Η μέση παραμόρφωση του αγωγού, *ε*, ισούται με:

$$\overline{\varepsilon} = \frac{\delta_f}{2L_a} \cos\beta + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_f}{2L_a} \sin\beta \right)^2$$
(4.17)

Όπου:

L<sub>a</sub>: το ενεργό μήκος αγκύρωσης, δηλαδή η απόσταση μεταξύ του ίχνους του ρήγματος και του σημείου αγκύρωσης. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί το μήκος πέρα από το οποίο δεν αναπτύσσεται αξονική τάση στη σωλήνωση λόγω της μετακίνησης ενός ρήγματος. Το L<sub>a</sub> δίνεται από τη σχέση:

$$L_a = L_e + L_p \tag{4.18}$$

Όπου:

L<sub>e</sub>: το μήκος του αγωγού πέρα από το οποίο αναπτύσσεται η ελαστική παραμόρφωση

L<sub>p</sub>: το μήκος του αγωγού πέρα από το οποίο αναπτύσσεται η πλαστική παραμόρφωση

Και δίνονται από τις σχέσεις:

$$L_e = (E_i E_y \pi D t)/t_u$$
 (4.19)

$$L_{p}=[E_{p}(\epsilon-\epsilon_{y}) \pi D t]/t_{u}$$
(4.20)

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4.19) και (4.20) στην εξίσωση (4.18), το ενεργό μήκος αγκύρωσης της σωλήνωσης ισούται με:

$$L_{a} = \frac{E_{i}\varepsilon_{v}\pi Dt}{t_{u}} + \frac{\left(E_{p}\left(\varepsilon - \varepsilon_{v}\right)\pi Dt\right)}{t_{u}}$$
(4.21)

Το μοντέλο Newmark-Hall υπερεκτιμά την ανεκτή μετακίνηση ρήγματος για τις σωληνώσεις, αφού χρησιμοποιεί τη μέση παραμόρφωση σαν κρητίριο αστοχίας και αγνοεί, επίσης, την πλευρική αλληλεπίδραση εδάφους- αγωγού. Η αστοχία στη μέθοδο της Newmark-Hall εμφανίζεται όταν η μέση παραμόρφωση  $\overline{\varepsilon}$  είναι μεγαλύτερη από 4%.

#### <u>Μέθοδος Kennedy et al.</u>

Η μέθοδος Kennedy et al αναπτύχθηκε για την εξέταση της συμπεριφοράς αγωγών με μικρό βάθος επίχωσης, μη συνεκτικό εδαφικό υλικό επίχωσης και μεγάλες επιβαλλόμενες μετακινήσεις ρήγματος. Επίσης, εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η μετατόπιση του ρήγματος προκαλεί εφελκυσμό στον αγωγό.Οι Kennedy et al. (1977) επέκτειναν τις απόψεις των Newmark-Hall και ενσωμάτωσαν κάποιες βελτιώσεις στη μέθοδο για το προσδιορισμό της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης. Το μοντέλο που περιέγραψαν, βασίζεται στον υπολογισμό του 'μήκους αγκύρωσης', που ορίζεται ως το μήκος του αγωγού μέσω του οποίου ο αγωγός μεταβιβάζει τις αξονικές τάσεις που δέχεται μέσω της τριβής με το έδαφος. Πέρα από το μήκος αυτό ο αγωγός δεν επηρεάζεται από τη μετακίνηση του ρήγματος. Η μετακίνηση του ρήγματος προκαλεί επιμήκυνση στον αγωγό όμως η επιμήκυνση αυτή περιορίζεται από τις δυνάμεις τριβής που ασκεί το έδαφος στον αγωγό. Η τιμή των δυνάμεων τριβής είναι διαφορετική για το καμπύλο τμήμα του αγωγού.



**Σχήμα 4.21:** Μοντέλο Kennedy et al (Kennedy et al, 1977)

Η παραμόρφωση λόγω κάμψης, ε<sub>b</sub>, εκφράζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_b = \frac{D}{R_c}$$
(4.22)

Όπου:

Rc: είναι η ακτίνα του καμπύλου τμήματος.

$$R_c = \frac{\sigma \pi D t}{p_o}$$

και

σ: αξονική τάση στο ρήγμα

po: πλευρική δύναμη αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού ανά μονάδα μήκους

Έτσι, η συνολική παραμόρφωση στον αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \frac{D}{2R_c}$$
(4.23)

Όπου:

ε<sub>a</sub>: είναι η μέγιστη αξονική παραμόρφωση λόγω επιμήκυνσης του αγωγού που επιβάλλεται από τη μετατόπιση ρήγματος (fault offset)

Η συνολική επιμήκυνση του αγωγού, ΔL, μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση:

$$\Delta L = \delta_f \cos \beta + \frac{\left(\delta_f \sin \beta\right)^2}{3L_c}$$
(4.24)

Ο πρώτος όρος εκφράζει την επιμήκυνση λόγω της αξονικής συνιστώσας της μετακίνησης του ρήγματος, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει την επιμήκυνση που οφείλεται στην πλευρική συνιστώσα της μετακίνησης ρήγματος. Τέλος, το L<sub>c</sub> ορίζεται ως το οριζόντιο μήκος προβολής του πλευρικά παραμορφωμένου αγωγού το οποίο ισούται με:

$$L_c = \sqrt{R_c \delta_c \sin \beta} \tag{4.25}$$

Βασιζόμενοι στην εξίσωση Ramberg Osgood (εξίσωση 4.4), η συνολική επιμήκυνση μπορεί να εκφραστεί σε όρους ενός ολοκληρώματος της αξονικής παραμόρφωσης.

$$\Delta L = \frac{2}{E} \int_{0}^{L_a} s \left[ 1 + \frac{n}{1+n} \left( \frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^2 \right] dx$$
(4.26)

Καταλήγοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος Kennedy et al υπερεκτιμά τις τιμές των παραμορφώσεων λόγω κάμψης, θεωρώντας ότι ο αγωγός δεν έχει καμπτική ακαμψία.

# <u>Μέθοδος Wang-Yeh</u>

Μετά από τις παραπάνω μελέτες, οι Wang και Yeh (1985) εισήγαγαν κάποιες πρόσθετες τροποποιήσεις. Θεωρώντας μια σταθερή ακτίνα της καμπυλότητας για τα καμπύλα τμήματα, οι Wang και Yeh αναλύουν τη παραμόρφωση του αγωγού βασιζόμενοι στην ισορροπία των δυνάμεων και στη συμβατότητα παραμόρφωσης. Επιπροσθέτως, θεωρούν ότι οι παραμορφώσεις στις Περιοχές ΙΙ και ΙΙΙ είναι ελαστικές ενώ αυτές στην Περιοχή Ι είναι ανελαστικές. Για το ευθύ τμήμα του σωλήνα (Περιοχή ΙΙΙ), χρησιμοποιείται η θεωρία της δοκού πάνω σε ένα ελαστικό θεμέλιο.



