



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση:** Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ  
ΑΓΩΓΩΝ ΥΠΟ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ  
ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΡΗΓΜΑΤΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ  
ΓΕΩΡΓΟΚΙΤΣΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΠΕΛΟΠΙΔΑ**





**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ  
ΑΓΩΓΩΝ ΥΠΟ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ  
ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΡΗΓΜΑΤΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ  
ΓΕΩΡΓΟΚΙΤΣΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΠΕΛΟΠΙΔΑ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Καθηγητής Ιωάννης Τσομπανάκης (Επιβλέπων), Π.Κ.

Καθηγητής Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Π.Κ.

Δρ. Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, Ε.Μ.Π.

**ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024**

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή της προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.»



## Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα πρώτον απ' όλους να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Διονύση Χατζηδάκη για την πολύτιμη βοήθεια και τις οδηγίες του.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη και τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στην οικογένεια μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και όλο το διάστημα των σπουδών μου.

## Περίληψη

---

Μία από τις μεγάλες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα είναι αδιαμφισβήτητο το ενεργειακό ζήτημα, καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται συνεχώς, μειώνοντας ταυτόχρονα τα αποθέματα υδρογονανθράκων και επιβαρύνοντας ολοένα και περισσότερο τον πλανήτη. Τα πρώτα δίκτυα αγωγών εμφανίστηκαν στις αρχές του 20ου αιώνα με σκοπό τη μεταφορά των υδρογονανθράκων σε μεγάλες αποστάσεις. Σήμερα υπάρχουν μεγάλα δίκτυα αγωγών παγκοσμίως, κυρίως φυσικού αερίου, που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις στη στεριά και στη θάλασσα. Για τη μεταφορά φυσικού αερίου υπό συνθήκες υψηλή πίεσης με ασφάλεια εφορμίζεται κατάλληλο κανονιστικό και ρυθμιστικό πλαίσιο. Επιπροσθέτως, η επιλογή της βέλτιστης χάραξης ενός αγωγού μεγάλης κλίμακας προϋποθέτει εκτενή έρευνα σχετικά με τα γεωλογικά/γεωτεχνικά, σεισμικά, κ.α. χαρακτηριστικά της περιοχής διέλευσης του έτσι ώστε να εξασφαλιστεί τόσο η ασφαλής λειτουργία του αγωγού, αλλά και για να ελαχιστοποιηθεί η διακινδύνευση για τον πληθυσμό και το περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής διέλευσης.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι ενδεχόμενες βλάβες και διαρροές είναι ιδιαίτερα δυσμενείς, τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Παρόλο που η τεχνολογία και η κατασκευαστική πρακτική εξελίσσονται, ορισμένοι παλαιότεροι αγωγοί δεν πληρούν τα σύγχρονα κανονιστικά κριτήρια, ενώ σε κάποιους από αυτούς παρατηρούνται κατασκευαστικά λάθη και γήρανση που μπορούν να επηρεάσουν την ασφαλή λειτουργία τους. Προφανώς, ένας αγωγός οφείλει να πληροί όλα τα απαραίτητα κριτήρια και να συμμορφώνεται με τους ισχύοντες κανονισμούς, με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης βλαβών κατά την κατασκευή και τη λειτουργία του σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Γι' αυτόν τον σκοπό, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν όλες οι απαραίτητες μελέτες ώστε να εντοπιστούν και να αποτιμηθούν πλήρως όλοι οι ανθρωπογενείς και φυσικοί κίνδυνοι, με έμφαση σε όσους σχετίζονται με τη σεισμική καταπόνηση των αγωγών.

Οι μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις οι οποίες προκαλούνται εξαιτίας της διάρρηξης σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων ευθύνονται για έναν σημαντικό αριθμό αστοχιών αγωγών. Συνεπώς, είναι απαραίτητο σε περιοχές που υπάρχουν σεισμικά ρήγματα να γίνεται ένας πλήρης αντισεισμικός σχεδιασμός έτσι ώστε ο αγωγός να μπορέσει να ανταπεξέλθει σε ενδεχόμενη διασταύρωση με κύρια, αλλά και με δευτερογενή ρήγματα. Με βάση τις απαιτούμενες γεωλογικές έρευνες, τα κύρια ρήγματα μπορούν να εντοπισθούν και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να αποφευχθούν με τον σχεδιασμό μιας εναλλακτικής διαδρομής του αγωγού. Όμως, πλησίον της κύριας διάρρηξης συχνά μπορεί να δημιουργηθούν αρκετές σημαντικές δευτερογενείς διαρρήξεις, οι οποίες μπορεί να μην είχαν αξιολογηθεί επαρκώς και ο αγωγός να τις διασχίζει με ότι αυτό συνεπάγεται για τη διακινδύνευση του, σε επίπεδα ακόμα και ανάλογα με τη διασταύρωση του με το κύριο ρήγμα. Στη σχετική βιβλιογραφία, οι μελέτες για τις δευτερογενείς διαρρήξεις είναι πολύ λιγότερες από τις αντίστοιχες για τις κύριες, ενώ είναι ακόμα λιγότερες οι σχετικές μελέτες για την ταυτόχρονη εξέταση της διάρρηξης κύριου και δευτερογενούς ρήματος.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η παραμετρική διερεύνηση

της καταπόνησης ενός μεταλλικού αγωγού φυσικού αερίου εξαιτίας της ενδεχόμενης διασταύρωσης του με δευτερογενές ρήγμα (το οποίο τέμνει κάθετα το κύριο ρήγμα) στην προσπάθεια αποφυγής της κύριας διάρρηξης. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η επίδραση των βασικών παραμέτρων του προβλήματος στις εδαφικές μετατοπίσεις και συνεπακόλουθα στις θλιπτικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις του αγωγού. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που θα προέκυπταν από τη διασταύρωση του αγωγού με την κύρια διάρρηξη για τις περιπτώσεις κανονικού και ανάστροφου κύριου ρήγματος, καθώς και για την πιο σύνθετη περίπτωση κύριου ρήγματος λοξής μετατόπισης.



## Abstract

---

Energy is undoubtedly one of the major issues for modern societies, as energy demands are constantly increasing, while the available resources are reduced and the adverse environmental impact on the planet is increased. The first pipeline networks that were used to transport hydrocarbons over large distances were constructed at the beginning of the 20th century. Nowadays, large-scale pipelines, mainly for the transportation of natural gas under high pressure, can be found worldwide, both onshore and offshore. Therefore, it is imperative to establish efficient design guidelines and functioning regulations to ensure their safe operation. In addition, optimal route selection of such large-scale networks requires extensive research of the wider region to collect geological, geotechnical, seismological, etc. data in order to ensure the safe operation of the pipeline and to minimize the risk to population and the environment.

It is evident that potential damages can be particularly detrimental, both in environmental and financial terms. Although technology and construction practice are constantly upgraded, some of the existing pipelines do not fulfill contemporary design criteria, while construction defects and aging can deteriorate their safe operation. Accordingly, a pipeline must comply with existing regulations in order to minimize the probability of potential damages during its construction and operation within the whole life-cycle of the project. For this purpose, all necessary studies should be performed in order to identify and fully assess the impact of man-made and natural hazards, emphasizing on earthquake-related hazards and the consequent distress of the pipelines.

Permanent ground displacements due to the rupture of seismotectonic faults have caused many pipeline failures. Hence, in areas with large seismic faults it is necessary to carry out a holistic aseismic design so that the pipeline can withstand substantial soil deformations due to its potential intersection with the main as well as secondary faults. Typically, after the necessary geological investigations, the main faults can be identified and, in some cases, avoided by selecting an alternative pipeline routing. However, several significant secondary faults can often occur in the proximity of the main fault. This hazard may not have been adequately assessed; thus, the pipeline may cross a secondary fault and can be exposed to a substantial risk, even analogous to the risk of crossing the main fault. In the relevant literature the studies on secondary ruptures are less compared to the ones for main ruptures, while they are even more limited regarding the simultaneous rupture of main and secondary faults.

The aim of the present diploma thesis is to investigate the response of a natural gas steel pipeline when crossing a secondary fault (aligned vertically to the main fault) in an attempt to avoid the main rupture. For this purpose, a detailed parametric investigation has been performed to assess the impact of the main parameters of the problem on the soil deformations and consequently on compressive and tensile strains of the pipeline. The obtained results are compared with those referring to the pipeline route crossing through the main rupture for the

cases of normal and reverse main faults, as well as for the more complex case of oblique slip main fault rupture.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	i
Περίληψη .....	ii
Abstract .....	iv
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>Γενικά Χαρακτηριστικά Αγωγών Μεταφοράς Υδρογονανθράκων .....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Ορισμοί .....	2
1.2.1 Αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων .....	2
1.2.2 Υδρογονάνθρακες .....	5
1.2.3 Πετρέλαιο .....	6
1.2.4 Φυσικό Αέριο .....	8
1.2.5 Παγκόσμια Αποθέματα και Κατανάλωση Υδρογονανθράκων .....	9
1.2.6 Γεωκίνδυνοι .....	11
1.2.7 Σεισμικοί Γεωκίνδυνοι .....	14
1.2.8 Άλλοι Κίνδυνοι .....	18
1.3 Αγωγοί στη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου .....	20
1.3.1 Αγωγός EastMed .....	20
1.3.2 Διαδριατικός Αγωγός Trans Adriatic Pipeline (TAP) .....	21
1.3.3 Αγωγός Φυσικού Αερίου Ανατολίας TANAP .....	22
1.3.4 Αγωγός South Stream .....	22
1.3.5 Αγωγός Νοτίου Καυκάσου South Caucasus Pipeline .....	23
1.3.6 Αγωγός Φυσικού Αερίου Ελλάδος – Βορείου Μακεδονίας .....	23
1.3.7 Διασυνδετήρας Αγωγός Ελλάδας – Βουλγαρίας (IGB) .....	24
1.3.8 Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου ΔΕΣΦΑ .....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>27</b>
<b>Κανονιστικές Οδηγίες Αγωγών .....</b>	<b>27</b>
2.1 Ρυθμιστικά Πλαίσια σε Ελλάδα & Ευρώπη .....	27
2.2 Αλληλεπίδραση Αγωγού - Εδάφους .....	29
2.3 Αντίσταση Εδάφους .....	32
2.4 . Μέτρα Προστασίας .....	32
2.5 Κριτήρια Αστοχίας .....	35
2.5.1 Συνήθεις Μηχανισμοί Αστοχίας σε θαμμένους, συνεχείς χαλύβδινους αγωγούς .....	41

2.6	Χάραξη Αγωγών .....	45
2.6.1	Περιγραφή της διαδικασίας για την επιλογή της διαδρομής .....	46
2.6.2	Περιγραφή φάσεων υλοποίησης έργου .....	46
2.6.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τη χάραξη και κριτήρια επιλογής της βέλτιστης διαδρομής του αγωγού. ....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>		<b>50</b>
<b>Σεισμικά Ρήγματα .....</b>		<b>50</b>
3.1	Ορισμοί Ρήγματος.....	50
3.2	Τύποι Ρηγμάτων.....	51
3.3	Κύρια Ρήγματα.....	55
3.4	Δευτερογενή Ρήγματα.....	56
3.5	Ρήγματα και Αγωγοί .....	58
3.5.1	Χαρακτηριστικοί τύποι βλαβών σε αγωγούς λόγω θραύσης ρήγματος.....	60
3.5.2	Παραδείγματα αστοχιών σε δίκτυα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων λόγω σεισμικού ρήγματος .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>		<b>65</b>
<b>Αριθμητική προσομοίωση αγωγού υπό κινηματική καταπόνηση λόγω δευτερεύοντος ρήγματος.....</b>		<b>65</b>
4.1	Εισαγωγή .....	65
4.2	Περιγραφή αριθμητικών προσομοιωμάτων .....	66
4.2.1	Αριθμητικό προσομοίωμα Εδάφους.....	66
4.2.2	Αριθμητικό προσομοίωμα αγωγού.....	69
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>		<b>71</b>
<b>Σύγκριση αριθμητικών Προσομοιωμάτων με Πειραματικά Δεδομένα.....</b>		<b>71</b>
5.1	Αριθμητικό Προσομοίωμα Εδάφους .....	71
5.2	Αριθμητικό Προσομοίωμα Αγωγού .....	74
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>		<b>76</b>
<b>Παραμετρική Ανάλυση Αγωγού υπό Κινηματική Καταπόνηση λόγω Δευτερογενούς Ρήγματος.....</b>		<b>76</b>
6.1	Κανονικό Κύριο Ρήγμα .....	79
6.1.1	Διατομή Αγωγού .....	80
6.1.2	Επικάλυψη Αγωγού .....	82
6.1.3	Βάθος Επίχωσης Αγωγού.....	83
6.1.4	Τύπος Χάλυβα Αγωγού .....	85
6.2	Ανάστροφο Κύριο Ρήγμα .....	86

6.2.1	Διατομή Αγωγού .....	88
6.2.2	Επικάλυψη Αγωγού .....	89
6.2.3	Βάθος Επίχωσης Αγωγού .....	91
6.2.4	Τύπος Χάλυβα Αγωγού .....	92
6.3	Ρήγμα Λοξής Μετατόπισης .....	94
6.3.1	Διατομή Αγωγού .....	97
6.3.2	Επικάλυψη Αγωγού .....	102
6.3.3	Βάθος Επίχωσης .....	107
6.3.4	Τύπος Χάλυβα .....	112
6.4	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	117
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....</b>		<b>119</b>
<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....</b>		<b>119</b>
7.1	Συμπεράσματα από την Αριθμητική Διερεύνηση .....	119
7.2	Γενικά Συμπεράσματα .....	120
7.3	Μελλοντικές Προεκτάσεις .....	121
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 .....</b>		<b>123</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>123</b>
8.1	Ελληνική Βιβλιογραφία .....	123
8.2	Διεθνής Βιβλιογραφία .....	124
8.3	Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία .....	125



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Γενικά Χαρακτηριστικά Αγωγών Μεταφοράς Υδρογονάνθρακων

---

### 1.1 Εισαγωγή

Από την αρχή της εμφάνισης του στη Γη, ο άνθρωπος έμαθε να αξιοποιεί τα υλικά που υπήρχαν γύρω του προς όφελος του. Με το πέρασμα του χρόνου αυξήθηκαν οι γνώσεις σχετικά με τις διάφορες χρήσεις των υλικών αυτών όπως επίσης και οι ανάγκες των ανθρώπων. Τα τελευταία χρόνια συναντάται όλο και συχνότερα ο όρος «υδρογονάνθρακες» με τη χρήση τους ως πηγή ενέργειας, να αυξάνεται σε τεράστιο βαθμό. Οι υδρογονάνθρακες είναι ένα αρκετά ευρύ φάσμα χημικών ενώσεων που αποτελούνται από άνθρακα και υδρογόνο. Αυτές οι ενώσεις, έχουν σημαντική αξία ως πηγές ενέργειας, καθώς χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση κ.α. Οι πιο γνωστοί υδρογονάνθρακες είναι το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και ο άνθρακας.

Σήμερα, οι υδρογονάνθρακες ως υλικά, είναι απαραίτητοι στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων, καθώς χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ως καύσιμα για οχήματα και θέρμανση κτιρίων. Επίσης, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πλαστικών, φαρμάκων, καλλυντικών και άλλων χημικών προϊόντων. Ως πηγή ενέργειας, έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ευρεία διαθεσιμότητα, ευελιξία στη χρήση και σχετικά σταθερή τιμή, στοιχεία που τους κάνουν να υπερτερούν σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας.

Είναι κοινώς αποδεκτό, ότι ο πλέον ασφαλής γρήγορος και οικονομικός τρόπος μεταφοράς τους, είναι μέσω αγωγών. Μεγάλα δίκτυα έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια, τα οποία είναι ικανά να μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, με αρκετά μικρότερο (από εναλλακτικές μεθόδους) κόστος και με τη μεγαλύτερη ασφάλεια. Η μεταφορά μέσω αγωγών δεν ήταν άγνωστη στην αρχαιότητα, με πολλούς πολιτισμούς να κάνουν δοκιμές, ώστε να κατασκευάσουν ένα τέτοιο δίκτυο. Φυσικά τα υλικά που χρησιμοποιούσαν οι πολιτισμοί εκείνοι, διέφεραν αρκετά με αυτά των σύγχρονων κατασκευών, Παρ' όλα αυτά σύμφωνα με αναφορές, η αποτελεσματικότητά τους ήταν μεγάλη.

Ειδικότερα στις περιπτώσεις των δικτύων που εκτείνονται για πολλά χιλιόμετρα, χρειάζεται ένας σωστός σχεδιασμός ως προς την επιλογή της διαδρομής του αγωγού και μια σωστή μελέτη των χαρακτηριστικών του εδάφους αυτής της διαδρομής.