Σχήμα 4.22: Μοντέλο Wang- Yeh (Wang και Yeh, 1985)

# <u>Μέθοδος Karamitros et al</u>

Όπως και οι προηγούμενες αναλυτικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν, η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για την ανάλυση πλήρως θαμμένων αγωγών που διασχίζουν ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Βασίζεται σε υποθέσεις που υιοθετούνται και στις

άλλες αναλυτικές μεθόδους των Kennedy et al και Wang-Yeh (σχήμα 4.18-4.19) αλλά προχωράει περαιτέρω και αναλύει το καμπύλο τμήμα της σωλήνωσης για να προσδιορίσει το μη επιθυμητό συνδυασμό στις τιμές αξονικής και της καμπτικής παραμόρφωσης. Επίσης, προσδιορίζει την επίδραση του κυρτού τμήματος στις αξονικές παραμόρφώσεις και υπολογίζει τη μέγιστη παραμόρφωση (max strain). Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογίζει τις αξονικές και τις καμπτικές παραμορφώσεις κατά μήκος της σωλήνωσης, λαμβάνοντας υπόψη και τις επιδράσεις της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού.Το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης λαμβάνεται υπόψη σαν ένα κεκλιμμένο επίπεδο, με μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης, έτσι ώστε η τομή του ρήγματος με τον αγωγό να γίνεται σε ένα μόνο σημείο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για γωνίες διάρρηξης β≤90°.



Σχήμα 4.23: Ανάλυση σωλήνωσης από τους Wang- Yeh (Karamitros, 2006)

# 4.4.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΕΝΩΜΕΝΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Οι O'Rourke και Trautmann (1981) ανέπτυξαν ένα απλοποιημένο μοντέλο για να αναλύσουν τη συμπεριφορά των τμηματικών σωληνώσεων κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος. Στο μοντέλο αυτό θεωρείται ότι: α) τα τμήματα των σωλήνων είναι άκαμπτα (rigid) με τις ενώσεις να δέχονται την παραμόρφωση του εδάφους b) το ρήγμα θεωρείται ότι περνάει στο μέσο του τμήματος του σωλήνα. Στο μοντέλο αυτό η ανεκτή μετατόπιση ρήγματος προσδιορίζεται:

$$\delta_{\rm f} = \min \begin{cases} \delta_{\alpha} \sec \beta \\ \delta_l \csc \beta \end{cases}$$
(4.27)

Όπου:

δ<sub>α</sub>: η ικανότητα αποσυναρμολόγησης (pull-out capacity) της ένωσης κοντά στην μετατόπιση του ρήγματος και

δ<sub>ι</sub>: η ικανότητα πλευρικής παραμόρφωσης η οποία εξαρτάται από την ικανότητα περιστροφής της ένωσης



**Σχήμα 4.24:** Πέρασμα ρήγματος από ενωμένη σωλήνωση ( O'Rourke και Trautmann, 1981)

# 4.4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σύμφωνα με τις αμερικανικές οδηγίες, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και τον σχεδιασμό οποιασδήποτε σωλήνωσης. Με την εμφάνιση των υπολογιστών μεγάλης ισχύος με χαμηλό κόστος, η χρήση της μεθόδου FEM μπορεί να υιοθετηθεί για πολλές εφαρμογές των σωληνώσεων, καλύπτοντας κινδύνους δόνησης του εδάφους, ρευστοποίησης, κατολίσθησης και ρηγμάτωσης επιφάνειας. Στην πράξη μπορεί να χρησιμοποιήθει για τις περισσότερες από τις σημαντικές σωληνώσεις (Τάξη Κλάσης III και IV) που υποβάλλονται σε PGD.

Το σχήμα 4.25 παρουσιάζει τη χαρακτηριστική μορφή της FEM, όπου ο αγωγός μπορεί να προσομοιωθεί με μία δοκό. Κοντά στη μετατόπιση του ρήγματος, το μήκος των στοιχείων της δοκού/ αγωγού πρέπει να μην είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο του σωλήνα. Το μοντέλο πρέπει να δέχεται τις μη γραμμικότητες του υλικού και της γεωμετρίας (μεγάλη παραμόρφωση). Το έδαφος προσομοιώνεται από πλευρικά και αξονικά ελατήρια που έχουν την ικανότητα να προσομοιώνουν τις μη γραμμικές συμπεριφορές δύναμης – παραμόρφωσης του εδάφους. Η φόρτιση, συνήθως PGD, μοντελοποιείται από τις μετατοπίσεις που εφαρμόζονται στις άκρες των ελατήριων του εδάφους για να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση εδάφους- αγωγού.

Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναφέρονται συνήθως σε FEM τύπουδοκού, είναι δράσεις διαμήκους κατεύθυνσης. Ο χρήστης του μοντέλου πρέπει να έχει υπόψη ότι αυτές οι τάσεις και οι παραμορφώσεις δεν είναι οι ίδιες με αυτές στο τοίχωμα ενός αγωγού αφού το τοίχωμα διαστρεβλώνεται σημαντικά (όπως στο wrinkling).

# 4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΑ ΡΗΓΜΑΤΑ

Για την περίπτωση που μια σωλήνωση διασχίζει ένα κανονικό ή αντίστροφο ρήγμα έχει πραγματοποιηθεί λίγη αναλυτική εργασία. Για ένα κανονικό ρήγμα, το σύστημα εδάφους-αγωγού δεν είναι πλέον συμμετρικό και η εγκάρσια δύναμη αλληλεπίδρασης στη διεπιφάνεια αγωγού-εδάφους στην καθοδική μετακίνηση του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στην ανοδική μετακίνηση. Για το πέρασμα μιας σωλήνωσης από ένα ανάστροφο ρήγμα, φαίνεται ότι καμία αναλυτική προσέγγιση δεν είναι διαθέσιμη μέχρι σήμερα. Οι οδηγίες της ASCE (1984) προτείνουν τη χρήση της μεθόδου FEM με κατάλληλα συστήματα προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης του αγωγού με το περιβάλλον εδαφικό υλικό (βλ Σχήμα 4.25).





γ) εδαφικά ελατήρια

Σχήμα 4.25: Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

# ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΕΠΙ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

# 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης εμφανίζονται στις αναλυτικές μεθόδους που περιγράψαμε παραπάνω εξαιτίας του γεγονότος ότι οι επιδράσεις που προκαλούν στις υπόγειες σωληνώσεις είναι αρκετά σημαντικές. Ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης ανάλογα με τη μετατόπιση που επιβάλλει προκαλεί παραμορφώσεις στον αγωγό. Οι παραμορφώσεις αυτές αποτελούν ένα καθοριστικό κομμάτι του αντισεισμικού σχεδιασμού των υπόγειων σωληνώσεων και μπορούν να προσδιοριστούν με τη χρήση του προγράμματος SSF. Το πρόγραμμα αυτό βασίζεται στην αναλυτική μεθοδολογία των Karamitros et al η οποία περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 και έχει δομηθεί με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Fortran και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξετάσει την επίδραση διάφορων χαρακτηριστικών είτε του αγωγού, είτε του υλικού επίχωσης ή ακόμα και της γωνίας διάρρηξης στις τιμές παραμόρφωσης ενός αγωγού, κατά τη μετακίνηση ενός ρήγματος. Το πρόγραμμα SSF είναι εύκολο στη χρήση και δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα για μεγάλες τιμές επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.

# 5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SSF

Το παράθυρο εκκίνησης του προγράμματος (βλ. Σχήμα 5.1) ζητάει από το χρήστη να δώσει τιμές σε παραμέτρους που αφορούν τον αγωγό :

Εξωτερική διάμετρος (m) Πάχος τοίχωματος (m)

Στη συνέχεια ζητούνται τιμές για τα χαρακτηριστικά του χάλυβα που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός:

Μέτρο Ελαστικότητας= 210 (GPa) Τάση διαρροής (Yield Stress) (MPa) (πίνακας 5.1) Τάση αστοχίας (Failure Stress) (MPa) (πίνακας 5.1) Παραμόρφωση αστοχίας (%) (πίνακας 5.1)

Τέλος ζητούνται οι τιμές των εδαφικών ελατηρίων που προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής καθώς και οι συνιστώσες δχ και δγ της μετατόπισης του ρήγματος.

Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t<sub>u</sub> (KN/m) ( εξίσωση 4.9) Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος σωληνώσεων, p<sub>u</sub> (KN/m) (εξίσωση 4.10) Οριακή εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση ρήγματος, ΔΡ (mm) ( εξίσωση 4.12)

DX (m) - Παράλληλο στον άξονα σωληνώσης και ισούται με δx=δf\*cosβ DY (m) - Κάθετο στον άξονα σωληνώσης και ισούται με δy=δf\*sinβ

Τα αποτελέσμα που δίνει το πρόγραμμα περιλαμβάνουν:

# ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

- Αξονική Παραμόρφωση στο πέρασμα του ρήγματος (%)
- Μέγιστη Αξονική Παραμόρφωση (%)

- Μέγιστη Παραμόρφωση Κάμψης-Maximum Bending Strain (%)
- Ελάχιστη Παραμόρφωση(%)
- Μέγιστη Παραμόρφωση (%)
- Μη αγκυρωμένο μήκος Unanchored length (%)



Σχήμα 5.1: Παράθυρο εκκίνησης προγράμματος SSF

|                      | X- 42 | X- 46 | X- 52 | X- 56 | X- 60 | X- 65 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ <sub>y</sub> (MPa) | 290   | 317   | 359   | 386   | 413   | 448   |
| Τάση διαρροής        |       |       |       |       |       |       |
| Failure stress       | 413   | 434   | 455   | 490   | 517   | 531   |
| Τάση αστοχίας        |       |       |       |       |       |       |
| Failure strain       | 4%    | 4%    | 4%    | 4%    | 4%    | 4%    |
| Παραμόρφωση          |       |       |       |       |       |       |
| θραύσης λόγω         |       |       |       |       |       |       |
| εφελκυσμού           |       |       |       |       |       |       |

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά χάλυβα για τα κυριότερα είδη αγωγών

# 5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Με τη χρήση του SSF θα εξετάστει η επίδραση:

- Της γωνίας διάρρηξης, β.
- Των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού (D-t).
- Του τύπου χάλυβα του αγωγού ( τάση διαρροής, τάση θραύσης).
- Της μετατόπισης του ρήγματος, δf.
- Της γωνίας τριβής, φ, μεταξύ εδάφους και αγωγού.

Ο αγωγός που χρησιμοποιείται είναι ένας αγωγός φυσικού αερίου (7.5 MPa) κατασκευασμένος από χάλυβα X-52, με εξωτερική διάμετρο D=0.6m και πάχος τοιχώματος t=0.0064m. Το έδαφος είναι αμμώδες με ενεργό ειδικό βάρος γ=18kN/m, γωνία τριβής φ=36° (δ=24°) και βάθος τοποθέτησης H=1.3m. Η μετατόπιση που επιβάλλει το ρήγμα ισούται με 3.5m και με γωνία διάρρηξης 60°. Για να εξετάστει η επίδραση κάθε μίας από τις παραπάνω παραμέτρους στην συμπεριφορά του αγωγού, κρατούνται σταθερές όλες οι παραμέτροι και γίνονται αλλάγες κάθε φορά στην παράμετρο επίδρασης.

# 5.3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ

Η γωνία διάρρηξης β είναι η γωνία με την οποία το ρήγμα διασχίζει την σωλήνωση. Οι γωνίες που θα εξεταστούν κυμαίνονται από τις 45 ως τις 90 μοίρες (για μικρότερες γωνίες τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβή λόγω θλιπτικών παραμορφώσεων που ακούνται στον αγωγό) και τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που προκύπτουν από το πρόγραμμα SSF δίνονται στον πίνακα 5.2.

# <u>Δεδομένα</u>

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m) | 0.6    |
|-----------------------------------|--------|
| παχος, t (m)                      | 0.0064 |

| βαθος αξονα αγωγου, h (m)  | 1.3    |
|--|--------|
| γωνία τριβής, φ (°)  | 36     |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 24     |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)                | 13.86  |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος σωληνώσεων, p <sub>u</sub><br>(KN/m) | 160.89 |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ (mm)                                   | 64     |
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m)  | 3.5    |

# Πίνακας 5.2: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF

# <u>Αποτελέσματα</u>

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 2.971                               | 3.003                             | 0.934                            | 2.069                   | 3.938                  | 370.297 |
| 2   | 2.791                               | 2.824                             | 0.944                            | 1.879                   | 3.768                  | 367.216 |
| 3   | 2.589                               | 2.622                             | 0.956                            | 1.666                   | 3.578                  | 362.068 |
| 4   | 2.351                               | 2.384                             | 0.97                             | 1.415                   | 3.354                  | 356.935 |
| 5   | 2.071                               | 2.105                             | 0.987                            | 1.118                   | 3.092                  | 350.899 |
| 6   | 1.734                               | 1.768                             | 1.008                            | 0.76                    | 2.775                  | 343.619 |
| 7   | 1.297                               | 1.332                             | 1.036                            | 0.296                   | 2.368                  | 334.198 |
| 8   | 0.577                               | 1.168                             | 1.077                            | 0.091                   | 2.244                  | 318.982 |
| 9   | 0.129                               | 1.158                             | 1.333                            | -0.175                  | 2.491                  | 234.85  |

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή γωνίας διάρρηξης

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και γραφικά με τη βοήθεια του προγράμματος EXCEL στα επόμενα σχήματα.