Οι αγωγοί ενός τέτοιου δικτύου μπορούν να παρουσιάσουν βλάβες για διάφορους λόγους, με συνηθέστερους τις κατολισθήσεις, τη μετακίνηση του εδάφους λόγω της διέλευσης μέσω ή κοντά σε περιοχή σεισμικού ρήγματος, τους βανδαλισμούς καθώς και τις αστοχίες λόγω εσφαλμένης λειτουργίας ή κακής κατασκευής.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η σωστή σχεδίαση και πρόβλεψη καθώς και η πλήρης συμμόρφωση με κανονισμούς μπορούν να αποτρέψουν ή έστω να περιορίσουν σημαντικά, ζημιές που θα οδηγούσαν σε ανυπολόγιστες καταστροφές περιβαλλοντικού και οικονομικού χαρακτήρα, καθώς και την απώλεια ανθρώπινων ζωών.

## **1.2 Ορισμοί**

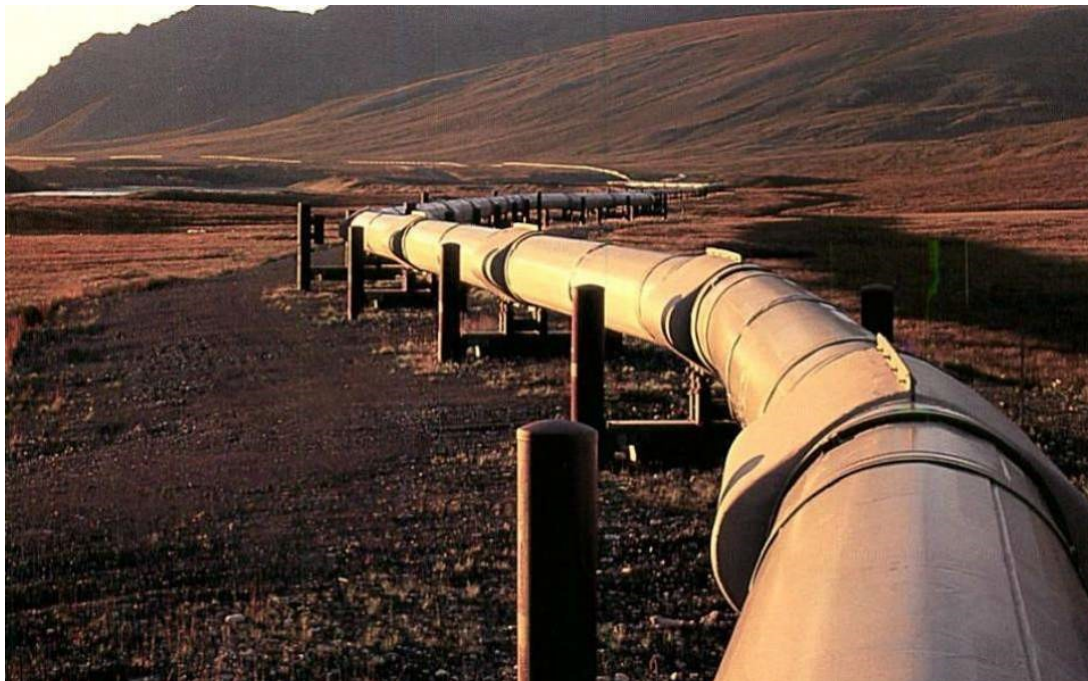
Δεδομένου ότι συχνά, παρατηρείται σύγχυση στις ορολογίες, θεωρείται χρήσιμο να παρατεθούν κάποιοι ορισμοί, οι οποίοι αφορούν τα δίκτυα αγωγών υδρογονανθράκων καθώς και για τα μεταφερόμενα προϊόντα.

### **1.2.1 Αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων**

Η λέξη αγωγός προέρχεται από το αρχαίο ελληνικό ρήμα ἄγω το οποίο σημαίνει οδηγώ. Ως αγωγός, ορίζεται κάθε διάταξη μέσω της οποίας μεταγεται, δηλαδή μεταφέρεται, κάτι. Το που κατασκευάστηκαν οι πρώτοι αγωγοί, είναι αρκετά δύσκολο να απαντηθεί. Υπάρχουν αναφορές για την ύπαρξη ορισμένων, στην αρχαία Κίνα το 400 π.Χ. οι οποίοι ήταν φτιαγμένοι από μπαμπού. Σκοπός αυτών των αγωγών ήταν η μεταφορά κυρίως πετρελαίου (που ήταν ήδη γνωστό στην Κίνα και χρησιμοποιούταν, από το 600 π.Χ.). Οι αγωγοί εμφανίζονταν και σε άλλους αρχαίους πολιτισμούς όπως την Αίγυπτο, την Μεσοποταμία την Αρχαία Ελλάδα και την Αρχαία Ρώμη, με κύρια υλικά κατασκευής την πέτρα ή τον πηλό. Στην Αίγυπτο υπάρχουν αναφορές για έναν μεγάλου μήκους αγωγό, κατασκευασμένο από δέρμα βοδιού για υδροδότηση. (Lawal , 2010).

Στη σύγχρονη ιστορία, οι πρώτοι αγωγοί μεταφοράς κατασκευάζονταν συνήθως από χάλυβα ή μαύρο σίδηρο, λόγω της ικανότητάς τους να αντέχουν στην πίεση και το βάρος των υλικών που μεταφέρονταν. Το 19ο αιώνα οι αδερφοί Νόμπελ κατασκεύασαν τον πρώτο αγωγό μεταφοράς πετρελαίου στη περιοχή του Μπακού. Στα τέλη του 19ου αιώνα και τις αρχές του 20ού αιώνα, χρησιμοποιήθηκαν υλικά όπως ο ασβεστοσίδηρος, για την κατασκευή αγωγών μεταφοράς. Στα μέσα του 20ού αιώνα, ξεκίνησε να γίνεται χρήση κι άλλων υλικών, όπως το πλαστικό ο πολυθερίτης και η υαλοίνη, υλικά αρκετά φθηνότερα, ελαφρύτερα και ανθεκτικότερα σε ορισμένες καταστάσεις. Σήμερα η πλειοψηφία των αγωγών κατασκευάζεται από χάλυβα, ενώ το πλαστικό χρησιμοποιείται για κατασκευή αρκετά μικρότερων αγωγών (ή τμημάτων αυτών).





**Εικόνα 1.1:** Τμήμα χαλύβδινου, χερσαίου αγωγού  
Πηγή: Εφημερίδα Καθημερινή 04/07/18

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια τεράστια αύξηση στην κατασκευή αγωγών με σκοπό τη μεταφορά υδρογονανθράκων. Δίκτυα τέτοιων αγωγών εξαπλώνονται συνεχώς πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η αυξημένη κατασκευή και χρήση τους, οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε χημική ουσία, ακόμα και μείγμα τέτοιων ουσιών είναι δυνατό να μεταφερθεί μέσω δικτύου αγωγών, αν φυσικά μπορεί να κατασκευαστεί ένα τέτοιο δίκτυο. Οι αγωγοί μπορούν να μεταφέρουν αγαθά, όπως για παράδειγμα το νερό, αλλά και υλικά διαφόρων μορφών ενέργειας. Μέσω αγωγών είναι δυνατό να μεταφέρονται εύφλεκτα ή εκρηκτικά υλικά όπως παραδείγματος χάριν το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο, με μεγάλη ασφάλεια και ταχύτητα ακόμη και σε τεράστιες αποστάσεις. Το 2014, το συνολικό μήκος αγωγών πάνω στη Γη σε περίπου 120 χώρες, έφτανε τα 3.5 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Οι Ηνωμένες Πολιτείες κατείχαν το μεγαλύτερο κομμάτι (περίπου το 65%) με τη Ρωσία και το Καναδά να ακολουθούν με ποσοστά 8% και 3% αντίστοιχα.

Σήμερα, οι αγωγοί χρησιμοποιούνται ευρέως ως μέσο για τη μεταφορά υδρογονανθράκων και των υποπροϊόντων τους. Κατά μήκος της διαδρομής μεταφοράς, υπάρχουν ουσιαστικά τρεις κύριοι τύποι αγωγών :

- συστήματα συλλογής
- συστήματα μεταφοράς
- συστήματα διανομής.

Τα συστήματα αγωγών συλλογής συγκεντρώνουν το ακατέργαστο φυσικό αέριο από τις διάφορες πηγές παραγωγής. Τα συστήματα αγωγών μεταφοράς, μεταφέρουν το φυσικό αέριο σε πολλά μέρη μερικές φορές σε αποστάσεις χιλιάδων μιλίων όπως συμβαίνει και στις πιο ηπειρωτικές περιοχές των Ηνωμένων

Πολιτειών. Τέλος, τα συστήματα διανομής είναι υπεύθυνα να παραδώσουν το προϊόν στον καταναλωτή.

Η διάμετρος των σωλήνων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αγωγών φυσικού αερίου ποικίλλει από 2 έως 42 ίντσες. Οι γραμμές παροχής φυσικού αερίου έχουν μικρότερη διάμετρο σωλήνα, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 0.5 έως 2 ίντσες. Οι σωλήνες των συστημάτων συλλογής και μεταφοράς, είναι κατασκευασμένες από χάλυβα, ενώ οι αντίστοιχοι σωλήνες του συστήματος διανομής είναι διαφόρων υλικών όπως λόγου χάρη χυτοσίδηρος, πλαστικό, χάλυβας και χαλκός. Το πλαστικό χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια πολύ συχνότερα για την κατασκευή σωλήνων διανομής. (Lawal, 2010).



**Εικόνα 1.2:** Τοποθέτηση των σωλήνων φυσικού αερίου για τον αγωγό Nordschwarzwald στη Γερμανία. Πηγή: FNB GAS



**Εικόνα 1.3:** Πλοίο, υπεύθυνο για την τοποθέτηση αγωγών φυσικού αερίου στη Μαύρη Θάλασσα. Πηγή: Phmsa

### 1.2.2 Υδρογονάνθρακες

Οι υδρογονάνθρακες είναι μια ομάδα ενώσεων, που όπως μαρτυρά και το όνομά τους αποτελούνται αποκλειστικά από άτομα υδρογόνου και άνθρακα (H και C). Η δημιουργία τους, έχει αποδοθεί σε διαδικασίες αποσύνθεσης φυτικών και ζωικών οργανικών υλών, οι οποίες βρίσκονται εγκλωβισμένες σε ιζηματογενή πετρώματα.

Το πέτρωμα από το οποίο προέρχονται οι φυσικοί υδρογονάνθρακες το ονομάζουμε «μητρικό πέτρωμα» και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, είναι αργιλώδους σύστασης. Οι υδρογονάνθρακες «μετακινούνται» από το πέτρωμα αυτό προς την επιφάνεια, συνήθως λόγω πιέσεων που δημιουργούνται ή θερμοκρασιακών μεταβολών που αναπτύσσονται, ενώ άλλες φορές λόγω τεκτονικών φαινομένων ή εξαιτίας των δράσεων υπογείων υδάτων.

Οι υδρογονάνθρακες μπορούν να χωριστούν σε ποικίλλες κατηγορίες. Για παράδειγμα υπάρχουν οι κορεσμένοι και οι ακόρεστοι, με βάση τον τρόπο σύνδεσης των ατόμων του άνθρακα. Ακόρεστοι ονομάζονται εκείνοι που τουλάχιστον δύο εκ των ατόμων άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους με έναν διπλό ή έναν τριπλό δεσμό. Την ονομασία κορεσμένοι έχουν αυτοί στους οποίους όλα τα άτομα άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους με έναν απλό δεσμό.

Με βάση τη μορφή της ανθρακικής αλυσίδας, χωρίζονται σε κυκλικούς και μη. Στην περίπτωση των κυκλικών υδρογονανθράκων τα άτομα άνθρακα σχηματίζουν κλειστές αλυσίδες τους λεγόμενους δακτυλίους, ενώ στην περίπτωση των μη κυκλικών οι σχηματιζόμενες αλυσίδες είναι ανοιχτές και τα άτομα του άνθρακα, ή είναι διατεταγμένα στη σειρά, ή διακλαδίζονται. Μια άλλη βασική ταξινόμηση τους κατατάσσει σε υγρούς, αέριους και στερεούς. Το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι οι πιο γνωστοί υδρογονάνθρακες.

Οι υδρογονάνθρακες υπερτερούν σε σχέση με τις άλλες πηγές ενέργειας για διάφορους λόγους:

- Έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Δηλαδή περιέχουν πολλή ενέργεια ανά μονάδα βάρους ή όγκου. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να μεταφερθούν αλλά και να αποθηκευτούν με μεγάλη ευκολία.
- Έχουν μεγάλη ευελιξία στη χρήση. Δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές όπως για παράδειγμα θέρμανση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κίνηση, κ.α.
- Έχουν ευρεία διαθεσιμότητα. Οι υδρογονάνθρακες είναι διαθέσιμοι σε πολλά μέρη του κόσμου.
- Υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες. Είναι οι πιο κοινές πηγές ενέργειας παγκοσμίως και βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες στο έδαφος, στο υπέδαφος και στον ωκεανό.
- Είναι εύκολα προσβάσιμοι. Οι υδρογονάνθρακες είναι εύκολα προσβάσιμοι στον ανθρώπινο πολιτισμό και η εξόρυξη τους όπως και η μεταφορά τους είναι λιγότερο πολύπλοκες από τις αντίστοιχες άλλων πηγών ενέργειας.
- Είναι οικονομικοί. Σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας, όπως η πυρηνική ή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι υδρογονάνθρακες είναι σχετικά οικονομικότεροι.

### 1.2.3 Πετρέλαιο

Το πετρέλαιο ανήκει σε μία ευρύτατη ποικιλία μειγμάτων που αποτελούνται από ενώσεις αερίων, υγρών και στερεών υδρογονανθράκων, ποσότητες αζώτου, θείου και οξυγόνου, ενώ συχνά περιέχουν και ιχνοστοιχεία μετάλλων όπως νικέλιο και βανάδιο. Ετυμολογικά, η λέξη πετρέλαιο προκύπτει από την ελληνική λέξη πέτρα και την λατινική *oleum* που σημαίνει έλαιο (λάδι της πέτρας) ενώ συχνά ονομάζεται και μαύρος χρυσός. Είναι ένα παχύρρευστο υγρό πέτρωμα, το οποίο συναντάται σε μαύρο ή σκούρο καφετί χρώμα ενώ άλλες φορές και σε πρασινωπό. Έχει μια πολύ χαρακτηριστική και δυσάρεστη οσμή, είναι αδιάλυτο στο νερό και έχει μικρότερο ειδικό βάρος από αυτό. Το ακατέργαστο πετρέλαιο (αργό) είναι μείγμα υδρογονανθράκων δηλαδή ουσιών που περιέχουν άνθρακα και υδρογόνο. Θεωρείται ένα περίπλοκο μείγμα συστατικών, δεδομένου ότι η σύσταση του εξαρτάται από την ηλικία και την προέλευση. Τα προϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία πετρελαίου ή των παραγώγων του μπορεί να έχουν πολύ μεγάλο εύρος χρήσης και εκτιμάται πως αντιστοιχούν περίπου στο 1/3 της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως.

Ο όρος πετρέλαιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Γερμανό ορυκτολόγο Agricola το 1556, η χρήση του όμως, είναι γνωστό μέσω ανασκαφών, ότι ξεκίνησε χιλιάδες χρόνια πριν, από λαούς τις αρχαιότητας. Βαβυλώνιοι, Ασσύριοι, Σουμέριοι καθώς και λαοί της Μεσοποταμίας και της Ανατολικής Μεσογείου, χρησιμοποιούσαν πετρέλαιο που προερχόταν από διαρροές στον Ευφράτη και είχε πολλές και διάφορες χρήσεις. Από κατασκευές δρόμων μέχρι συγκόλληση μωσαϊκών και από κατασκευές αδιάβροχης ψάθας και καλαθιών μέχρι ιατρικό φάρμακο. Επίσης, ήταν γνωστό και στην Αρχαία Ελλάδα. Οι διάφορες χρήσεις του όμως δεν μεταφέρθηκαν στους Ρωμαίους κατακτητές κι έτσι η χρήση του, έμεινε σε εκείνο το πρωτόλειο στάδιο που την είχαν αφήσει οι αρχαίοι πολιτισμοί, μέχρι και τις αρχές του 19ου αιώνα.