**Σχήμα 5.2:** Γραφήμα αποτελεσμάτων αξονικής παραμόρφωσης για αλλαγή γωνίας διάρρηξης



**Σχήμα 5.3:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή γωνίας διάρρηξης



Σχήμα 5.4: Γραφήμα αποτελεσμάτων μήκους Lu για αλλαγή γωνίας διάρρηξης

Για μία σταθερή μετατόπιση ρήγματος 3.5 μέτρων, η αύξηση στη γωνία διάρρηξης β καταλήγει μια σε μία μείωση των αξονικών παραμορφώσεων στο ρήγμα (η οποία οφείλεται λογικά στη μείωση των αξονικών τάσεων με την αύξηση της γωνίας β). Από τις 80 μοίρες και μέχρι τις 90 παρατηρούμε μία σημαντική μείωση στην αξονική παραμόρφωση η οποία φτάνει σε τιμές κοντά στο μηδέν γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για μια μετατόπιση ρήγματος δ=3.5 μέτρων που διασχίζει έναν αγωγό X-52 με D=0.6m και t=0.0064m πρέπει να προτιμώνται οι μεγάλες γωνίες διάρρηξης.

Όσον αφορά τη μέγιστη παραμόρφωση στον αγωγό (μέγιστη αξονική+μέγιστη παραμόρφωση κάμψης) το πρόγραμμα βγάζει τιμές εντός των ορίων (4%) που δίνει η API για τους αγωγούς από χάλυβα, οι οποίες μειώνονται σημαντικά καθώς αυξάνεται η γωνία β μέχρι τις 80 μοίρες όπου αρχίζει η μέγιστη παραμόρφωση να αυξάνεται ξανά λόγω της επικράτησης αυξημένων καμπτικών παραμορφώσεων

Τέλος, το μήκος Lu (μήκος μεταξύ του ίχνους ρήγματος και του σημείου αγκύρωσης) παρουσιάζει μια μεγάλη μείωση με την αύξηση της γωνίας β. Το Lu ορίζεται ως το μήκος πέρα από το οποίο οποιαδήποτε μετακίνηση του ρήγματος

δεν επηρεάζει τον αγωγό. Με την αύξηση της γωνίας για μια σταθερή μετατόπιση δ, έχουμε μείωση της συνιστώσας δχ της μετατόπισης με αποτέλεσμα να μειώνεται και το μήκος Lu του αγωγού.

# 5.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Η μετατόπιση που θα εξετάστει κυμαίνεται από 1 εώς 5.5 μέτρα για μια σταθερή γωνία 60° (αλλαγή στις συνιστώσες δχ και δy) και τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που προκύπτουν από το πρόγραμμα SSF δίνονται στον πίνακα 5.5.

#### <u>Δεδομένα</u>

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m)  | 0.6    |  |
|--|--------|--|
| παχος, t (m)   | 0.0064 |  |
| βαθος αξονα αγωγου, h (m)  | 1.3    |  |
| γωνία τριβής, φ (°)  | 36     |  |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 24     |  |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)                | 13.86  |  |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος σωληνώσεων, p <sub>u</sub><br>(KN/m) | 160.89 |  |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ (mm)                                   | 64     |  |
| Γωνία διάρρηξης, β (°)   | 60     |  |
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m)  |        |  |

#### Πίνακας 5.4: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF
#### <u>Αποτελέσματα</u>

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 0.166                               | 1.075                             | 1.045                            | 0.03                    | 2.12                   | 300.694 |
| 2   | 0.988                               | 1.178                             | 1.041                            | 0.137                   | 2.218                  | 327.627 |
| 3   | 1.453                               | 1.488                             | 1.02                             | 0.468                   | 2.508                  | 337.568 |
| 4   | 1.802                               | 1.836                             | 1                                | 0.835                   | 2.836                  | 345.089 |
| 5   | 2.094                               | 2.128                             | 0.984                            | 1.144                   | 3.112                  | 351.395 |
| 6   | 2.351                               | 2.384                             | 0.97                             | 1.415                   | 3.354                  | 356.935 |
| 7   | 2.583                               | 2.616                             | 0.957                            | 1.659                   | 3.573                  | 361.934 |
| 8   | 2.796                               | 2.829                             | 0.946                            | 1.883                   | 3.775                  | 366.525 |
| 9   | 2.994                               | 3.026                             | 0.936                            | 2.091                   | 3.962                  | 370.794 |
| 10  | 3.179                               | 3.212                             | 0.926                            | 2.286                   | 4.138                  | 374.801 |

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή μετατόπισης

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 5.5: Γραφήμα αποτελεσμάτων αξονικής παραμόρφωση για αλλαγή μετατόπισης



Σχήμα 5.6: Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή μετατόπισης



Σχήμα 5.7: Γραφήμα αποτελεσμάτων μήκους Lu για αλλαγή μετατόπισης

Για μία σταθερή γωνία διάρρηξης β ίση με 60°, η αύξηση στη μετατόπιση καταλήγει μια σε μία αύξηση των αξονικών παραμορφώσεων στο ρήγμα (η οποία οφείλεται στην αύξηση των αξονικών τάσεων με την αύξηση της μετατόπισης δ). Επίσης, αυτό που είναι αξιοσημείωτο στα αποτελέσματα είναι η σταθερότητα στις τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης κάμψης, η οποία δεν επηρεάζεται σημαντικά με την αύξηση της μετατόπισης δ. Όσον αφορά τις τιμές της μέγιστης

παραμόρφωσης στον αγωγό παρουσίαζουν αύξηση καθώς αυξάνει το δ και παίρνει και την οριακή της τιμή (4.1%) για μετατόπιση ίση με 5.5 μέτρα. Τέλος το μήκος Lu αυξάνεται με την αύξηση της μετατόπισης του ρήγματος. Η αύξηση του δ με μια σταθερή γωνία β, προκαλεί την αύξηση της δχ και της δy συνιστώσας της μετατόπισης με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το μήκος Lu του αγωγού.

#### 5.3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Η τιμές διαμέτρων του αγωγού χάλυβα X-52 που θα εξεταστούν κυμαίνονται από 0.6 εώς 1.5 μέτρα. Η διαφορά με τις προηγούμενες διερευνήσεις είναι ότι θεωρούμε 3 διαφορετικούς λόγους D/t διατηρώντας ένα σταθερό λόγο H/D (βάθος τοποθέτησης- διάμετρος), έτσι ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα για την επίδραση της διαμέτρου κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος. Θα εξετάσουμε τους λόγους D/t ίσους με 15, 30 και 93.75, κρατώντας σταθερό το λόγο H/D που θα είναι ίσος με 2.2. Η μεταβολή στη διάμετρο προκαλεί μεταβολή στις τιμές των δυνάμεων αντίστασης που ασκούν τα εδαφικά ελατήρια στον αγωγό και μεταβολή στην εγκάρσια μετατόπιση ΔP(mm) του ρήγματος . Τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που προκύπτουν από το πρόγραμμα SSF δίνονται στον πίνακα 5.7.

#### <u>Δεδομένα</u>

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m)  | 0.6-1.5            |
|--|--------------------|
| λόγος D/t  | 15,30 και<br>93.75 |
| λόγος h/ D   | 2.2                |
| γωνία τριβής, φ (°)  | 36                 |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 24                 |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος<br>σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)             | 14.071-<br>39.088  |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά<br>μήκος σωληνώσεων, p <sub>u</sub> (KN/m) | 167.02-<br>463.96  |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ<br>(mm)                                | 64.8-108           |

| Γωνία διάρρηξης, β (°)      | 60  |
|-----------------------------|-----|
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m) | 3.5 |

#### Πίνακας 5.6: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF

#### <u>Αποτελέσματα</u>

για D/t=15

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu    |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| 1   | 0.129                               | 0.246                             | 0.243                            | 0.004                   | 0.489                  | 1,356 |
| 2   | 0.129                               | 0.262                             | 0.262                            | 0                       | 0.524                  | 1,351 |
| 3   | 0.128                               | 0.271                             | 0.278                            | -0.006                  | 0.549                  | 1,360 |
| 4   | 0.129                               | 0.287                             | 0.297                            | -0.01                   | 0.584                  | 1,356 |
| 5   | 0.129                               | 0.302                             | 0.316                            | -0.013                  | 0.618                  | 1,352 |
| 6   | 0.129                               | 0.312                             | 0.330                            | -0.017                  | 0.642                  | 1,355 |
| 7   | 0.129                               | 0.327                             | 0.348                            | -0.022                  | 0.675                  | 1,356 |
| 8   | 0.129                               | 0.342                             | 0.367                            | -0.025                  | 0.708                  | 1,352 |
| 9   | 0.128                               | 0.351                             | 0.38                             | -0.029                  | 0.732                  | 1,359 |

|  | Πίνακας 5.7: | Αποτελέσματα | παραμορφώσεων | για D/t=15 |
|--|--------------|--------------|---------------|------------|
|--|--------------|--------------|---------------|------------|

#### για D/t=30

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 0.514                               | 0.539                             | 0.373                            | 0.166                   | 0.912                  | 953     |
| 2   | 0.52                                | 0.567                             | 0.405                            | 0.162                   | 0.971                  | 950     |
| 3   | 0.545                               | 0.6                               | 0.439                            | 0.161                   | 1.039                  | 942     |
| 4   | 0.509                               | 0.617                             | 0.465                            | 0.153                   | 1.082                  | 953     |
| 5   | 0.568                               | 0.66                              | 0.506                            | 0.154                   | 1.166                  | 934     |
| 6   | 0.534                               | 0.678                             | 0.531                            | 0.147                   | 1.209                  | 943.819 |
| 7   | 0.504                               | 0.697                             | 0.556                            | 0.141                   | 1.252                  | 953     |
| 8   | 0.553                               | 0.738                             | 0.596                            | 0.142                   | 1.334                  | 937     |
| 9   | 0.525                               | 0.757                             | 0.621                            | 0.136                   | 1.377                  | 945     |

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για D/t=30

για D/t=93.75

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 2.376                               | 2.410                          | 1.005                            | 1.405                   | 3.415                  | 352.130 |
| 2   | 2.329                               | 2.365                          | 1.096                            | 1.269                   | 3.460                  | 360.714 |
| 3   | 2.372                               | 2.412                          | 1.171                            | 1.241                   | 3.583                  | 351.887 |
| 4   | 2.368                               | 2.410                          | 1.252                            | 1.158                   | 3.662                  | 352.115 |
| 5   | 2.371                               | 2.417                          | 1.338                            | 1.078                   | 3.755                  | 350.974 |
| 6   | 2.374                               | 2.423                          | 1.424                            | 0.999                   | 3.847                  | 349.829 |
| 7   | 2.359                               | 2.410                          | 1.496                            | 0.914                   | 3.906                  | 352.127 |
| 8   | 2.201                               | 2.251                          | 1.449                            | 0.801                   | 3.700                  | 383.489 |
| 9   | 2.460                               | 2.521                          | 1.753                            | 0.768                   | 4.274                  | 332.526 |

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για D/t=93.75

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και γραφικά στα επόμενα σχήματα.



**Σχήμα 5.8:** Γράφημα αποτελέσματων αξονικής παραμόρφωση για αλλαγή διαμέτρου αγωγού



Σχήμα 5.9: Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή διαμέτρου αγωγού



Σχήμα 5.10: Γραφήμα αποτελεσμάτων μήκους Lu για αλλαγή διαμέτρου αγωγού

Οι πίνακες και τα γραφηματα των αποτελεσμάτων δείχνουν ότι οι τιμές των παραμορφώσεων, εκτός της μέγιστης, αλλά και το μήκος Lu παρουσιάζουν μια σταθερότητα με την αλλαγή της διαμέτρου. Αυτό που αξίζει προσοχής είναι η αύξηση που παρουσιάζεται στην μέγιστη παραμόρφωση με την αλλαγή της διαμέτρου. Η αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης εμφανίζεται και για στους τρείς λόγους D/t και φτάνει στα υψηλότερα επίπεδα για D/t= 93.75 όπου έχουμε τη μέγιστη παραμόρφωση να φτάνει στο 4.2 %. Η τιμή αυτή της παραμόρφωσης

ξεπερνά τα όρια που θέτουν οι αμερικάνικες οδηγίες (ASCE, March 2005) με την επιτρεπόμενη παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού να μην ξεπερνά το 4%.

#### 5.3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ

Η τιμές πάχους τοιχώματος του αγωγού από χάλυβα X-52, με διάμετρο D=0.6 μέτρα, κυμαίνονται από 0.0051 εώς 0.0125 μέτρα. Τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που προκύπτουν από το πρόγραμμα SSF δίνονται στον πίνακα 5.11.

#### <u>Δεδομένα</u>

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m)  | 0,6               |
|--|-------------------|
| παχος, t (m)   | 0.0051-<br>0.0125 |
| βαθος αξονα αγωγου, h (m)  | 1.3               |
| γωνία τριβής, φ (°)  | 36                |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 24                |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)                | 13.86             |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος σωληνώσεων, p <sub>u</sub><br>(KN/m) | 160.89            |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ (mm)                                   | 64                |
| Γωνία διάρρηξης, β (°)   | 60                |
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m)  | 3.5               |

Πίνακας 5.10: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF

#### <u>Αποτελέσματα</u>

| α/α | t (m)  | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|--------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 0.0051 | 2.752                               | 2.793                             | 1.184                            | 1.61                    | 3.977                  | 290.012 |
| 2   | 0.0056 | 2.576                               | 2.614                             | 1.091                            | 1.522                   | 3.705                  | 317.074 |
| 3   | 0.0064 | 2.351                               | 2.384                             | 0.97                             | 1.415                   | 3.354                  | 356.935 |
| 4   | 0.0071 | 2.182                               | 2.213                             | 0.885                            | 1.328                   | 3.098                  | 391.394 |
| 5   | 0.0087 | 1.864                               | 1.889                             | 0.739                            | 1.149                   | 2.628                  | 468.828 |
| 6   | 0.0095 | 1.729                               | 1.752                             | 0.684                            | 1.068                   | 2.436                  | 506.898 |
| 7   | 0.0103 | 1.607                               | 1.628                             | 0.637                            | 0.991                   | 2.265                  | 544.556 |
| 8   | 0.0111 | 1.494                               | 1.514                             | 0.596                            | 0.917                   | 2.11                   | 581.811 |
| 9   | 0.0119 | 1.389                               | 1.408                             | 0.561                            | 0.847                   | 1.968                  | 618.667 |
| 10  | 0.0125 | 1.314                               | 1.332                             | 0.537                            | 0.795                   | 1.869                  | 646.045 |

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή πάχους τοιχώματος

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα.