Ιστορικά, η έναρξη της βιομηχανίας του πετρελαίου έγινε τον Αύγουστο του 1859 όταν πραγματοποιήθηκε η πρώτη γεώτρηση προς εξεύρεση πετρελαίου από τον Edwin Drake στη Δυτική Πενσυλβάνια των Ηνωμένων Πολιτειών. Ο πρώτος αγωγός που στόχευε στη μεταφορά αργού πετρελαίου, δημιουργήθηκε στην ίδια περιοχή το 1865 και ήταν φτιαγμένος από ξύλο. Δημιουργός αυτού του αγωγού ήταν ο S. Karns, και βασικός σκοπός του ήταν να αντικαταστήσει τον παλιότερο και αρκετά αντοικονομικό τρόπο μεταφοράς του πετρελαίου που γινόταν μέσω ιππήλατων αμαξιών.

Εξαιτίας της βιομηχανικής επανάστασης και ως επακόλουθο την ολοένα και μεγαλύτερη χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης και κυρίως αυτοκινήτων, το πετρέλαιο χρησιμοποιείται πλέον κατά κύριο λόγο ως πηγή ενέργειας, ενώ μέχρι εκείνη τη στιγμή η χρήση του περιοριζόταν στο φωτισμό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, η βιομηχανία πετρελαίου να εκτιναχθεί. Έτσι, ενώ το 1870 η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου ήταν μικρότερη από 1.000.000 τόνους το χρόνο, στα επόμενα χρόνια έφτασε να ξεπερνά τα 3.000.000 τόνους. Στη σημερινή εποχή εξακολουθεί να αποτελεί την κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας και είναι μια σημαντική πρώτη ύλη στην βιομηχανία πετροχημικών.

Μέχρι και σήμερα η προέλευση του πετρελαίου δεν είναι απολύτως εξακριβωμένη, όμως είναι γενικά αποδεκτό ότι δημιουργήθηκε από την



αποσύνθεση θαλάσσιων κυρίως ζώων και φυτών που θάφτηκαν κάτω από διαδοχικές στοιβάδες λάσπης, πριν από πολλά εκατομμύρια χρόνια.

Το εξαγόμενο πετρέλαιο, ανάμεικτο με χώμα και άλλες ακαθαρσίες, αρχικά μαζεύεται μαζί με το νερό σε μεγάλες δεξαμενές ή στέρνες. Εκεί, στη συνέχεια, διαχωρίζεται από το νερό και τα αργιλώδη ιζήματα. Έπειτα το ακατέργαστο πετρέλαιο διοχετεύεται στα διυλιστήρια, μέσω σωλήνων (pipelines). Στην περίπτωση όπου τα διυλιστήρια είναι πέρα από τη θάλασσα, η μεταφορά του ακατέργαστου πετρελαίου γίνεται συνήθως με πλωτές δεξαμενές, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις με υποθαλάσσιους πετρελαιοαγωγούς. Όσον αφορά τη διάθεση του πετρελαίου στην αγορά, αυτό αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί διάφορες τεχνολογίες τόσο μεταφοράς όσο και αποθήκευσης, που συνήθως αναφέρονται ως "midstream".

Το πετρέλαιο συνήθως παράγεται σε απομακρυσμένες περιοχές, αρκετά μακριά από το σημείο όπου θα καταναλωθεί, γεγονός που επέβαλε την ανάπτυξη υποδομών και μεταφορικών μέσων εξειδικευμένων στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Έτσι κατασκευάστηκαν δίκτυα με σκοπό τη μεταφορά του αργού πετρελαίου στα διυλιστήρια, όπου μεταποιείται, αλλά και τη μεταφορά των εξευγενισμένων προϊόντων εκεί όπου θα καταναλωθούν. Οι φάσεις της μεταφοράς πετρελαίου είναι δύο. Το πρώτο στάδιο είναι η μεταφορά από τις γεωτρήσεις στα διυλιστήρια ενώ η δεύτερη φάση είναι η μεταφορά του έτοιμου επεξεργασμένου προϊόντος στον καταναλωτή. Παλαιότερα ο τρόπος μεταφοράς του πετρελαίου ήταν μέσω μικρών σχετικά δοχείων τα οποία με τη σειρά τους μεταφέρονταν κυρίως με άμαξες. Τον 19ο αιώνα όμως κατασκευάστηκε το πρώτο δίκτυο αγωγών μεταφοράς πετρελαίου. Ο νέος αυτός τρόπος μεταφοράς παρείχε πολύ μεγαλύτερο οικονομικό κέρδος κι έτσι σιγά σιγά αντικατέστησε κάθε προηγούμενο. Σήμερα το πετρέλαιο «ταξιδεύει» κυρίως μέσω αγωγών, συχνά όμως μεταφέρεται με δεξαμενόπλοια, με το σιδηρόδρομο ή και με τροχοφόρα οχήματα. Η επιλογή του τρόπου μεταφοράς εξαρτάται από την απόσταση την οποία πρέπει να διανύσει το πετρέλαιο αλλά και την οικονομική επιβάρυνση για τη μεταφορά αυτή.

Το πετρέλαιο αποθηκεύεται συνήθως σε δεξαμενές στην επιφάνεια της γης και παραμένει εκεί μέχρι να είναι έτοιμο για τη μεταφορά. Ένα σημαντικό ζήτημα των μεθόδων μεταφοράς και αποθήκευσης του πετρελαίου, είναι οι διαρροές και οι ακούσιες εκπομπές. Τυχόν διαρροές από τα δεξαμενόπλοια μπορεί να μολύνουν τις παράκτιες περιοχές αλλά και να διαταράξουν την ισορροπία στο υδάτινο περιβάλλον, ενώ οι διαρροές από σιδηροδρομικές μεταφορές και αγωγούς μπορούν να μολύνουν οικοσυστήματα άγριας ζωής ή ακόμη και κατοικημένες περιοχές αναλόγως με την τοποθεσία. Διαρροές πετρελαίου ή αερίων από δεξαμενές αποθήκευσης έχουν επίσης το ίδιο βλαβερά αποτελέσματα. Η κατασκευή αγωγών προσφάτως προκάλεσε μια μεγάλη ανησυχία στον κόσμο. Τα προτεινόμενα έργα αγωγών, αποτέλεσαν το επίκεντρο του προβληματισμού των περιβαλλοντολόγων, λόγω των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων και επειδή αποτελούν σύμβολο της συνεχιζόμενης επένδυσης της κοινωνίας σε ενεργειακή υποδομή που είναι ακόμα εξαρτημένη από τον άνθρακα.

### 1.2.4 Φυσικό Αέριο

Το φυσικό αέριο είναι μείγμα κορεσμένων υδρογονανθράκων με μικρό αριθμό ατόμων άνθρακα. Το βασικό του συστατικό είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) το οποίο συνήθως συναντάται σε ποσοστό 70% - 90%. Συνυπάρχουν όμως σε αυτό κι άλλα συστατικά σε αρκετά μικρότερο ποσοστό όπως λόγω χάρη Αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) περίπου 5% - 15% , προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) και βουτάνιο ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) (< 5%), και σε αρκετά μικρότερες ποσότητες, διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), άζωτο (N) ήλιο (He) και υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Το φυσικό αέριο σχηματίστηκε όταν στρώματα ζωικής και φυτικής ύλης εκτέθηκαν σε μεγάλη θερμότητα και πίεση κάτω από το φλοιό της Γης για εκατομμύρια χρόνια. Έτσι, ο συνηθέστερος τρόπος να εξαχθεί είναι από υπόγειες κοιλότητες. Στη συνέχεια διοχετεύεται σε εργοστάσια επεξεργασίας για την αφαίρεση ακαθαρσιών και την αύξηση της καθαρότητάς του.

Το φυσικό αέριο είναι άχρωμο άοσμο κι ελαφρύτερο από τον αέρα, η ιδιαίτερη οσμή του, του δίνεται τεχνητά, με σκοπό να μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό σε περιπτώσεις τυχόν διαρροών. Η καύση του παράγει μικρότερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από ότι το πετρέλαιο και οι γενικές συνέπειες στο περιβάλλον είναι λιγότερο επιβλαβείς. Το ειδικό του βάρος είναι ίσο με 0.59. Ξεκίνησε να αξιοποιείται στις αρχές του 19ου αιώνα κυρίως για λάμπες φωτισμού, ενώ αρκετά χρόνια αργότερα, στα μέσα περίπου του 20ου αιώνα έκαναν την εμφάνιση τους τα πρώτα δίκτυα μεταφοράς του. Σήμερα υπάρχει δυνατότητα εύκολης μεταφοράς του σε μεγάλες αποστάσεις μέσω αγωγών.

Μπορεί να συναντηθεί τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια μορφή. Αναλόγως με τη μορφή αυτή, επιλέγεται και ο καταλληλότερος τρόπος μεταφοράς του. Όσον αφορά την υγρή μορφή μεταφέρεται κυρίως με πλοία, μέσα σε μεγάλες δεξαμενές ενώ στην αέρια μορφή του, συνήθως μεταφέρεται μέσω αγωγών υπό υψηλή πίεση. Στη σημερινή εποχή, θεωρείται η πιο καθαρή μορφή ενέργειας. Αυτή η παραδοχή βασίζεται κυρίως στη σύσταση του. Άλλα καύσιμα όπως το πετρέλαιο ή το κάρβουνο έχουν μια πολύπλοκη χημική σύσταση, ενώ επίσης κατά τη διαδικασία της καύσης, εκλύονται υψηλά ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα καθώς και ενώσεις του αζώτου και του θείου.

Τα αποθέματα του είναι κατανεμημένα παγκοσμίως όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση του πετρελαίου. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες τα αποθέματα αυτά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι περίπου 185 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Το Ιράν και η Ρωσία διαθέτουν τα μεγαλύτερα κοιτάσματα με περίπου 32.3 και 31.6 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα αντίστοιχα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόβλεψη ότι τα διαθέσιμα αποθέματα φυσικού αερίου, τα οποία το 2014 ανέρχονταν στα 200 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα, με τους σημερινούς ρυθμού παραγωγής, επαρκούν για 50 περίπου έτη ακόμη.

#### Θετικά χαρακτηριστικά της χρήσης του φυσικού αερίου :

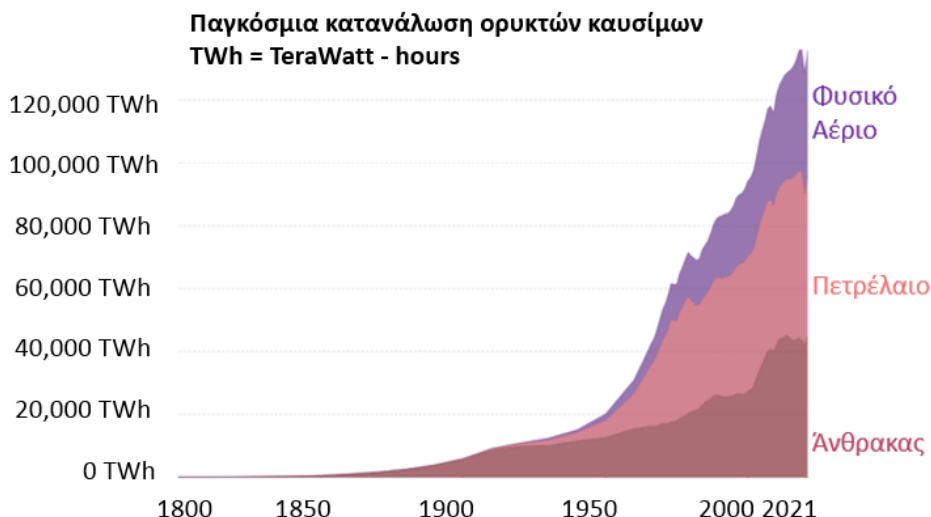
1. Καθαρή καύση: Το φυσικό αέριο καίγεται πιο καθαρά σε σχέση με άλλα καύσιμα, προκαλώντας λιγότερες εκπομπές ρύπων όπως διοξείδιο του άνθρακα, θείο και άλλα σωματίδια. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του αντίκτυπου στην ποιότητα του αέρα.
2. Υψηλή απόδοση: Οι συσκευές που λειτουργούν με φυσικό αέριο, όπως θερμαντικές συσκευές και συσκευές μαγειρέματος, έχουν υψηλή απόδοση καύσης, προσφέροντας αποτελεσματική χρήση της ενέργειας.
3. Πολυλειτουργικότητα: Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται για πολλούς σκοπούς, όπως η θέρμανση κτιρίων, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ο εφοδιασμός οχημάτων και η χρήση του στη βιομηχανία ως πρώτη ύλη για την παραγωγή χημικών προϊόντων.

#### Αρνητικά χαρακτηριστικά στη χρήση φυσικού αερίου:

1. Απειλή για το περιβάλλον: Αν και το φυσικό αέριο καίγεται καθαρότερα σε σχέση με άλλα καύσιμα, η απελευθέρωση του αερίου μεθανίου, κατά την παραγωγή και μεταφορά του μπορεί να συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην αλλαγή του κλίματος.
2. Εξάρτηση από εξωτερικές πηγές: Πολλές χώρες εξαρτώνται από εισαγωγές φυσικού αερίου για τις ενεργειακές τους ανάγκες. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει γεωπολιτικές εξαρτήσεις και οικονομικές ανισορροπίες, καθώς οι τιμές και η διαθεσιμότητα του φυσικού αερίου επηρεάζονται από γεωπολιτικούς παράγοντες και παγκόσμιες αγορές.
3. Κίνδυνος ατυχημάτων: Παρά τα συστήματα ελέγχου και ασφαλείας, η μεταφορά και αποθήκευση φυσικού αερίου εμπεριέχει κάποιους κινδύνους. Διαρροές, εκρήξεις ή πυρκαγιές μπορεί να προκληθούν από ατυχήματα στους αγωγούς ή τις εγκαταστάσεις μεταφοράς.
4. Μη ανανεώσιμος πόρος: Το φυσικό αέριο είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος, οπότε η εξόρυξη του από το έδαφος εξαντλεί τις υπάρχουσες πηγές.

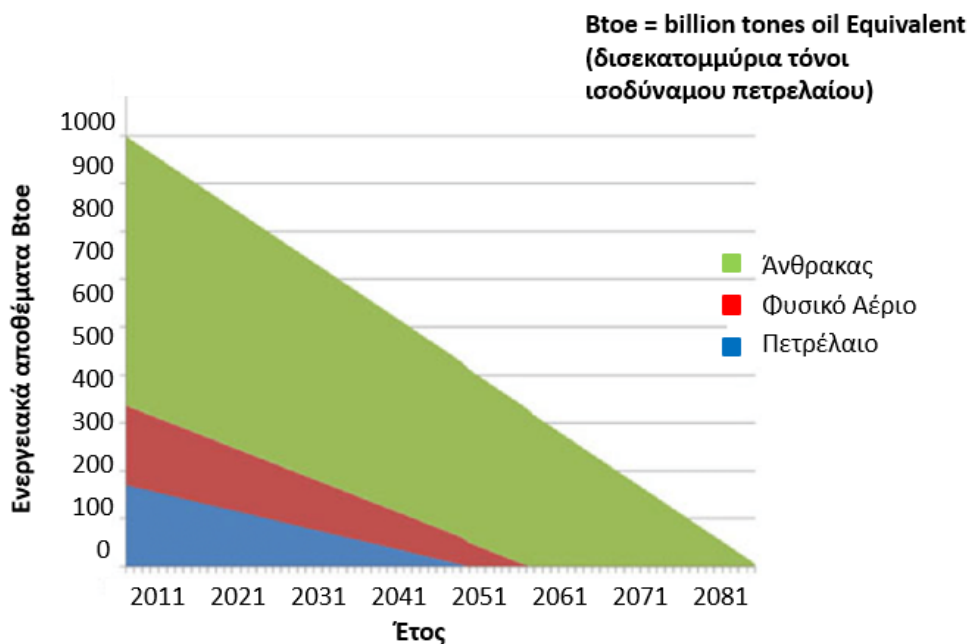
### **1.2.5 Παγκόσμια Αποθέματα και Κατανάλωση Υδρογονανθράκων**

Αν και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος τα τελευταία χρόνια και τα σχέδια για έναν «πράσινο» πλανήτη αυξάνονται συνεχώς, η κατανάλωση φυσικού αερίου και πετρελαίου, χρόνο με το χρόνο γνωρίζει μια τεράστια άνοδο. Στην Εικόνα 1.4 φαίνεται η εν λόγω αύξηση από το 1800 έως και το 2021. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεγάλη άνοδος από το 2000 και μετά. Σύμφωνα με προβλέψεις, τα επόμενα χρόνια ο ρυθμός κατανάλωσης θα συνεχίσει να αυξάνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό.



**Εικόνα 1.4:** Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, μετρούμενη σε τεραβατώρες (TWh). Πηγή : Our World on Data.

Ταυτόχρονα, όπως είναι λογικό, τα αποθέματα που υπάρχουν παγκοσμίως συνεχώς μειώνονται. Μάλιστα, ο ρυθμός με τον οποίο μειώνονται τα τελευταία χρόνια είναι υπερβολικά μεγάλος, ως συνέπεια της τεράστιας αύξησης στην κατανάλωση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.5 τα παγκόσμια αποθέματα φυσικού αερίου, πετρελαίου και άνθρακα, από το 2011 έως και σήμερα, μειώνονται σημαντικά και με βάση αυτόν τον ρυθμό, θα εξαντληθούν πριν από το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Φυσικά, αυτά τα σενάρια έχουν πολλές αβεβαιότητες, όπως τις μεταβολές στην κατανάλωση λόγω της «πράσινης ενέργειας» των ΑΠΕ, εκμετάλευση νέων κοιτασμάτων, κ.α.



**Εικόνα 1.5:** Τα παγκόσμια αποθέματα Φυσικού αερίου, Πετρελαίου και Άνθρακα, από το 2011 έως και σήμερα και η πρόβλεψη για τα αποθέματα αυτά τα επόμενα 60 χρόνια. Πηγή: The Millennium Alliance for Humanity and the Biosphere.



### 1.2.6 Γεωκίνδυνοι

Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί που περιγράφουν την έννοια των γεωκινδύνων. Για παράδειγμα, ως γεωκίνδυνος μπορεί να ονομαστεί μία γεωλογική κατάσταση η οποία ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες καταστροφές. Σύμφωνα με τον Dean, είναι οι κίνδυνοι που σχετίζονται με γεωλογικά ή γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ή διεργασίες που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την λειτουργικότητα ή ακεραιότητα μια κατασκευής κατά την περίοδο λειτουργίας της (Dean 2010).

Ακόμη δύο πολύ χρήσιμοι ορισμοί για τους γεωκινδύνους, με τον πρώτο να εστιάζει κυρίως στο στοιχείο της έκθεσης του πληθυσμού στον συγκεκριμένο κίνδυνο και τον δεύτερο να είναι αρκετά πιο ευρύς, είναι οι εξής:

- Γεωκίνδυνος καλείται ένας κίνδυνος γεωλογικού χαρακτήρα, ο οποίος αποτελεί απειλή για τον άνθρωπο και τις δραστηριότητές του (Mc Call and Marker 1989).
- Γεωκίνδυνος ονομάζεται εκείνος ο κίνδυνος που εμπεριέχει την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με οποιαδήποτε φυσική διαδικασία που συμβαίνει στον πλανήτη (Mc Call et al., 1992).

Σύμφωνα τώρα, με τους Randolph και Gourvenec οι γεωκίνδυνοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα επικίνδυνα συμβάντα, τα οποία συμβαίνουν σπάνια κι έχουν τυχαμικό χαρακτήρα, όπως για παράδειγμα ένας σεισμός ή μια κατολίσθηση
- Τις επικίνδυνες εδαφικές συνθήκες, όπως παραδείγματος χάρη ο ερπυσμός του εδάφους. Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε ένα στέρεο σώμα, στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη, παρατηρείται μια αργή και συνεχή παραμόρφωση παρόλο που η τάση, η οποία το καταπονεί δεν ξεπερνά το όριο διαρροής.

Σύμφωνα πάλι με τον Dean ο τρόπος προσδιορισμού των γεωκινδύνων πραγματοποιείται με την μελέτη της γεωλογίας, της γεωμορφολογίας και της γεωγραφίας μιας περιοχής, αλλά και μέσω γεωφυσικών και γεωτεχνικών ερευνών. Συχνά δημιουργείται μια σύγχυση μεταξύ των εννοιών του κινδύνου (hazard) και διακινδύνευσης (risk). Οι δύο αυτές έννοιες χρησιμοποιούνται ορισμένες φορές λανθασμένα χωρίς διάκριση. Ο κίνδυνος σχετίζεται με την αιτία που θα μπορούσε δυνητικά να προκαλέσει βλάβη, ενώ η διακινδύνευση αφορά την πιθανότητα να προκληθεί μια βλάβη (οποιοδήποτε βαθμού) και εξαρτάται κι από την τρωτότητα μιας κατασκευής ή ενός τεχνικού έργου υποδομής, αλλά και τις τοπικές συνθήκες στην περιοχή του έργου.

Επιγραμματικά, μερικά παραδείγματα γεωκινδύνων είναι τα εξής:

1. Σεισμοί: Η απότομη κίνηση του εδάφους που προκαλείται από την απελευθέρωση ενέργειας στο εσωτερικό της Γης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφές κτιρίων, γεφυρών, οδών και υποδομών, καθώς και σε απώλειες ανθρώπινων ζώων.
2. Ηφαιστειακή δραστηριότητα: Αναφέρεται στην έκρηξη ενός ηφαιστείου, με αποτέλεσμα, την απελευθέρωση μαγματικού υλικού, λάβας, τέφρας και αερίων. Αυτό μπορεί να προκαλέσει οικονομικές ζημιές και απειλή στην ανθρώπινη ζωή.
3. Κατολισθήσεις εδάφους: Πρόκειται για την απότομη κίνηση μιας, μεγάλης μάζας εδάφους προς τα κάτω σε μια πλαγιά. Μπορεί να προκληθεί από την υπερβολική υγρασία, τη γεωλογική δομή, ανθρώπινη ή σεισμική δραστηριότητα κ.α. Οι κατολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν καταστροφές σε κατοικημένες περιοχές, υποδομές και να απειλήσουν ανθρώπινες ζωές.
4. Πλημμύρες: Η άφθονη υπερχείλιση νερού που καλύπτει γη και δύναται να προκαλέσει απώλειες ανθρώπινων ζώων, υλικών αγαθών και υποδομών. Οι πλημμύρες μπορούν να προκληθούν από έντονες βροχοπτώσεις, υψηλή στάθμη ποταμών ή κυκλώνες.
5. Τυφώνες και Καταιγίδες : Οι τυφώνες είναι συστήματα θύελλας με μια κλειστή περιστροφική (κυκλωνική) κυκλοφορία γύρω από ένα κέντρο χαμηλής βαρομετρικής πίεσης και σχηματίζονται κυρίως πάνω από τα θερμά ωκεάνια νερά τροπικών περιοχών. Περιλαμβάνουν ισχυρούς ανέμους κι έντονες βροχοπτώσεις. Οι τυφώνες μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές σε μεγάλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένων σπιτιών, υποδομών, δασών και γεωργικών καλλιεργειών. Οι καταιγίδες μπορούν να προκαλέσουν διάφορες γεωκαταστροφές και να αποτελέσουν απειλή για την ανθρώπινη ασφάλεια. Ορισμένες από τις καταιγίδες που μπορούν να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες περιλαμβάνουν: ανεμοθύελλες, κεραυνούς, χαλαζοπτώσεις καταρρακτώδεις βροχές και πλημμύρες.
6. Πυρκαγιές: Οι πυρκαγιές μπορούν να είναι αποτέλεσμα φυσικών αιτίων, όπως κεραυνοί ή ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η χρήση πυροκροτητών. Οι πυρκαγιές μπορούν να εξαπλωθούν γρήγορα και να προκαλέσουν καταστροφές σε δασικές, αγροτικές ή κατοικημένες περιοχές, με ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες.
7. Θύελλες: Οι θύελλες είναι ισχυρές ατμοσφαιρικές διαταραχές που συνοδεύονται από ισχυρούς ανέμους, έντονη βροχή, κεραυνούς και καταιγίδες. Μπορούν να προκαλέσουν καταστροφές σε κτίρια, διαταραχές στις επικοινωνίες και απώλεια ζώων.



**Εικόνα 1.6:** Διάρρηξη αγωγού διαμέτρου 14 ιντσών λόγω πλευρικής μετατόπισης 1,5-2 m ύστερα από μετακίνηση προϋπάρχουσας κατολίσθησης (φωτογραφία: E. M. Lee, Απρίλιος 2006).



**Εικόνα 1.7:** Τμήμα του αγωγού του San Bruno που εξερράγη στις 9 Σεπτεμβρίου του 2010. Αιτία της έκρηξης σύμφωνα με το Εθνικό Συμβούλιο Ασφάλειας Μεταφορών ήταν εγκατάσταση ενός υποβαθμισμένου και κακώς συγκολλημένου τμήματος σωλήνα με ορατό ελάττωμα συγκόλλησης. Πηγή : NTSB (National Transportation Safety Board).

### 1.2.7 Σεισμικοί Γεωκίνδυνοι

Ως σεισμικοί, ορίζονται οι γεωλογικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με τη σεισμική δραστηριότητα. Θέτουν σε ιδιαίτερο κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή καθώς και την ακεραιότητα των ανθρώπινων υποδομών. Οι σεισμικοί γεωκίνδυνοι κατηγοριοποιούνται σε δυο διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη, είναι οι άμεσοι στους οποίους ανήκει η ισχυρή εδαφική κίνηση εξαιτίας του σεισμικού φαινομένου, όπως επίσης και οι μόνιμες μετακινήσεις του εδάφους που προκύπτουν από τη διάρρηξη ενός ρήγματος.

Η δεύτερη κατηγορία, είναι οι έμμεσοι, στους οποίους ανήκουν οι μόνιμες μετακινήσεις του εδάφους που προκύπτουν από τη ρευστοποίηση του εδάφους, από κατολίσθηση, κ.α. Στους σεισμικούς γεωκινδύνους περιλαμβάνονται κυρίως:

- Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων
- Οι σεισμοτεκτονικές διαρρήξεις
- Οι κατολισθήσεις
- Η ρευστοποίηση του εδάφους
- Τα κύματα τσουνάμι

Οι σεισμοί είναι το αποτέλεσμα της ξαφνικής απελευθέρωσης ενέργειας στον φλοιό της Γης. Η ενέργεια αυτή δημιουργεί σεισμικά κύματα που προκαλούν τη δόνηση του εδάφους. Η ένταση ενός σεισμού μετριέται στην κλίμακα Ρίχτερ, η οποία ποσοτικοποιεί την ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται. Οι σεισμοί μπορεί να ποικίλλουν σε μέγεθος και μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε κτίρια, υποδομές και το περιβάλλον. Η σοβαρότητα των επιπτώσεών τους, εξαρτάται από παράγοντες όπως η εγγύτητα σε κατοικημένες περιοχές, το εστιακό βάθος του σεισμού και ο τύπος του γεωλογικού ρήγματος που εμπλέκεται.

Η διάρρηξη του εδάφους αναφέρεται στη μετατόπιση ή το σπάσιμο της γήινης επιφάνειας κατά μήκος ενός ρήγματος. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, η επιφάνεια της Γης μπορεί να σπάσει και να μετατοπιστεί κατά μήκος ενός ρήγματος. Αυτή η μετατόπιση μπορεί να οδηγήσει σε ορατές ρωγμές ή μετατοπίσεις στο έδαφος, γνωστές ως ρήγμα εδάφους. Η διάρρηξη συμβαίνει όταν η τάση που συσσωρεύεται κατά μήκος ενός ρήγματος απελευθερώνεται ξαφνικά κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, προκαλώντας τη μετακίνηση του εδάφους εκατέρωθεν του ρήγματος.

Οι διαρρήξεις εδάφους μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές σε κτίρια, δρόμους, αγωγούς και άλλες ανθρώπινες κατασκευές που βρίσκονται στο πέρασμά τους ή κοντά σε αυτές (πιο αναλυτικά, περιγράφονται στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο Ρήγματα) .

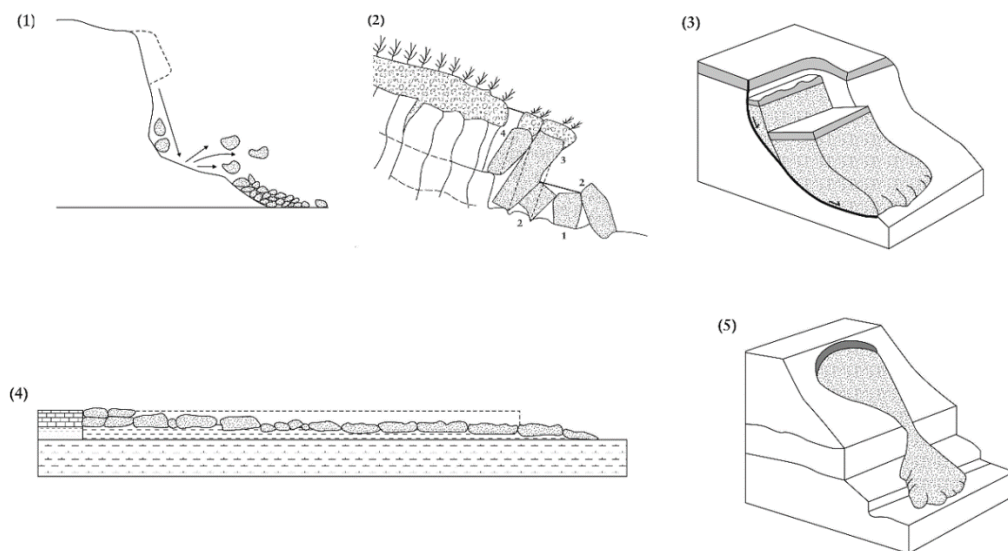
Ως κατολίσθηση μπορούμε να ορίσουμε το φαινόμενο εκείνο, κατά το οποίο, τμήμα από μια κεκλιμένη επιφάνεια αποκολλάται και στη συνέχεια ολισθαίνει. Σε μια επιφάνεια η οποία είναι οριζόντια, αν υπάρξει αποκόλληση ενός τμήματος, δεν πρόκειται να ολισθήσει μόνο του καθώς χρειάζεται οπωσδήποτε να δράσει πάνω σε αυτό μια εξωτερική δύναμη. Στις κεκλιμένες επιφάνειες η εξωτερική δύναμη είναι το ίδιο το βάρος του τμήματος που αποκολλήθηκε (βαρύτητα).

Το φαινόμενο της κατολίσθησης συνήθως εμφανίζεται λόγω αύξησης της κλίσης του πρηνούς, λόγω αποσάθρωσης των πετρωμάτων και συνεπώς μείωσης της αντοχής, λόγω σεισμού ή λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

Σύμφωνα με τον Varnes (1978) οι χερσαίες κατολισθήσεις κατατάσσονται σε 5 διαφορετικές κατηγορίες αναλόγως της εδαφικής μετακίνησης, το υλικό και την γεωμετρία :

- Πτώσεις
- Ανατροπές
- Ολισθήσεις
- Εξάπλωση
- Ροές

Με βάση τις διαφορετικές επιπτώσεις στους αγωγούς, ο Meyersohn (1991) καθόρισε τρεις τύπους κατολισθήσεων. Ο Τύπος 1 περιλαμβάνει την πτώση και την ανατροπή βράχων που μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε χερσαίους αγωγούς από την άμεση πρόσκρουση των τμημάτων που πέφτουν. Στην περίπτωση ενός υπόγειου αγωγού αυτός ο τύπος έχει σχετικά μικρή επίδραση. Ο Τύπος 2 περιλαμβάνει τη ροή γαιών και θραυσμάτων, στην οποία το μεταφερόμενο υλικό συμπεριφέρεται ως ρευστό. Τέλος, ο Τύπος 3 περιλαμβάνει την κατολίσθηση γαιών και την ολίσθηση γαιών, κατά την οποία το έδαφος κινείται πάνω κάτω ως μια ενιαία μάζα. Συνήθως αναπτύσσονται κατά μήκος φυσικών πρηνών, ποτάμιων καναλιών και αναχωμάτων.



**Εικόνα 1.8:** Οι 5 διαφορετικές κατηγορίες κατολισθήσεων.  
Πηγή Geological society.

Ρευστοποίηση ονομάζεται το φαινόμενο που συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, όταν το κορεσμένο έδαφος χάνει προσωρινά την αντοχή του και συμπεριφέρεται σαν υγρό. Η δόνηση του εδάφους προκαλεί αύξηση της πίεσης του νερού στο εσωτερικό του εδάφους, με αποτέλεσμα την απώλεια της τριβής μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το έδαφος να χάνει την ικανότητά του να στηρίζει κατασκευές, οδηγώντας σε βύθιση, κλίση ή ακόμη και κατάρρευση κτιρίων και υποδομών. Η ρευστοποίηση του εδάφους αποτελεί σημαντική πηγή ανησυχίας σε περιοχές με χαλαρά, κορεσμένα με νερό, εδάφη και μπορεί να ενισχύσει τις ζημιές που προκαλεί ένας σεισμός.