**Σχήμα 5.11:** Γραφήμα αποτελεσμάτων αξονικής παραμόρφωσης για αλλαγή πάχος τοιχώματος αγωγού



**Σχήμα 5.12:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή πάχος τοιχώματος αγωγού



**Σχήμα 5.13:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μήκους Lu για αλλαγή πάχος τοιχώματος αγωγού

Η αύξηση του τοιχώματος, διατηρώντας τη διάμετρο του αγωγού σταθερή, είναι λογικό να προκαλέσει την μείωση των παραμορφώσεων, αφού το τοίχωμα του αγωγού είναι αυτό που δέχεται τις τάσεις από την μετατόπιση του ρήγματος. Η αύξηση του τοιχώματος καθιστά τον αγωγό πιο ανθεκτικό στις μετατοπίσεις, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τον πίνακα των αποτελεσμάτων των παραμορφώσεων. Αυτό που θεωρείται αξιοσημείωτο στα παραπάνω αποτελέσματα είναι η γραμμική αύξηση του μήκους Lu με την αύξηση του τοιχώματος του αγωγού, γεγονός που υποδεικνύει ότι η αύξηση στο τοίχωμα (πιο ανθεκτικός αγωγός) αυξάνει το μήκος που αγωγός δέχεται τις αξονικές τάσεις λόγω της μετατόπισης του ρήγματος.

#### 5.3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ

Για να εξετάστει η επίδραση του βάθους τοποθέτησης ενός αγωγού φυσικού αερίου από χάλυβα X-52 θα θεωρηθούν δύο λόγοι H/D (με σταθερό D/t=15) σύμφωνα με τον πίνακα 5.12 που ακολουθεί.

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m)  | 0.375-0.8    |
|--|--------------|
| παχος, t (m)   | 0.018-0.058  |
| βαθος αξονα αγωγου, h (m)  | 0.6-1.4      |
| γωνία τριβής, φ (°)  | 36           |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 24           |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος<br>σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)             | 2.907-21.76  |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος<br>σωληνώσεων, p <sub>u</sub> (KN/m) | 31.49-235.78 |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ<br>(mm)                                | 29.45-73.5   |
| Γωνία διάρρηξης, β (°)   | 60           |
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m)  | 3.5          |

#### Δεδομένα

Πίνακας 5.12: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF

#### Κεφάλαιο 5

#### <u>Αποτελέσματα</u>

για H/D=1.6

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu       |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|----------|
| 1   | 0.11                                | 0.129                             | 0.118                            | 0.01                    | 0.247                  | 1591     |
| 2   | 0.11                                | 0.139                             | 0.136                            | 0.002                   | 0.275                  | 1585     |
| 3   | 0.11                                | 0.148                             | 0.154                            | -0.006                  | 0.302                  | 1583     |
| 4   | 0.11                                | 0.157                             | 0.17                             | -0.013                  | 0.326                  | 1589     |
| 5   | 0.11                                | 0.169                             | 0.188                            | -0.019                  | 0.356                  | 1578     |
| 6   | 0.111                               | 0.179                             | 0.204                            | -0.024                  | 0.383                  | 1575.939 |
| 7   | 0.11                                | 0.185                             | 0.216                            | -0.031                  | 0.402                  | 1590     |
| 8   | 0.11                                | 0.196                             | 0.231                            | -0.035                  | 0.428                  | 1585     |
| 9   | 0.11                                | 0.206                             | 0.246                            | -0.04                   | 0.452                  | 1586     |

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή Η για Η/D=1.6.

## για H/D=2.2

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 0.13                                | 0.157                             | 0.106                            | 0.051                   | 0.263                  | 1342.20 |
| 2   | 0.131                               | 0.169                             | 0.122                            | 0.047                   | 0.291                  | 1330.70 |
| 3   | 0.13                                | 0.177                             | 0.139                            | 0.038                   | 0.316                  | 1343    |
| 4   | 0.129                               | 0.187                             | 0.156                            | 0.031                   | 0.343                  | 1349    |
| 5   | 0.13                                | 0.199                             | 0.172                            | 0.027                   | 0.371                  | 1343    |
| 6   | 0.129                               | 0.209                             | 0.188                            | 0.02                    | 0.397                  | 1349    |
| 7   | 0.129                               | 0.22                              | 0.204                            | 0.016                   | 0.424                  | 1349    |
| 8   | 0.129                               | 0.231                             | 0.22                             | 0.012                   | 0.451                  | 1348    |
| 9   | 0.129                               | 0.24                              | 0.234                            | 0.006                   | 0.474                  | 1355    |

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή Η για Η/D=2.2.



Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα επόμενα σχήματα.

**Σχήμα 5.14:** Γραφήμα αποτελεσμάτων αξονικής παραμόρφωσης για αλλαγή βάθους τοποθέτησης



**Σχήμα 5.15:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή βάθους τοποθέτησης





Μελετώντας την επίδραση του βάθους τοποθέτησης του αγωγού, παρατηρείται ότι η αλλαγή του βάθους τοποθέτησης για ένα συγκεκριμένο σταθερό λόγο D/t προκαλεί ελάχιστη επίδραση στις τάσεις (αξονικές) που ασκεί το ρήγμα στον αγωγό. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται από τους πίνακες αποτελεσμάτων όπου οι αξονικές παραμορφώσεις και το μήκος Lu (συνδέεται με τις αξονικές παραμορφώσεις που προκαλέι το ρήγμα) δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Το ίδιο, όμως δεν συμβαίνει και για τις τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης που παρουσιάζουν αύξηση για σταθερό λόγο D/t, γεγονός που αποδεινύει ότι το βάθος της τοποθέτησης επηρεάζει, σημαντικά, τη συμπεριφορά του αγωγού για μια σταθερή μετατόπιση ρήγματος.

## 5.3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μετατοπίση του ρήγματος μεταβάλλεται και εξετάζεται η επίδραση του έδαφους που περιβάλει τον αγωγό κατά τις διαφορετικές αυτές μετατοπίσεις. Έτσι, αντί για άμμο χρησιμοποιείται ελαφρόπετρα με ενεργό ειδικό βάρος γ=7.5 kN/m, γωνία τριβής φ=30° (δ=20°) και βάθος τοποθέτησης H=1.3m. Η μετατόπιση που επιβάλλει το ρήγμα κυμαίνεται από 1-5.5 μέτρα, με γωνία διάρρηξης 60°.Ο αγωγός φυσικού αερίου (7.5 MPa) είναι κατασκευασμένος από χάλυβα X-52, με εξωτερική διάμετρο D=0.6m και πάχος τοιχώματος t=0.0064m.