Τα κύματα τσουνάμι είναι μεγάλα ωκεάνια κύματα που συνήθως δημιουργούνται από υποθαλάσσιους σεισμούς, ηφαιστειακές εκρήξεις ή κατολισθήσεις. Όταν ένας σεισμός συμβαίνει κάτω από τον πυθμένα του ωκεανού, μπορεί να μετατοπίσει μεγάλο όγκο νερού, δημιουργώντας μια σειρά από ισχυρά κύματα που ταξιδεύουν στον ωκεανό. Όταν αυτά τα κύματα φτάσουν στην ακτή, μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικές πλημμύρες και καταστροφές. Τα τσουνάμι μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις και είναι ιδιαίτερα καταστροφικά όταν συναντούν παράκτιες περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο.

Ο σεισμός, είναι ένα φαινόμενο γνώριμο στον άνθρωπο από την αρχαιότητα και αρχικά ήταν συνδεδεμένος με Θεϊκή οργή και τιμωρία των ανθρώπων. Στην πορεία ερμηνεύτηκε και περιγράφηκε πλήρως ο τρόπος εκδήλωσης ενός σεισμού, οι αιτίες που αυτός συμβαίνει καθώς και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το πόσο καταστροφικά αποτελέσματα θα έχει.

Η πρόβλεψη του όμως είναι ένα τελείως διαφορετικό θέμα. Δεν υπάρχει κανένας αποδεκτός τρόπος πλήρους πρόβλεψης του ακριβούς χρόνου εμφάνισης ενός σεισμού κι ενδεχομένως να μην υπάρξει. Δεδομένου λοιπόν, ότι οι γεωκίνδυνοι είναι φαινόμενα άρρηκτα συνδεδεμένα με φυσικές διεργασίες, είναι εύκολα αντιληπτό ότι η πρόβλεψή τους είναι από δύσκολη έως αδύνατη.

Το γεγονός ότι δεν μπορεί να προσδιοριστεί ο ακριβής χρόνος εμφάνισης ενός φυσικού φαινομένου, δεν σημαίνει προφανώς ότι η αντιμετώπιση του είναι αδύνατη. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα σύνολο κανονιστικών οδηγιών ώστε οι ανθρώπινες κατασκευές να μπορούν να ανταπεξέλθουν απέναντι σε ένα τέτοιο φαινόμενο και να επιτευχθεί ο μέγιστος περιορισμός βλαβών και εν συνεχεία επιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η αντιμετώπιση των γεωκινδύνων απαιτεί συνδυασμό στρατηγικών που αποσκοπούν στην πρόληψη, τον μετριασμό του κινδύνου και τη προστασία των ανθρώπων, των υποδομών και του περιβάλλοντος. Οι κύριες πτυχές της περιλαμβάνουν τα εξής:

- Πρόβλεψη κι Αξιολόγηση κινδύνου: Η διενέργεια διεξοδικών αξιολογήσεων κινδύνου είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των πιθανών γεωκινδύνων σε μια δεδομένη περιοχή. Η πρόβλεψη περιλαμβάνει την αναγνώριση των γεωκινδύνων και την αξιολόγηση της ευπάθειας των περιοχών που εκτίθενται σε αυτούς τους κινδύνους. Με τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση των περιοχών υψηλού κινδύνου, μπορούν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των γεωκινδύνων.

- Τεχνικά μέτρα: Η εφαρμογή τεχνικών μέτρων είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των κατασκευών έναντι των γεωκινδύνων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τον σχεδιασμό κτιρίων και υποδομών ώστε να αντέχουν σε σεισμικές δυνάμεις, όπως η ενσωμάτωση ευέλικτων δομών, η χρήση ενισχυμένων υλικών και η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων θεμελίωσης. Ομοίως, μέτρα όπως οι τεχνικές σταθεροποίησης των πρανών μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό των κατολισθήσεων.
- Χωρικός σχεδιασμός και ρύθμιση γης: Αποτελούν σημαντικά μέτρα για την αντιμετώπιση των γεωκινδύνων. Με τον σωστό σχεδιασμό των πόλεων, των κτιρίων και των υποδομών, μπορούν να αποφευχθούν ευάλωτες περιοχές. Με την αποφυγή κατασκευής σε περιοχές υψηλού κινδύνου ή την εφαρμογή οικοδομικών κωδίκων και κανονισμών που λαμβάνουν υπόψη τους γεωκινδύνους, μπορεί να μειωθεί η τρωτότητα των υποδομών.
- Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης: Η ανάπτυξη και εφαρμογή τέτοιων συστημάτων μπορεί να προσφέρει πολύτιμο χρόνο για την ετοιμότητα και την αντιμετώπιση. Για τους σεισμούς, τα δίκτυα σεισμικής παρακολούθησης μπορούν να ανιχνεύσουν τα σεισμικά κύματα και να παρέχουν προειδοποίηση πριν η δόνηση φτάσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή, ενώ τα συστήματα προειδοποίησης για τσουνάμι μπορούν να ανιχνεύσουν υποθαλάσσιους σεισμούς και να ειδοποιήσουν εγκαίρως τις παράκτιες κοινότητες. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν στους ανθρώπους να λαμβάνουν άμεσα μέτρα προστασίας.
- Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του κοινού: Η ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τους γεωκινδύνους και η παροχή εκπαίδευσης σχετικά με την ετοιμότητα και την αντιμετώπιση είναι ουσιαστικής σημασίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη διάδοση πληροφοριών σχετικά με πιθανούς κινδύνους, την προώθηση μέτρων ασφαλείας και τη διεξαγωγή ασκήσεων για την ενίσχυση της ετοιμότητας της κοινότητας.
- Διεθνής συνεργασία: Οι γεωκίνδυνοι συχνά ξεπερνούν τα πολιτικά σύνορα. Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή γνώσεων, πόρων και βέλτιστων πρακτικών μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση και διαχείριση των γεωκινδύνων, ιδίως σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε σεισμούς, ηφαιστειακή δραστηριότητα ή άλλους γεωκινδύνους.

Εφαρμόζοντας αυτές τις στρατηγικές και συνδυάζοντας τις με τις συνεχείς προσπάθειες έρευνας και παρακολούθησης, οι κοινωνίες μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητά τους στους γεωκινδύνους και να μειώσουν τις επιπτώσεις τους στις ανθρώπινες ζωές, τις υποδομές και το περιβάλλον.



### 1.2.8 Άλλοι Κίνδυνοι

Είναι αποδεκτό ότι ο μεγαλύτερος κίνδυνος για τα δίκτυα αγωγών υδρογονανθράκων, όπως και η βασική αιτία για τη δημιουργία βλαβών σε αυτά, προέρχεται από τις σεισμικές δράσεις. Η επίδραση ενός σεισμού πάνω στον αγωγό μπορεί να εμφανιστεί με ποικίλους τρόπους όπως για παράδειγμα με μια κατολίσθηση ή με την ρευστοποίηση του εδάφους. Οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα φαινόμενα μπορεί υπό κατάλληλες συνθήκες να δημιουργήσει καταστροφές ή αστοχίες στον αγωγό. Ειδικά σε δίκτυα αγωγών που εκτείνονται σε τεράστιες αποστάσεις, είναι πιθανό κάποιο τμήμα να διέρχεται από περιοχή σεισμικού ρήγματος (ή να βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτή).

Φυσικά, υπάρχουν πολλοί κίνδυνοι που δεν έχουν σχέση με τον σεισμό, οι οποίοι προφανώς πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τη διάρκεια σχεδιασμού των αγωγών (είτε χερσαίων είτε υποθαλάσσιων). Σε αντίθετη περίπτωση, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, στην οικονομία αλλά και σε ανθρώπινες ζωές θα είναι πολύ σοβαρές. Σήμερα, χάρη στα τεχνολογικά μέσα που υπάρχουν, την τεχνογνωσία αλλά και το σύνολο των αυστηρών κανονισμών σχεδιασμού των δικτύων κοινής ωφέλειας, έχει επιτευχθεί μια επαρκής αντιμετώπιση των κινδύνων αυτών.

Ένας πολύ σημαντικός κίνδυνος που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας αγωγός μεταφοράς υδρογονανθράκων είναι οι υδρίτες αερίων (Gas hydrates). Οι υδρίτες αερίων είναι κρυσταλλικά ορυκτά που μοιάζουν με πάγο και σχηματίζονται όταν αέριο χαμηλού μοριακού βάρους (όπως παραδείγματος χάρη, μεθάνιο, αιθάνιο ή διοξείδιο του άνθρακα) συνδυάζεται με νερό και παγώνει σε στερεό, υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και μέτριας πίεσης. Τα περισσότερα ένυδρα αέρια σχηματίζονται από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) κι έτσι συχνά οι όροι ένυδρο αέριο και ένυδρο μεθάνιο χρησιμοποιούνται με την ίδια σημασία. Οι υδρίτες μεθανίου αποτελούν μία από τις πολλά υποσχόμενες πηγές ενέργειας του 21ου αιώνα. Τα παγκόσμια αποθέματα υδριτών αερίου είναι τεράστια κι εκτιμώνται σε χιλιάδες τρισ. κυβικά μέτρα τα οποία αντιστοιχούν σε αποθέματα πάνω από 100 φορές ίσως και περισσότερο, από τα μέχρι σήμερα γνωστά αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως. Τα αποθέματα αυτά όμως ταυτόχρονα απειλούν τον πλανήτη με επιπλέον οικολογική καταστροφή στην περίπτωση που λιώσουν και απελευθερώσουν το μεθάνιό τους εξαιτίας της υπερθέρμανσης του πλανήτη από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μέσα στον αγωγό, η δημιουργία υδριτών αποτελεί ένα μεγάλο πρόβλημα επειδή σε αυτή τη περίπτωση αδυνατεί να διασφαλισθεί η ομαλή ροή μέσα σε αυτόν.

Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα στην πρόκληση αστοχιών ή διαρροών σχετίζεται με ενέργειες που σχετίζονται με την κατασκευή και τις επιδιορθώσεις αγωγών. Βέβαια, όπως προαναφέρθηκε, τα τεχνολογικά μέσα του σήμερα καθώς και η τεχνογνωσία που υπάρχει γύρω από τις ενέργειες που χρειάζονται για επιδιορθώσεις και κατασκευές αγωγών, περιορίζουν συνεχώς τον κίνδυνο τέτοιων αστοχιών.



Ακόμη, μια πολύ σημαντική κατηγορία κινδύνων, που δεν έχει καμία σχέση με την σεισμική δράση, αποτελούν κλοπές και βανδαλισμοί. Έχουν σημειωθεί μέχρι σήμερα πολλά περιστατικά προσπαθειών για κλοπή του περιεχομένου τέτοιων αγωγών. Οι κίνδυνοι που υπάρχουν έχουν ποικίλες μορφές. Αρχικά περιβαλλοντική, μιας και η καταστροφή του αγωγού και η διαρροή του ρευστού στο περιβάλλον μπορεί να έχει εξαιρετικά επιζήμιες επιπτώσεις στη χλωρίδα και στη πανίδα ακόμη και στους ανθρώπους.

Φυσικά δεν είναι λίγα τα περιστατικά όπου άνθρωποι έχουν χάσει την ζωή τους σε τέτοιες προσπάθειες κλοπής, είτε εξαιτίας λαθών, είτε εξαιτίας άγνοιας. Αντιθέτως. Οι θάνατοι που έχουν καταγραφεί είναι εκατοντάδες κυρίως σε περιοχές της Αφρικής της Ασίας αλλά και της Λατινικής Αμερικής. Οι προσπάθειες κλοπής των υδρογονανθράκων από αγωγούς, συχνά σχετίζονται με μικρές ομάδες ατόμων ή ακόμα και μεμονωμένα άτομα που αποσπούν μικρές ποσότητες. Σε πολλές περιπτώσεις όμως μπορεί να συνδέονται με οργανώσεις που αριθμούν πολλά μέλη και ενδεχομένως ανήκουν στο οργανωμένο έγκλημα. Οι ποσότητες που μπορούν να αποσπάσουν είναι ικανές ακόμα και να γεμίσουν ολόκληρα δεξαμενόπλοια.

Τέλος, οι αγωγοί φυσικού αερίου, μπορούν να αποτελέσουν «ιδανικό» στόχο, για μια τρομοκρατική επίθεση. Η ευρεία κατανάλωση των υδρογονανθράκων παγκοσμίως έχει οδηγήσει στην κατασκευή αγωγών χιλιάδων χιλιομέτρων, που διασχίζουν από πόλεις και χώρες μέχρι ηπείρους, και προμηθεύουν εκατομμύρια καταναλωτές. Μια τρομοκρατική επίθεση τέτοιου είδους θα γίνει «είδηση» που θα ταξιδέψει αμέσως σε κάθε γωνιά του κόσμου, θα έχει επιπτώσεις στην καθημερινή ζωή πολλών ανθρώπων και σίγουρα δε θα αποσιωπηθεί.

Στη Συρία τον Αύγουστο του 2020, κατά τη διάρκεια της νύχτας, μια έκρηξη σε δίκτυο αγωγών προκάλεσε τη διακοπή της ηλεκτροδότησης σε ολόκληρη τη χώρα. Για την έκρηξη αυτή, η Κυβέρνηση άφησε ανοιχτό το ενδεχόμενο τρομοκρατικής πράξης (κρατικό πρακτορείο ειδήσεων SANA). Μια ακόμη περίπτωση επίθεσης σε αγωγό, είναι εκείνη που συνέβη στην Αίγυπτο, το 2020. Σύμφωνα με τα Αιγυπτιακά Μέσα μαζική ενημέρωσης, ο αγωγός αυτός έγινε στόχος λόγω της πρόσφατης (τότε) έναρξης της άντλησης φυσικού αερίου από το υποθαλάσσιο κοίτασμα Λεβιάθαν του Ισραήλ και τη μεταφορά του στην Αίγυπτο. Οι δράστες τοποθέτησαν εκρηκτικά σε ένα τμήμα του αγωγού 80 χιλιόμετρα δυτικά της πρωτεύουσας της επαρχίας του Σινά. Η επίθεση αποδόθηκε σε φανατικούς ισλαμιστές.

Μια διαφορετική μορφή «σύγχρονης» επίθεσης είναι η ηλεκτρονική. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι εταιρείες δεν έρχονται αντιμέτωπες με δολιοφθορές και εκρήξεις αλλά με εκβιασμό. Τέτοια περίπτωση είναι αυτή στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2021, όπου μεγάλος αγωγός καυσίμων (Colonian Pipeline), διέκοψε τη λειτουργία του, λόγω κυβερνοεπίθεσης. Πιο συγκεκριμένα, μια ομάδα hackers, κατάφερε και εισχώρησε, εμποδίζοντας την ομαλή λειτουργία του ηλεκτρονικού συστήματος. Οι διαχειριστές του αγωγού αναγκάστηκαν να κλείσουν ολόκληρο το δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα ανακοίνωσαν πως οι υπεύθυνοι απαιτούσαν λύτρα.

### 1.3 Αγωγοί στη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου

Στην ενότητα αυτή, δίνεται μια σύντομη περιγραφή των πιο γνωστών έργων δικτύων αγωγών στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Αξίζει να σημειωθεί πως ορισμένα από αυτά βρίσκονται ακόμη σε φάση κατασκευής.

#### 1.3.1 Αγωγός EastMed

Ο EastMed θα είναι ο αγωγός φυσικού αερίου της Ανατολικής Μεσογείου. Διαθέτει τόσο χερσαία τμήματα όσο και υποθαλάσσια κι έχει σα σκοπό του να συνδέσει τις ενεργειακές πηγές της Ανατολικής Μεσογείου με την Ηπειρωτική Ελλάδα, μέσω της Κρήτης και της Κύπρου και στη συνέχεια με την Ηπειρωτική Ευρώπη. Από το 2014, η διαχείριση του Έργου ανήκει στην θυγατρική της ΔΕΠΑ «ΥΑΦΑ – ΠΟΣΕΙΔΩΝ», στην οποία συμμετέχει ισομερώς η ιταλική Edison. Πιο συγκεκριμένα, ο αγωγός θα συνδέει τα κοιτάσματα φυσικού αερίου «Λεβιάθαν» (Ισραήλ) και «Αφροδίτη» (Κύπρος) στην Ανατολική Μεσόγειο με την Ευρώπη. Ο αγωγός EastMed ακολουθεί υποθαλάσσια οδευση προς την Κύπρο όπου θα βρίσκεται ένας σταθμός συμπίεσης, στη συνέχεια προς τις ακτές της Κρήτης, όπου ένας σταθμός συμπίεσης θα επιτρέψει την παροχή φυσικού αερίου σε όλο το νησί της Κρήτης κι ακολούθως, μέσω της Πελοποννήσου και της Δυτικής Ελλάδας ως τις ακτές της Θεσπρωτίας και την Ιταλία.