### <u>Δεδομένα</u>

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m)  | 0.6    |
|--|--------|
| πάχος τοιχώματος, t(m)   | 0.0064 |
|  |        |
| βάθος τοποθέτησης, h(m)  | 1.3    |
| γωνία τριβής, φ (°)  | 30     |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 20     |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)                | 5      |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος<br>σωληνώσεων, p <sub>u</sub> (KN/m) | 40.14  |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ (mm)                                   | 32-68  |
| Γωνία διάρρηξης, β (°)   | 60     |
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m)  | 1-5.5  |
|  |        |

#### Πίνακας 5.14: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF

#### <u>Αποτελέσματα</u>

|     | Αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>αξονική | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Ελάχιστη    | Μέγιστη     |         |
|-----|------------------------|--------------------|------------------------|-------------|-------------|---------|
| α/α | στο ρήγμα              | παραμόρφωση        | κάμψης                 | παραμόρφωση | παραμόρφωση | Lu      |
| 1   | 0.099                  | 0.198              | 0.269                  | -0.07       | 0.467       | 500.635 |
| 2   | 0.122                  | 0.276              | 0.306                  | -0.03       | 0.583       | 613.151 |
| 3   | 0.141                  | 0.328              | 0.306                  | 0.022       | 0.635       | 708.005 |
| 4   | 0.157                  | 0.373              | 0.293                  | 0.079       | 0.666       | 791.574 |
| 5   | 0.278                  | 0.428              | 0.277                  | 0.151       | 0.706       | 864.437 |
| 6   | 0.698                  | 0.711              | 0.27                   | 0.44        | 0.981       | 889.255 |
| 7   | 0.948                  | 0.961              | 0.266                  | 0.695       | 1.227       | 904.209 |
| 8   | 1.145                  | 1.158              | 0.263                  | 0.895       | 1.42        | 916.007 |
| 9   | 1.314                  | 1.326              | 0.26                   | 1.066       | 1.586       | 926.071 |
| 10  | 1.463                  | 1.475              | 0.257                  | 1.218       | 1.732       | 934.995 |

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή εδάφους.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα επόμενα σχήματα, όπου και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την ίδια περίπτωση που εξετάστηκε παραπάνω (μετατόπιση ρήγματος σε αμμώδες έδαφος).



**Σχήμα 5.17:** Γραφήμα αποτελεσμάτων αξονικής παραμόρφωσης για αλλαγή εδάφους σε διαφορετικές μετατοπίσεις



**Σχήμα 5.18:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή εδάφους σε διαφορετικές μετατοπίσεις



Σχήμα 5.19: Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή εδάφους σε διαφορετικές μετατοπίσεις

Η χρήση ελαφρόπετρας ως υλικό επίχωσης προκαλεί μικρότερες παραμόρφωσης σε σχέση με τη χρήση της άμμου, ενώ προκαλεί μεγαλύτερες τιμές στο μήκος Lu. Έτσι, η χρήση της ελαφρόπετρας καθίσταται ως πιο ευνοική για τη χρήση ως υλικού επίχωσης αφού προκαλεί ευμενέστερες, για τον αγωγό επιδράσεις, κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης.

# 5.3.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

Στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται αλλαγή στο υλικό του αγωγού με τα εδαφικά χαρακτηριστικά της άμμου. Χρησιμοποιείται χάλυβας υψηλότερης αντοχής X-65 με χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον πίνακα 5.1 και με μετατόπιση του ρήγματος να κυμαίνεται, πάλι, από 1-5.5 μέτρα

#### <u>Δεδομένα</u>

| εξωτερικη διαμετρος αγωγου, d (m) | 0.6    |
|-----------------------------------|--------|
| παχος, t (m)                      | 0.0064 |

| βαθος αξονα αγωγου, h (m)  | 1.3    |
|--|--------|
| γωνία τριβής, φ (°)  | 36     |
| γωνία τριβής εδάφους αγωγού, δ (°)                                       | 24     |
| Δύναμη τριβής ανά μήκος σωληνώσεων, t <sub>u</sub> (KN/m)                | 13.86  |
| Εγκάρσια οριζόντια δύναμη ανά μήκος σωληνώσεων, p <sub>u</sub><br>(KN/m) | 160.89 |
| Εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση, ΔΡ (mm)                                   | 64     |
| Γωνία διάρρηξης, β (°)   | 60     |
| Μετατόπιση ρήγματος, δf (m)  | 1-5.5  |

# Πίνακας 5.16: Δεδομένα για το πρόγραμμα SSF

## <u>Αποτελέσματα</u>

| α/α | Αξονική<br>παραμόρφωση<br>στο ρήγμα | Μέγιστη<br>αξονική<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση<br>κάμψης | Ελάχιστη<br>παραμόρφωση | Μέγιστη<br>παραμόρφωση | Lu      |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------|
| 1   | 0.165                               | 0.783                             | 0.869                            | -0.086                  | 1.653                  | 300.694 |
| 2   | 0.203                               | 0.961                             | 0.892                            | 0.068                   | 1.853                  | 368.274 |
| 3   | 0.955                               | 1.059                             | 0.862                            | 0.196                   | 1.921                  | 400.469 |
| 4   | 1.486                               | 1.519                             | 0.844                            | 0.675                   | 2.363                  | 410.426 |
| 5   | 1.873                               | 1.905                             | 0.83                             | 1.075                   | 2.736                  | 417.725 |
| 6   | 2.193                               | 2.226                             | 0.819                            | 1.407                   | 3.045                  | 423.775 |
| 7   | 2.473                               | 2.505                             | 0.809                            | 1.696                   | 3.315                  | 429.058 |
| 8   | 2.725                               | 2.757                             | 0.801                            | 1.956                   | 3.558                  | 433.807 |
| 9   | 2.956                               | 2.987                             | 0.793                            | 2.194                   | 3.78                   | 438.157 |
| 10  | 3.17                                | 3.201                             | 0.786                            | 2.415                   | 3.987                  | 442.196 |

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για αλλαγή υλικού αγωγού.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα επόμενα σχήματα, όπου και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την ίδια περίπτωση που εξετάστηκε παραπάνω (μετατόπιση ρήγματος για αγωγό X-52):



**Σχήμα 5.20:** Γραφήμα αποτελεσμάτων αξονικής παραμόρφωσης για αλλαγή εδάφους σε διαφορετικές μετατοπίσεις



**Σχήμα 5.21:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μέγιστης παραμόρφωσης για αλλαγή εδάφους σε διαφορετικές μετατοπίσεις



**Σχήμα 5.22:** Γραφήμα αποτελεσμάτων μήκους Lu για αλλαγή εδάφους σε διαφορετικές μετατοπίσεις

Η χρήση αγωγού από χάλυβα X-65 προκαλεί μικρότερες παραμόρφωσεις σε σχέση με τη χρήση αγωγού X-52 για διαφορετικές τιμές μετατόπισης, ενώ προκαλεί μεγαλύτερες τιμές στο μήκος Lu. Έτσι, η χρήση του αγωγού X-65 καθίσταται ως πιο ευνοική αφού προκαλεί ευμενέστερες, για τον αγωγό επιδράσεις, κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης.