Στο Φλωροβούνι της Θεσπρωτίας, ο αγωγός EastMed μπορεί να συνδεθεί με τον αγωγό ΠΟΣΕΙΔΩΝ και τον IGB ενισχύοντας περαιτέρω την ολοκλήρωση της αγοράς ενέργειας της ΕΕ. Ο αγωγός θα έχει μήκος περίπου 1900 χιλιόμετρα ενώ το μέγιστο βάθος από όπου θα περνάει φαίνεται να είναι 3 χιλιόμετρα. Η χωρητικότητά του υπολογίζεται σε 10 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά χρόνο.



**Εικόνα 1.9:** Πιθανή χάραξη του αγωγού EastMed.

Πηγή: Ecopress

### 1.3.2 Διαδριατικός Αγωγός Trans Adriatic Pipeline (TAP)

Ο TAP είναι ένας αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου, ο οποίος προτάθηκε το 2003, άρχισε να κατασκευάζεται το 2016 και ξεκίνησε να λειτουργεί το 2020. Έχει σα σκοπό τη μεταφορά φυσικού αερίου, από το Αζερμπαϊτζάν (κυρίως από το κοίτασμα Shah Deniz II στην Κασπία Θάλασσα) στην Ευρώπη. Η Ελλάδα συνδέεται με αυτόν μέσω του αγωγού φυσικού αερίου Ανατολίας (TANAP). Ξεκινάει από τα Ελληνο-Τουρκικά σύνορα στον Έβρο, διασχίζει τη Βόρεια Ελλάδα, συνεχίζει στην Αλβανία κι έπειτα υποθαλάσσια μέσω της Αδριατικής Θάλασσας φτάνει στην Ιταλία. Καλύπτει μήκος περίπου 880 χιλιομέτρων, 550 εκ των οποίων είναι στην περιοχή της Ελλάδας, 215 στη περιοχή της Αλβανίας και 10 στις Ιταλίας.

Χερσαίο τμήμα αγωγού: Η κατασκευή του αγωγού περιλάμβανε επίσης αποκατάσταση αρκετών δρόμων πρόσβασης και γεφυρών στις φιλοξενούσες χώρες. Η όδευση του TAP διαμορφώθηκε κατάλληλα, πραγματοποιήθηκε εκσκαφή της τάφρου, οι αγωγοί συγκολλήθηκαν κι έπειτα τοποθετήθηκαν στο έδαφος. Τέλος, η τάφρος επιχωματώθηκε και η γη αποκαταστάθηκε. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές κατασκευής, σε ότι αφορά την διέλευση ποταμών και δρόμων, με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος.

Υποθαλάσσιο τμήμα αγωγού: Δεδομένης της δυσκολίας τοποθέτησης σωλήνων στην Αδριατική Θάλασσα σε βάθος 800 μέτρων υπήρξε συνεργασία με την εταιρία Saipem, στην οποία ανατέθηκε η τοποθέτηση του υποθαλάσσιου τμήματος του αγωγού, με τη χρήση ειδικού ημι-βυθιζόμενου σκάφους. Το Φεβρουάριο του 2018, ο TAP πραγματοποίησε ένα μηχανικό επίτευγμα παγκοσμίου κλάσης κοντά στο χωριό Ελαιούσα της Κεντρικής Μακεδονίας, με την εγκατάσταση σωλήνα μεγάλου μήκους με διάτρηση, σε μία μόνο διέλευση. Πιο συγκεκριμένα, πέρασε τμήμα αγωγού 1.820 μέτρων κάτω από τον Αξιό ποταμό, με οριζόντια κατευθυνόμενη διάτρηση.



**Εικόνα 1.10:** Χάρξη του αγωγού TAP.  
Πηγή: Trans Adriatic Pipeline

Ο TAP έχει συνολικό μήκος 878 χιλιόμετρα. Το χερσαίο τμήμα του αγωγού εκτείνεται σε απόσταση 773 χιλιομέτρων ενώ το υποθαλάσσιο έχει μήκος 105 χιλιόμετρα. Η διάμετρος του χερσαίου τμήματος σε Ελλάδα και Αλβανία ισούται με 48 ίντσες (120 εκατοστά περίπου) ενώ η διάμετρος του υποθαλάσσιου αγωγού και του χερσαίου τμήματος της Ιταλίας είναι ίση με 36 ίντσες (περίπου 91 εκατοστά). Το πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού ποικίλει από 20 έως και 34 χιλιοστά ανάλογα με το βάθος τοποθέτησης. Το υψηλότερο σημείο του αγωγού βρίσκεται στα βουνά της Αλβανίας σε υψόμετρο 2100 μέτρων ενώ το βαθύτερο σημείο του αγωγού στην Αδριατική Θάλασσα βρίσκεται σε βάθος 810 μέτρων.

### **1.3.3 Αγωγός Φυσικού Αερίου Ανατολίας TANAP**

Ο TANAP είναι ένας αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου που βρίσκεται στην Τουρκία και αποτελεί το κεντρικό τμήμα του Νότιου Διαδρόμου Φυσικού Αερίου (Southern Gas Corridor), που συνδέει το γιγάντιο κοιτάσμα Φυσικού Αερίου στο Shah Deniz στο Αζερμπαϊτζάν, με την Ευρώπη, μέσω του αγωγού του Νοτίου Καυκάσου (South Caucasus Pipeline) και του Διαδριατικού αγωγού φυσικού αερίου (TAP). Ο αγωγός είναι στρατηγικής σημασίας τόσο για το Αζερμπαϊτζάν όσο και για τη Τουρκία. Επιτρέπει τις πρώτες εξαγωγές φυσικού αερίου από το Αζερμπαϊτζάν στην Ευρώπη μέσω Τουρκίας κι ενισχύει το ρόλο της τελευταίας ως περιφερειακού ενεργειακού κόμβου. Η κατασκευή του ξεκίνησε το Μάρτιο του 2015 και εγκαινιάστηκε τον Ιούνιο του 2018. Το κόστος του εκτιμάται στα 10-11 δισεκατομμύρια δολάρια.

### **1.3.4 Αγωγός South Stream**

Με στόχο τη μεταφορά φυσικού αερίου της Ρωσικής Ομοσπονδίας μέσω της Μαύρης Θάλασσας στη Βουλγαρία και μέσω της Σερβίας, της Ουγγαρίας και της Σλοβενίας περαιτέρω στην Αυστρία, σχεδιάστηκε ένας αγωγός, ο οποίος πήρε το όνομα South Stream. Η ρωσική κυβέρνηση ακύρωσε το έργο κατασκευής το 2014, ύστερα από τη διαπίστωση μη συμμόρφωσης του έργου με τη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με το Τρίτο Ενεργειακό Πακέτο. Ο αγωγός θεωρήθηκε ανταγωνιστικός του έργου Nabucco, το οποίο επίσης εγκαταλείφθηκε εξαιτίας του Trans Adriatic Pipeline.

Ο αγωγός TAP σε αντίθεση με τον South Stream, συμμορφώνεται πλήρως με τη νομοθεσία της ΕΕ μέσω της εξασφάλισης της εξαίρεσης πρόσβασης τρίτων στην ΕΕ. Η κατασκευή των ρωσικών χερσαίων εγκαταστάσεων για τον South Stream ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2012. Το έργο ακυρώθηκε από τη Ρωσία τον Δεκέμβριο του 2014 μετά από εμπόδια από την Ευρωπαϊκή Ένωση, τη ρωσική προσάρτηση της Κριμαίας και την επακόλουθη επιβολή ευρωπαϊκών κυρώσεων στη Ρωσία. Το έργο έχει αντικατασταθεί από τον προτεινόμενο αγωγό Tesla και τον Turkish Stream ο οποίος μετονομάστηκε σε TurkStream, εγκρίθηκε και ολοκληρώθηκε αργότερα, στέλνοντας φυσικό αέριο στη Βουλγαρία την 1η Ιανουαρίου 2020

### 1.3.5 Αγωγός Νοτίου Καυκάσου South Caucasus Pipeline

Ο SCP είναι ένας αγωγός, που μεταφέρει φυσικό αέριο από το κοίτασμα Shah Deniz της Κασπίας θάλασσας προς το Αζερμπαϊτζάν, τη Γεωργία και την Τουρκία. Πρόκειται για έναν αγωγό μήκους 692 χιλιομέτρων (443 χλμ. στο Αζερμπαϊτζάν και 249 χλμ. στη Γεωργία) και διαμέτρου 42 ιντσών. Ο αγωγός κατασκευάστηκε για τη μεταφορά φυσικού αερίου από το κοίτασμα Σαχ Ντενίζ (Shah Deniz) στα σύνορα Γεωργίας – Τουρκίας και ξεκίνησε να παραδίδει αέριο το Σεπτέμβριο του 2006. Σε όλη τη διαδρομή του ο αγωγός βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και έχει σχεδιαστεί με διάρκεια ζωής τα 30 έτη.

Για να έχει ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον, ο SCP κατασκευάστηκε στον ίδιο διάδρομο με τον αγωγό BTC (Baku – Tbilisi – Ceyhan Pipeline). Ανήκει στην «South Caucasus Pipeline Company Limited». Η ετήσια μεταφορική ικανότητα ανερχόταν στα 7,4 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (bcm). Το σύστημα του SCP αποφασίστηκε να επεκταθεί - έργο SCPX - ως μέρος της ανάπτυξης του κοιτάσματος Shah Deniz II και να συνδεθεί με τον TANAP.

Για τη πραγματοποίηση της επέκτασης απαιτήθηκε η κατασκευή ενός νέου αγωγού 48 ιντσών στα εδάφη του Αζερμπαϊτζάν και της Γεωργίας. Το έργο περιλαμβάνει και την κατασκευή ορισμένων εγκαταστάσεων. Μεταξύ άλλων, δύο νέους σταθμούς συμπίεσης στη Γεωργία, δύο ενδιάμεσους σταθμούς (ένας στο Αζερμπαϊτζάν και ένας στη Γεωργία), σταθμούς μείωσης πίεσης και μέτρησης στα διεθνή σύνορα και τη διασύνδεση με τον TANAP στα σύνορα Γεωργίας-Τουρκίας. Ο νέος αγωγός έχει μήκος περίπου 489 χιλιόμετρα (424 χλμ. στο Αζερμπαϊτζάν, 63 χλμ. στη Γεωργία και 2 χλμ. στη διασύνδεση TANAP) και ξεκίνησε να λειτουργεί στις 30 Ιουνίου 2018. Ως αποτέλεσμα της επέκτασης, η ικανότητα διακίνησης του SCP έφτασε περίπου τα 24 bcm, που τριπλασίασε την τρέχουσα συνολική μεταφορική ικανότητα του συστήματος. Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος SCP μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω έως και 31 bcm εάν χρειαστεί.

Σύμφωνα με την υπεύθυνη εταιρία η εκτέλεση του έργου SCPX βασίζεται σε μια συνολική φιλοσοφία ασφαλούς σχεδιασμού και ποιότητας κατασκευής. Η Γεωργία επωφελείται ως αποδέκτης του φυσικού αερίου Shah Deniz Stage II, αλλά και απευθείας από την επέκταση του αγωγού στον Νότιο Καύκασο. Περίπου 2.000 τοπικές θέσεις εργασίας δημιουργήθηκαν σε κατασκευαστικά έργα.

### 1.3.6 Αγωγός Φυσικού Αερίου Ελλάδος – Βορείου Μακεδονίας

Η Ελλάδα μπορεί να μετατραπεί σε κόμβο διαμετακόμισης φυσικού αερίου στα Βαλκάνια, μέσω της ενεργειακής διπλωματίας και της ανάπτυξης του Νοτίου Διαδρόμου (TAP). Η Βόρεια Μακεδονία αποτελεί μια χώρα η οποία τροφοδοτείται σε αποκλειστικότητα με ρωσικό φυσικό αέριο, μέσω του αγωγού TBP (Trans Balkan Pipeline). Ωστόσο ενδιαφέρεται για την απεξάρτησή της από αυτό, όπως επίσης επιθυμεί την προώθηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Είναι γεγονός ότι η ενεργειακή διπλωματία, δημιουργεί δεσμούς και αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των κρατών. Γενικότερα, ο Νότιος Διάδρομος, συμβάλει στην επίτευξη των στόχων της ενεργειακής ασφάλειας και αποτελεί μια ενεργειακή διέλευση εξαιρετικής σημασίας, σε σχέση και με την ανάπτυξη των κάθετων αξόνων. Στο Νότιο Διάδρομο

περιλαμβάνονται επίσης οι αγωγοί SCPX (South Caucasus Pipeline Expansion) και TANAP (Trans-Anatolian Pipeline). Τα εμπλεκόμενα μέρη (ΔΕΣΦΑ και MER Skopje) έχουν προβεί στην υπογραφή του Μνημονίου Κατανόησης για τη κατασκευή του Διασυνδετήριου αγωγού Ελλάδας- Βόρειας Μακεδονίας και τα βήματα προς αυτή τη κατεύθυνση πραγματοποιούνται γρήγορα.

Σε αυτό το πλαίσιο, η Ελλάδα υποστηρίζει ενθέρμως και την επέκταση της δυναμικότητας του TAP, μέσω της κατασκευής ενός δεύτερου σταθμού συμπίεσης στις Σέρρες. Η διασύνδεση της Βόρειας Μακεδονίας με την Ελλάδα (και κυρίως με το υφιστάμενο δίκτυο του αγωγού Trans Adriatic Pipeline) θα δώσει τη δυνατότητα στη Βόρεια Μακεδονία να μειώσει σημαντικά την εξάρτησή της από το ρωσικό φυσικό αέριο. Πιο συγκεκριμένα, ο αγωγός προβλέπεται να ξεκινά από τη Νέα Μεσημβρία στην Ελλάδα και να καταλήγει στο Negotino των Σκοπίων. Η ετήσια ποσότητα μεταφοράς αερίου αναμένεται να ξεπεράσει το 1 δισεκατομμύριο κυβικά μέτρα bcm (billion cubic meters). Το μήκος του ελληνικού τμήματος του αγωγού θα είναι περίπου 57 χιλιόμετρα, μέχρι τη περιοχή των Ευζώνων. Αυτό το σημείο θα αποτελέσει και την αφετηρία του δεύτερου σκέλους του εν λόγω αγωγού, το οποίο θα έχει μήκος που ανέρχεται σε περίπου 68 χιλιόμετρα.

### 1.3.7 Διασυνδετήρας Αγωγός Ελλάδας – Βουλγαρίας (IGB)

Το έργο του Ελληνο-Βουλγαρικού Διασυνδετήριου αγωγού (IGB) αποτελείται από έναν αγωγό μήκους περίπου 182 χιλιομέτρων, με τα 31 από αυτά να βρίσκονται επί ελληνικού εδάφους, καθώς και από τις αναγκαίες υποστηρικτικές εγκαταστάσεις (Μετρητικούς σταθμούς, βανοστάσια, Κέντρο λειτουργίας). Ως σημείο εκκίνησης έχει επιλεγεί η Κομοτηνή, ενώ ο αγωγός θα καταλήγει στη Stara Zagora, συνδέοντας τα δίκτυα φυσικού αερίου της Ελλάδας και της Βουλγαρίας. Θα υπάρχει επίσης δυνατότητα αντίστροφης ροής (reverse flow) ενώ τέλος, προβλέπεται ο αγωγός να συνδέεται και με τον Διαδριατικό αγωγό φυσικού αερίου (TAP). Ο αγωγός IGB έχει αρχική δυναμικότητα τα 3 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως, με δυνατότητα όμως αύξησης τους στα 5, με την κατασκευή Σταθμού Συμπίεσης.



**Εικόνα 1.11:** Χάραξη του αγωγού IGB. Πηγή: BusinessDaily.gr

### 1.3.8 Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου ΔΕΣΦΑ

Το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου μεταφέρει φυσικό αέριο από τα ελληνοβουλγαρικά και ελληνοτουρκικά σύνορα σε καταναλωτές εγκατεστημένους στην ηπειρωτική Ελλάδα. Πρόκειται για ένα Σύστημα Φυσικού Αερίου (υψηλής πίεσης) το οποίο αποτελείται από:

- Τον κεντρικό αγωγό μεταφοράς αερίου και τους κλάδους αυτού
- Τους Μετρητικούς Σταθμούς Συνόρων Σιδηροκάστρου Σερρών και Κήπων Έβρου
- Το Σταθμό Συμπίεσης στη Νέα Μεσημβρία Θεσσαλονίκης
- Τους Μετρητικούς και Ρυθμιστικούς σταθμούς φυσικού αερίου
- Τα Κέντρα Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου
- Τα Κέντρα Λειτουργίας και Συντήρησης του Μετρητικού Σταθμού Συνόρων Σιδηροκάστρου, Ανατολικής Ελλάδος, Βορείου Ελλάδος, Κεντρικής Ελλάδος και Νοτίου Ελλάδος
- Το σύστημα Τηλεελέγχου και Τηλεπικοινωνιών.

Ο ΔΕΣΦΑ είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ροής του φυσικού αερίου, τη διασφάλιση της ακεραιότητας και της ασφάλειας του συστήματος και τον συντονισμό με τους προμηθευτές, τους διανομείς και τους πελάτες φυσικού αερίου. Διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διευκόλυνση των εισαγωγών και εξαγωγών φυσικού αερίου, συμβάλλοντας στην ενεργειακή διαφοροποίηση της Ελλάδας και στην περιφερειακή ενεργειακή ολοκλήρωση. Το Ελληνικό Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου ρυθμίζεται από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) στην Ελλάδα, η οποία επιβλέπει τη λειτουργία, την ανάπτυξη και την τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς φυσικού αερίου. Το σύστημα λειτουργεί σύμφωνα με τους κανονισμούς και τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε να διασφαλίζεται η αποτελεσματική λειτουργία.

Η ανάπτυξη και η επέκταση του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένης της διασύνδεσης με άλλα περιφερειακά δίκτυα φυσικού αερίου, αποτελούν σημαντικές προτεραιότητες για την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, την προώθηση του ανταγωνισμού και την προώθηση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων και εναλλακτικών αερίων στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Κανονιστικές Οδηγίες Αγωγών

---

### 2.1 Ρυθμιστικά Πλαίσια σε Ελλάδα & Ευρώπη

Στην Ελλάδα, οι ρυθμιστικές κατευθυντήριες γραμμές που αφορούν τα δίκτυα αγωγών υδρογονανθράκων διέπονται κυρίως από τους ακόλουθους νόμους και κανονισμούς:

1. Νόμος αριθ. 3428/2005: Ο νόμος αυτός, θεσπίζει το νομικό πλαίσιο για την ανάπτυξη, τη λειτουργία και τη συντήρηση των ενεργειακών υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών υδρογονανθράκων. Επίσης, περιγράφει τις διαδικασίες για την απόκτηση αδειών και εγκρίσεων για την κατασκευή και λειτουργία τέτοιων αγωγών. Ασχολείται τέλος, με τις απαιτήσεις ασφαλείας, την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και τα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις των φορέων εκμετάλλευσης αγωγών.
2. Υπουργική απόφαση 148459/1581/2005: Η απόφαση αυτή συμπληρώνει τον προαναφερθέντα νόμο και παρέχει περαιτέρω λεπτομερείς κανονισμούς και τεχνικές απαιτήσεις για τους αγωγούς υδρογονανθράκων στην Ελλάδα. Καλύπτει πτυχές όπως τα πρότυπα σχεδιασμού και κατασκευής, τα μέτρα ασφαλείας, τη διαχείριση της ακεραιότητας των αγωγών, τις διαδικασίες επιθεώρησης και συντήρησης, τα σχέδια αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης και τις υποχρεώσεις υποβολής εκθέσεων.
3. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ): Η ΡΑΕ διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τους ισχύοντες νόμους, κανονισμούς και απαιτήσεις αδειοδότησης. Εξετάζει και εγκρίνει τις αιτήσεις για άδειες και εγκρίσεις αγωγών, παρακολουθεί τη λειτουργία των αγωγών και καθορίζει τα τιμολόγια για τη μεταφορά υδρογονανθράκων μέσω αγωγών.
4. Περιβαλλοντικές άδειες και αξιολογήσεις: Οι αγωγοί υδρογονανθράκων στην Ελλάδα υπόκεινται σε περιβαλλοντικούς κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για περιβαλλοντικές άδειες και εκτιμήσεις επιπτώσεων. Οι απαιτήσεις αυτές διασφαλίζουν ότι τα έργα αγωγών αξιολογούνται ως προς τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους και ότι εφαρμόζονται κατάλληλα μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων.
5. Πρότυπα ασφαλείας: Οι αγωγοί υδρογονανθράκων στην Ελλάδα πρέπει να τηρούν πρότυπα ασφαλείας για να διασφαλίζεται η προστασία των ανθρώπων, της περιουσίας και του περιβάλλοντος. Τα πρότυπα αυτά καλύπτουν πτυχές όπως ο σχεδιασμός των αγωγών, η κατασκευή, τα υλικά, η προστασία από τη διάβρωση, τα συστήματα ανίχνευσης διαρροών, τα συστήματα διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης και η διαχείριση της ακεραιότητας των αγωγών.

Οι εν λόγω νόμοι και κανονισμοί παρέχουν το πλαίσιο για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής λειτουργίας των αγωγών υδρογονανθράκων, προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον και τα συμφέροντα των εμπλεκόμενων φορέων. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), οι κανονιστικές κατευθυντήριες γραμμές για τα δίκτυα αγωγών υδρογονανθράκων διέπονται κυρίως από διάφορες βασικές οδηγίες και κανονισμούς. Παρατίθενται μερικά από τα σημαντικά κανονιστικά πλαίσια:

1. Οδηγία για το φυσικό αέριο (2009/73/ΕΚ): Η οδηγία αυτή καθορίζει ορισμένους κανόνες για την αγορά φυσικού αερίου της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς φυσικού αερίου μέσω αγωγών. Προωθεί την απελευθέρωση της αγοράς, την άνευ διακρίσεων πρόσβαση σε υποδομές αγωγών και τον διαχωρισμό των δραστηριοτήτων μεταφοράς και προμήθειας φυσικού αερίου. Αντιμετωπίζει επίσης ζητήματα που σχετίζονται με την πρόσβαση τρίτων, τα τιμολόγια, τη διαφάνεια και την ασφάλεια του εφοδιασμού.
2. Οδηγία για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (2011/92/ΕΕ): Η οδηγία για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΕΠΕ) θεσπίζει διαδικασίες για την εκτίμηση και τη διαχείριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των έργων υποδομής, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών υδρογονανθράκων. Απαιτεί από τους κατασκευαστές έργων, εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και λήψη αδειών, πριν από την έναρξη της κατασκευής. Η οδηγία διασφαλίζει ότι οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξετάζονται και μετριάζονται.
3. Οδηγία Seveso III (2012/18/ΕΕ): Επικεντρώνεται στον έλεγχο των κινδύνων μεγάλων ατυχημάτων που αφορούν επικίνδυνες ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των υδρογονανθράκων. Καθορίζει απαιτήσεις ασφαλείας για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων τερματικών σταθμών αγωγών και εγκαταστάσεων αποθήκευσης, για την πρόληψη και τον έλεγχο των κινδύνων μεγάλων ατυχημάτων. Αντιμετωπίζει θέματα όπως η εκτίμηση κινδύνου, ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης και η ανταλλαγή πληροφοριών.
4. Κανονισμός για τα ΔΕΔ-Ε (2013/347/ΕΕ): Ο κανονισμός για τα Διευρωπαϊκά Δίκτυα Ενέργειας (ΔΕΔ-Ε) προσδιορίζει τα έργα ενεργειακών υποδομών προτεραιότητας, συμπεριλαμβανομένων των διασυνοριακών αγωγών φυσικού αερίου, στην ΕΕ. Στόχος του είναι να ενισχύσει την ενεργειακή συνδεσιμότητα, να προωθήσει την ασφάλεια του εφοδιασμού και να συμβάλει στην επίτευξη των ενεργειακών και κλιματικών στόχων της ΕΕ. Ο κανονισμός περιγράφει τις διαδικασίες για την επιλογή των έργων, την αδειοδότηση και τη χρηματοδοτική στήριξη.
5. Κανονισμοί για την απελευθέρωση της αγοράς και τον ανταγωνισμό: Η ΕΕ έχει εφαρμόσει διάφορους κανονισμούς για την προώθηση της απελευθέρωσης της αγοράς και του ανταγωνισμού στον τομέα της ενέργειας.

Σε αυτούς περιλαμβάνεται η τρίτη δέσμη μέτρων για την ενέργεια, η οποία αποτελείται από οδηγίες και κανονισμούς για τον διαχωρισμό των

δραστηριοτήτων μεταφοράς και διανομής, την ενίσχυση της διαφάνειας της αγοράς και την προώθηση του ανταγωνισμού στους τομείς του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας.

6. Ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου: Οι Ευρωπαϊκοί Κώδικες Δικτύων είναι σύνολα τεχνικών κανόνων και προτύπων που εναρμονίζουν τη λειτουργία, τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των διασυνοριακών δικτύων μεταφοράς φυσικού αερίου εντός της ΕΕ. Καλύπτουν πτυχές όπως η ποιότητα του φυσικού αερίου, η σύνδεση με το δίκτυο, η κατανομή δυναμικότητας, η εξισορρόπηση και οι μεθοδολογίες τιμολόγησης. Οι κώδικες δικτύου αναπτύσσονται από τον Οργανισμό Συνεργασίας των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας (ACER) σε συντονισμό με τα ενδιαφερόμενα μέρη.

## 2.2 Αλληλεπίδραση Αγωγού - Εδάφους

Το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί ως συνεκτικό (δηλαδή αργιλώδες) ή μη συνεκτικό (δηλαδή αμμώδες). Υπάρχουν ορισμένες βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους:

- Οι εδαφικές τάσεις
- Ο τύπος του εδάφους
- Ο συντελεστής απόσβεσης
- Ορισμένα γενικά δεδομένα του εδάφους, όπως η γωνία τριβής συνεκτικών εδαφών ( $\Phi_s$ ), το ειδικό βάρος ( $\gamma_{soil}$ ), ο λόγος κενών ( $e_s$ ), ο δείκτης στερεοποίησης (OSR), ο δείκτης πλαστικότητας ( $I_p$ ), η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για συνεκτικά εδάφη ( $s_u$ ) κ.α.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι υπολογίζονται με τη βοήθεια κατάλληλων γεωτεχνικών δοκιμών σε ένα καλό εδαφικό δείγμα και είναι αντιπροσωπευτικοί για την γεωγραφική θέση του αγωγού. Στο Πίνακα 2.1 και στο Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται διάφορες τιμές παραμέτρων για αμμώδη και αργιλικά εδάφη αντίστοιχα.

**Πίνακας 2.1:** Τιμές παραμέτρων για αμμώδη εδάφη

Τύπος Εδάφους	Μαλακό	Μέσης Πυκνότητας	Πυκνό
$\Phi_s$	28 – 30	30 - 36	36 – 41
$\gamma_{soil} = \text{kN} / \text{m}^3$	8.5 – 11.0	9.0 – 12.5	10.0 – 13.5
$\nu$	0.35	0.35	0.35
$e_s$	0.7 – 0.9	0.5 – 0.8	0.4 – 0.6

**Πίνακας 2.2:** Τιμές παραμέτρων για αργιλικά εδάφη.

Τύπος Εδάφους	Πολύ Μαλακό	Μαλακό	Σταθερό	Πολύ Σταθερό	Σκληρό
$S_u = \text{kN} / \text{m}^2$	<12.5	12.5 – 25	25 – 50	100 – 200	>200
$\gamma_{\text{soil}}$	4 – 7	5 – 8	6 – 11	10 – 13	10 – 13
$\nu$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
$e_s$	1.0 – 3.0	0.8 – 2.5	0.5 – 2.0	0.3 – 0.9	0.3 – 0.9

Φυσικά, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να λαμβάνονται υπόψιν και οι διάφορες αβεβαιότητες σχετικά με το έδαφος όπως για παράδειγμα οι μεταβολές των συνθηκών του εδάφους κατά μήκος της διαδρομής που διανύει ο αγωγός. Ακόμη πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και οι δυσκολίες σχετικά με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών που αφορούν το ανώτερο στρώμα του εδάφους το οποίο αποτελεί και το σημαντικότερο για τον αγωγό. Γενικά χρειάζεται μια χαμηλή αντοχή εδάφους για τον αγωγό (DNV – RP – F105, 2006).

Στην περίπτωση των υπόγειων αγωγών, η προτεινόμενη μεθοδολογία που από τον Αμερικάνικο κανονισμό ALA (American Lifelines Alliance), είναι η πιο διαδεδομένη. Ο παραπάνω κανονισμός υπολογίζει τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης τόσο για συνεκτικά όσο και μη συνεκτικά εδάφη (είτε ξηρά, είτε κορεσμένα). Μάλιστα σύμφωνα πάντα με τον εν λόγω κανονισμό, η αλληλεπίδραση εδάφους – αγωγού, εμφανίζεται ως διγραμμική ελαστο- πλαστική σε όλες τις διευθύνσεις (αξονικά, πλευρικά, κατακόρυφα). Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μέγιστες δυνάμεις αλληλεπίδρασης του συστήματος αγωγού – εδάφους για αξονική, πλευρική και κατακόρυφη (άνωθεν και κάτωθεν) διεύθυνση.

Ακόμη, παρουσιάζεται και ο Πίνακας 2.3 στον οποίο εμπεριέχονται οι μετατοπίσεις (σε mm) για την ενεργοποίηση των μέγιστων αυτών δυνάμεων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, πως πριν τις μετατοπίσεις εδάφους και αγωγού που φαίνονται στο Πίνακα 2.3, η αλληλεπίδραση του συστήματος εδάφους αγωγού-

αγωγών είναι ελαστική και αυξάνεται όσο αυξάνεται η μετατόπιση. Ύστερα από τις μετατοπίσεις αυτές, η δύναμη που ασκείται στον αγωγό παραμένει σταθερή.

- Μέγιστη δύναμη για αξονική διεύθυνση:

$$f_u = \pi * D * \alpha_f * c + \pi * D * H_b * \gamma' * \frac{1 + K_o}{2} * \tan k * \varphi$$

Όπου το D εκφράζει τη διάμετρο, το  $\alpha_f$  τον συντελεστή προσκόλλησης, το c τη συνοχή, το  $H_b$  το βάθος επίχωσης, το  $\gamma'$  το ενεργό ειδικό βάρος, το  $K_o$  το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων, το k το συντελεστή απομείωσης τριβής και το  $\varphi$  τη γωνία εσωτερικής τριβής.

- Μέγιστη δύναμη για πλευρική διεύθυνση:

$$p_u = N_{ch} * c * D + N_{qh} * \gamma' * H_b * D$$

Όπου το  $N_{ch}$  και το  $N_{qh}$  είναι συντελεστές πλευρικής φέρουσας ικανότητας

- Μέγιστη δύναμη για άνωθεν κατακόρυφη διεύθυνση:

$$q_{up,u} = N_{cv} * c * D + N_{qv} * \gamma' * H_b * D$$

Όπου το  $N_{cv}$  και το  $N_{qv}$  είναι συντελεστές άνωθεν κατακόρυφης φέρουσας ικανότητας.

- Μέγιστη δύναμη για κάτωθεν κατακόρυφη διεύθυνση:

$$q_{down,u} = N_c * c * D + N_q * \gamma' * H_b * D + N_\gamma * \gamma * D$$

Όπου το  $N_c$ , το  $N_q$  και το  $N_\gamma$  είναι συντελεστές φέρουσας ικανότητας και το  $\gamma'$  εκφράζει το ολικό ειδικό βάρος.

**Πίνακας 2.3.** Τιμές δυνάμεων αλληλεπίδρασης και σχετικών μετατοπίσεων.

		Αξονική $x_u$ (mm)	Πλευρική $y_u$ (mm)	Άνωθεν $z_u$ (mm)	Κάτωθεν $z_u$ (mm)
<b>Αργίλος</b>	Μαλακή	10	0.04 $* \left( H_b + \frac{D}{2} \right)$	0.2 $H_b$	0.2D
	Στριφή	8		0.1 $H_b$	
<b>Άμμος</b>	Πυκνή	5		0.02 $H_b$	0.1D
	Χαλαρή	3		0.01 $H_b$	

## 2.3 Αντίσταση Εδάφους

Την αντίσταση του εδάφους θα μπορούσαμε να την χωρίσουμε στην τριβή (που ονομάζεται Coulomb) και στην παθητική αντίσταση που οφείλεται στην συσσώρευση εδάφους, καθώς ο αγωγός μετακινείται πλαγίως. Στην περίπτωση άμμου – αγωγού, σημαντικότεροι παράμετροι για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης είναι ο συντελεστής τριβής και το κορεσμένο ειδικό βάρος της άμμου.