# 5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων σε αγωγούς φυσικού αερίου εξαιτίας της διάρηξης σεισμικού ρήγματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SSF το οποίο είναι αξιόπιστο και ιδιαίτερα εύχρηστο, ακόμα και στο χρήστη που δεν εξοικοιωμένος με πολύπλοκα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, για την περίπτωση που ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης διασταυρώνεται με μια υπόγεια σωλήνωση αγωγών φυσικού αερίου. Τα αποτελέσματα που έδωσε το λογισμικό είναι σε επίπεδα παραμόρφωσης (%) και δίνουν μια πρώτη εικόνα για τις παραμόρφωσεις που προκαλεί μια μετατόπιση ενός ρήγματος σε ένα αγωγό κατασκευασμένο από χάλυβα. Στην παραμετρική διερέυνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάσθηκε η επίδραση των βασικότερων παραμέτρων του επηρεάζουν την απόκριση μιας σωλήνωσης κατά τη μετατόπιση ενός ρήγματος. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα αποτελέσματα διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Η χωροθέτηση της σωλήνωσης πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να σχηματίζονται μεγάλες γωνίες τομής μεταξύ του αγωγού και του ρήγματος, αφού μεγάλες γωνίες τομής β προκαλούν μείωση στις μέγιστες παραμόρφώσεις.
- Η αύξηση στις τιμές της μετατόπισης δf (για σταθερή γωνία β) δημιουργεί πολύ μεγάλες μέγιστες παραμορφώσεις στον αγωγό που εξετάστηκε και οδηγούν στη θραύση για την περίπτωση πολύ μεγάλων μετατατοπίσεων.
- Η αύξηση στην διάμετρο του αγωγού (με σταθερό λόγο D/t) οδηγεί σε αύξηση των μέγιστων παραμορφώσεων. Από τους τρείς λόγους D/t που εξετάστηκαν, ο λόγος D/t=15 έδωσε τις πιο χαμηλές τιμές μέγιστης παραμόρφωσης για την αύξηση της διαμέτρου. Γι'αυτό πρέπει να προτιμάται μικρή τιμή διαμέτρου στον αγωγό και με χαμηλό λόγο D/t.
- Η αύξηση του πάχους τοιχώματος (με σταθερή διάμετρο) οδηγεί σε μείωση των μέγιστων παραμορφώσεων και καθιστά τον αγωγό πιο ανθεκτικό σε ενδεχόμενη μετατόπιση ρήγματος.
- Η αύξηση του βάθους τοποθέτησης (σταθερός λόγος Η/D) οδηγεί σε αύξηση στη μέγιστη παραμόρφωση που προκαλεί το ρήγμα στον αγωγό. Γι' αυτό ο αγωγός πρέπει να τοποθετείται σε μικρό βάθος κάτω από το έδαφος.
- Η χρήση της ελαφρόπετρας ως υλικό επίχωσης όπως επίσης και του υλικού χάλυβα Χ-65 για τον αγωγό, προκαλούν ευμενέστερες επιδράσεις στη σωλήνωση και πρέπει να προτιμώνται κατά την κατασκευή ενός υπόγειου δικτύου.

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη χρήση του λογισμικού SSF στο πλαίσιο της παρούσας παραμετρικής διερεύνησης, προφανώς δεν μπορούν να αποτελέσουν κάποιο γενικό κανόνα για τη συμπεριφορά κάθε τύπου υπόγειας σωλήνωσης και για κάθε είδος μόνιμων μετατοπίσεων. Παρόλα αυτά, δίνουν τη δυνατότητα για μια αξιόπιστη εκτίμηση της επίδρασης των κυριότερων γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων του αγωγού, καθώς και των παραμέτρων που αφορούν το ρήγμα και το περιβάλλον εδαφικό υλικό, στη σεισμική τρωτότητα υπόγειων δικτύων φυσικού αερίου σε μια ενδεχόμενη μετατόπιση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Ειδικά, εάν ληφθεί υπόψη ότι ένα τέτοιο ενδεχόμενο αποτελεί μία από τις δυσμενέστερες περιπτώσεις σεισμικής καταπόνησης και αστοχίας των δικτύων υποδομής και άλλων μεγάλων τεχνικών έργων γενικότερα.

- 1. American Department of Energy. LNG: Understanding the Basics. http://www.fosil.energy.com, 2005.
- 2. ASCE-American Lifelines Alliance. Seismic Design and Retrofit of Piping Systems, July 2002.
- ASCE-American Lifelines Alliance.Seismic Guidelines for Water Pipelines, March 2005.
- 4. ASCE-California Seismic Safety Commission. Improving Natural Gas Safety in Earthquakes, http://www.seismic.ca.gov/pub/CSSC, July 2002.
- Bouckovalas G et al. Stress analysis of buried steel pipelines at strike- slip fault crossings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 200-211, 2007.
- Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology Kanpur Kanpur, Uttar Pradesh, INDIA. Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines. Review of Building Codes and Preparation of Commentary and Handbooks, July 2007.
- ΕΡΑ, Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ. Συμπλήρωμα Α, Κατάλογος Εκπεμπόμενων στον Αέρα Ρυπαντών, Οκτώβριος 1986.
- 8. Flores Berrones and Liu. Seismic vulnerability of buried pipelines. Geofísica Internacional Vol. 42, 237-246, 2003.
- Hashash et al.Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology 16, 247-293, 2001.
- 10. Hwang H. et al. Analysis of Damage to Steel Gas Pipelines Caused by Ground Shaking Effects during the Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. Earthquake Spectra Vol.20, 1095-1110, 2004.
- 11. Le Val Lund et al. Lifelines. Earthquake Spectra, 11, 1995.
- 12. Natural Gas. Secondary Energy Book, 2007.
- 13.O'Rourke MJ and Liu X. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects. MCEER Monograph Series, 1999.

- 14.RMS (Risk Management Solution). Event Report: Chi- Chi, Taiwan Earthquake, http://www.rms.com/Publications/Taiwan\_Event, 2000.
- 15.RMS (Risk Management Solution). The Northridge, California Earthquake. RMS 10-year Retrospective, http://www.rms.com/Publications, May 2004.
- 16.Schiff AJ et al. Lifeline Performance. Earthquake Spectra, 17, 153-172, 2001.
- 17. Takada S, Hassani N and Fukuda K. A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1243-1257, 2001.
- 18. Tsai Y and Hwang M-W. Strong Ground Motion Characteristics of the Chi-Chi, Taiwan Earthquake of September 21, 1999.
- Wang, Yeh. A Refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol 13, 75-96,1985.
- 20. ΔΕΠΑ (Δημόσια Επιχείρηση Πετρελάιου Αττικής). http://www.depa.gr, Φεβρουάριος 2008.
- 21. Μπουκοβάλας Γ. Αντισεισμικός Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων. http://users.civil.ntua.gr/gbouck/site/index, Μάρτιος 2008.
- 22. PAE (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας). http://www.rae.gr, Ιανουάριος 2008.