Άργιλος ονομάζεται το έδαφος εκείνο, που δεν είναι διαπερατό κι έχει μια σημαντική συνεκτικότητα ενώ ως βράχος ορίζεται το έδαφος εκείνο του οποίου τα σωματίδια ξεπερνούν σε διάμετρο τα 50mm σε ποσοστό 50% .

Η τιμή του συντελεστή τριβής ( $\mu$ ) για αγωγό με επικάλυψη από σκυρόδεμα μπορεί να ληφθεί ίση με :

- 0.6 για άμμο
- 0.2 για άργιλο
- 0.6 για βράχο

## 2.4 . Μέτρα Προστασίας

Τα μέτρα προστασίας των αγωγών υδρογονανθράκων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή και αποτελεσματική μεταφορά τους κι εφαρμόζονται για την πρόληψη βλαβών, διαρροών και άλλων πιθανών κινδύνων που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο το περιβάλλον, τη δημόσια ασφάλεια και την ακεραιότητα της υποδομής του αγωγού. Ανάλογα με τη χώρα, τα ρυθμιστικά και κανονιστικά πλαίσια σχετικά με τα δίκτυα αγωγών, καθώς και τα μέτρα που λαμβάνονται με σκοπό την προστασία τους, ενδέχεται να διαφέρουν. Ορισμένα κοινά μέτρα προστασίας είναι τα εξής:

1. Right of Way Management (ROW): Η ικανότητα μιας αρχής, να ρυθμίζει και να ελέγχει τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα εντός της ιδιοκτησίας της. Η τακτική επιθεώρηση είναι απαραίτητη για την αποτροπή καταπατήσεων, όπως κατασκευαστικές δραστηριότητες ή εκσκαφές και της ανάπτυξης βλάστησης, που θα μπορούσαν να βλάψουν τον αγωγό. Ο καθαρισμός της βλάστησης, ο έλεγχος της διάβρωσης και η παρακολούθηση της οδού διέλευσης για τυχόν ενδείξεις αστάθειας ή πιθανών απειλών αποτελούν βασικές πτυχές αυτού του μέτρου.
2. Επικαλύψεις αγωγών και καθοδική προστασία (Pipeline Coatings and Cathodic Protection) : Στον αγωγό εφαρμόζονται προστατευτικές επιστρώσεις στοχεύοντας στην πρόληψη της διάβρωσης και της διατήρησης της δομικής του ακεραιότητας. Για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας του αγωγού χρησιμοποιούνται συστήματα «καθοδικής προστασίας», όπως η γαλβανική άνοδος (Galvanic anode) ή τα συστήματα «εντυπωσιακού ρεύματος» (impressed current system) που παράγουν προστατευτικό ρεύμα, εμποδίζοντας έτσι τη διάβρωση και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του αγωγού.
3. Επίστρωση και μόνωση (Coating and insulation): Οι επιστρώσεις και τα μονωτικά υλικά των αγωγών εφαρμόζονται για την προστασία του αγωγού

από εξωτερικούς παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση, όπως η υγρασία του εδάφους, τα χημικά και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Οι επικαλύψεις μπορεί να περιλαμβάνουν εποξειδικά, πολυαιθυλένιο ή άλλα υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση, ενώ η μόνωση συμβάλλει στη διατήρηση της θερμοκρασίας των μεταφερόμενων υδρογονανθράκων, μειώνοντας τον κίνδυνο βλάβης του αγωγού.

4. Συστήματα ανίχνευσης διαρροών (Leak Detection Systems) : Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες και συστήματα παρακολούθησης για την ανίχνευση διαρροών ή μη φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας σε αγωγούς υδρογονανθράκων. Τα συστήματα αυτά μπορούν να περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως αισθητήρες οπτικών ινών, ακουστική παρακολούθηση, παρακολούθηση πίεσης – ροής, χρήση προηγμένων αλγορίθμων ανίχνευσης διαρροών κ.α.
5. Ασφάλεια και παρακολούθηση (Security and Monitoring) : Οι φορείς εκμετάλλευσης αγωγών εφαρμόζουν μέτρα ασφαλείας με στόχο την προστασία των αγωγών από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, βανδαλισμούς και δολιοφθορές. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση περιμετρικών περιφράξεων, καμερών παρακολούθησης, συστημάτων ελέγχου πρόσβασης, περιπολιών ασφαλείας κ.α.  
Η παρακολούθηση της ακεραιότητας, της πίεσης, της θερμοκρασίας και άλλων λειτουργικών παραμέτρων του αγωγού σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών ή πιθανών απειλών.
6. Προγράμματα διαχείρισης ακεραιότητας (Integrity Management Programs): Η καθιέρωση ολοκληρωμένων προγραμμάτων διαχείρισης της ακεραιότητας είναι εξαιρετικής σημασίας για τον εντοπισμό και τον μετριασμό των πιθανών κινδύνων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αγωγού. Τα προγράμματα αυτά περιλαμβάνουν τακτικές επιθεωρήσεις, εκτιμήσεις ακεραιότητας, δραστηριότητες συντήρησης και ιεράρχηση των επισκευών ή αντικαταστάσεων με βάση τον κίνδυνο.
7. Συστήματα διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης (Emergency Shutdown Systems) : Η εγκατάσταση αυτοματοποιημένων συστημάτων διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης επιτρέπει τη γρήγορη απόκριση και την απομόνωση τμημάτων του αγωγού σε περίπτωση συμβάντος ή μη φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας. Τα συστήματα αυτά μπορούν να ενεργοποιηθούν εξ αποστάσεως ή από το παρευρισκόμενο προσωπικό για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος οποιασδήποτε πιθανής απελευθέρωσης.
8. Σχεδιασμός αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης (Emergency response planning) : Η κατάρτιση ολοκληρωμένων σχεδίων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση περιστατικών σε αγωγούς. Αυτό περιλαμβάνει την εκπαίδευση του προσωπικού, τον συντονισμό με τις υπηρεσίες αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, τη διεξαγωγή ασκήσεων και την ύπαρξη κατάλληλων πρωτοκόλλων για τον γρήγορο μετριασμό τυχόν περιστατικών και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεών τους.
9. Ευαισθητοποίηση του κοινού και αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης (Public Awareness and Emergency Response) : Η ενημέρωση του κοινού, των

τοπικών κοινοτήτων και των φορέων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης σχετικά με την παρουσία του αγωγού, τους σχετικούς κινδύνους και τις κατάλληλες διαδικασίες αντιμετώπισης είναι ζωτικής σημασίας. Η διενέργεια τακτικών ασκήσεων για τη δοκιμή των σχεδίων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης και ο συντονισμός με τις τοπικές αρχές συμβάλλουν στη διασφάλιση έγκαιρης και αποτελεσματικής αντίδρασης σε περίπτωση συμβάντος.

Εμβαθύνοντας λίγο, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει ένας αγωγός μεταφοράς υδρογονανθράκων, είναι οι διαρροές του μεταφερόμενου προϊόντος. Ο όρος διαρροή περιγράφει τη διαφυγή του ρευστού έξω από τον αγωγό. Σε αρκετές περιπτώσεις το μεταφερόμενο υλικό είναι τοξικό, εύφλεκτο ή διαβρωτικό. Οι συνέπειες από μια διαρροή ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα καταστροφικές για το περιβάλλον και την οικονομία, ενώ συχνά μπορεί να δημιουργήσει απειλή για την ανθρώπινη ζωή.

Μερικά ακόμη μέτρα, τα οποία στοχεύουν στον περιορισμό κυρίως των διαρροών (αλλά και των άλλων κινδύνων) παρουσιάζονται συνοπτικά από κάτω.

- Η κατάλληλη διαστασιολόγηση του αγωγού
- Η επιλογή κατάλληλου πάχους
- Η ορθή επιλογή των τεχνικών συγκόλλησης και των υλικών επικάλυψης
- Η χρήση αξιόπιστων τεχνολογιών παρακολούθησης (ώστε να είναι δυνατή η άμεση αντίδραση).

Στην περίπτωση διαρροής, η όσφρηση, η όραση και η ακοή μπορούν να φανούν εξαιρετικά χρήσιμες στην αναγνώριση της.

Όσφρηση: Το ρευστό συνήθως έχει μία ιδιαίτερη, χαρακτηριστική οσμή.

Όραση: Η διαρροή συνδυάζεται πολύ συχνά, με φαινόμενα όπως, αποχρωματισμός της βλάστησης, στεγνό, ραγισμένο έδαφος, σύννεφο ατμού, φωτιά στο επίπεδο του εδάφους, εκτίναξη χρώματος από τρύπα στο έδαφος, κ.α.

Ακοή: Υπάρχει ένας δυνατός ήχος σαν σφύριγμα ή βοή.

Η ανίχνευση μιας διαρροής, αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία της διαχείρισης κινδύνου σε κάποιο σύστημα αγωγών. Έχουν αναπτυχθεί συστήματα των οποίων βασικός στόχος είναι η ανίχνευση και εντοπισμός τυχόν διαρροών.

Τεχνικές παρακολούθησης:

Οι τεχνικές παρακολούθησης διακρίνονται σε εξωτερικές και εσωτερικές. Στην πρώτη περίπτωση ο αισθητήρας μπορεί να τοποθετηθεί έξω από τον αγωγό, σε κάποιο σταθερό, ή μη, σημείο, με σκοπό να ανιχνεύει ενδεχόμενες διαρροές. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει το σημείο της διαρροής, ακόμα και για πολύ μικρές απώλειες. Στις εσωτερικές τεχνικές παρακολούθησης ο αισθητήρας τοποθετείται εντός του αγωγού. Αν υπάρχει μικρή διαρροή, παράγονται στο τοίχωμα του σωλήνα ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας οι οποίες ανιχνεύονται από ακουστικούς μετατροπείς (Aamo, 2006).



Για να διατηρηθεί η συνεχής ροή στον αγωγό απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η εξασφάλιση της ακεραιότητας του αγωγού κατά τη λειτουργία του. Πέρα από τα συστήματα παρακολούθησης έχουν αναπτυχθεί ορισμένα συστήματα διαχείρισης ασφάλειας, με τα κυριότερα να είναι:

- Συστήματα διαχείρισης διάβρωσης. Αναπτύχθηκαν με σκοπό τον περιορισμό και την εξάλειψη της διάβρωσης που ενδεχομένως θα εμφανισθεί σε κάποιον αγωγό λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ή λόγω του υλικού που μεταφέρει.
- Συστήματα διαχείρισης υπερτάσεων. Δημιουργήθηκαν με σκοπό την προστασία του αγωγού από τις ξαφνικές αλλαγές πίεσης.
- Βαλβίδες και ρυθμιστές. Αποτελούν βασικά εξαρτήματα ενός συστήματος αγωγών μέσω των οποίων οι χειριστές έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν και να ελέγχουν την πίεση και τη ροή του αερίου.
- Απόξεση του αγωγού. Είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται με καθορισμένη συχνότητα.

## 2.5 Κριτήρια Αστοχίας

Είναι αποδεκτό, ότι οι αγωγοί αποτελούν τον ασφαλέστερο τρόπο μεταφοράς υδρογονανθράκων. Βέβαια αυτό, δεν σημαίνει πως δεν έχουν σημειωθεί αστοχίες στο παρελθόν. Ως αστοχία ενός αγωγού, μπορεί να οριστεί η διαρροή του προϊόντος που μεταφέρεται από αυτόν και στη συνέχεια ανάλογα με το μέγεθος της διαρροής αυτής, αλλά και της γενικής κατάστασης του αγωγού (λειτουργικότητα) μπορεί να ονομαστεί μικρή, μεγάλη, ολική κ.α.

Σύμφωνα με την DNV τα κριτήρια αστοχίας καθορίζονται με βάση την κατηγορία της βλάβης. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν μικρή, μέτρια και μεγάλη βλάβη οι οποίες αναλύονται περισσότερο παρακάτω. Όπως αναφέρθηκε η βλάβη συνδέεται με διαρροή του προϊόντος. Η εκάστοτε διαρροή μπορεί, ανάλογα με το μέγεθος να οριστεί ως μηδενική, μικρή και σημαντική.

- Μικρές βλάβες (D1) : Μια κατηγορία βλαβών που δεν οδηγούν σε απελευθέρωση υδρογονανθράκων στο περιβάλλον και συνήθως δεν είναι απαραίτητη κάποια είδους επισκευή. Στα τοιχώματα του χαλύβδινου αγωγού χτυπήματα μεγέθους έως και 5% της διατομής, κανονικά δεν θα έχουν κάποια άμεση επίδραση στη λειτουργία. Φυσικά στην ενδεχόμενη περίπτωση μιας βλάβης θα πρέπει να υπάρξει επιθεώρηση και τεχνικές αξιολογήσεις με στόχο την επιβεβαίωση της δομικής ακεραιότητας του αγωγού.
- Μέτριες βλάβες (D2) : Μια κατηγορία βλαβών που χρήζει επισκευής παρόλο που δεν προκαλεί διαρροές υδρογονανθράκων. Η επισκευή μπορεί να αναβληθεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα στο οποίο ο αγωγός μπορεί να λειτουργήσει ( αφού έχει πραγματοποιηθεί η απαραίτητη επιθεώρηση ώστε να επιβεβαιωθεί η δομική του ακεραιότητα ).
- Σημαντικές βλάβες (D3) : Μια κατηγορία βλαβών η οποία συνεπάγεται την απελευθέρωση υδρογονανθράκων στο περιβάλλον . Σε τέτοια περίπτωση η διακοπή της λειτουργίας του αγωγού πρέπει να είναι άμεση ώστε να

αρχίσουν αμέσως οι απαραίτητες ενέργειες για την επισκευή της. Το τμήμα του αγωγού όπου παρατηρήθηκε η βλάβη πρέπει να αφαιρεθεί και να αντικατασταθεί.

Στην 3η περίπτωση, αυτήν των σημαντικών βλαβών, χρειάζεται να οριστεί και το μέγεθος της διαρροής του προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν 3 αντίστοιχες κατηγορίες και για τις διαρροές :

- Μηδενική διαρροή (R0) : Οι διαρροές δεν έχουν ξεκινήσει.
- Μικρή διαρροή (R1) : Μικρή ποσότητα προϊόντος έχει αρχίσει να απελευθερώνεται στο περιβάλλον από τα μικρά και μεσαία ανοίγματα στην επιφάνεια των τοιχωμάτων του αγωγού.
- Σημαντική διαρροή (R2) : Υπάρχει μεγάλη διάρρηξη στην επιφάνεια των τοιχωμάτων του αγωγού από την οποία έχει διαρρεύσει μεγάλη ποσότητα του μεταφερόμενου προϊόντος. Υπάρχει κίνδυνος πλήρους αστοχίας, κατάσταση κατά την οποία όλο το περιεχόμενο του αγωγού θα διαρρεύσει στο περιβάλλον.



**Εικόνα 2.1:** Διαρροή πετρελαίου σε αγωγό του Περού  
Πηγή : *The Energy Year*

Τα κριτήρια αστοχίας για τους αγωγούς υδρογονανθράκων αναφέρονται στο σύνολο των συνθηκών ή των ορίων που καθορίζουν πότε ένας αγωγός θεωρείται ότι έχει αστοχήσει ή κινδυνεύει να αστοχήσει. Τα κριτήρια αυτά βοηθούν στον εντοπισμό πιθανών αδυναμιών ή ανωμαλιών στη δομική ακεραιότητα του αγωγού, στις συνθήκες λειτουργίας ή στις επιδόσεις, επιτρέποντας τη λήψη κατάλληλων μέτρων για την πρόληψη ατυχημάτων ή τον μετριασμό των συνεπειών. Ορισμένα κοινά κριτήρια αστοχίας για αγωγούς υδρογονανθράκων περιλαμβάνουν:

1. Διαρροή (Leakage) : Η διαρροή είναι ένα από τα κύρια κριτήρια αστοχίας για τους αγωγούς. Οποιαδήποτε ακούσια απελευθέρωση υδρογονανθράκων, είτε οφείλεται σε ρωγμές, διατρήσεις, διάβρωση ή ελαττωματικά εξαρτήματα, υποδηλώνει αστοχία του αγωγού. Εάν εντοπιστεί διαρροή, πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα για να σταματήσει και να αποτραπεί η περαιτέρω απελευθέρωση υδρογονανθράκων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την απομόνωση του επηρεαζόμενου τμήματος του αγωγού, την ενεργοποίηση των συστημάτων επείγουσας διακοπής λειτουργίας και την έναρξη πρωτοκόλλων αντιμετώπισης για τον περιορισμό της διαρροής, την προστασία του περιβάλλοντος και τη διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας. Για την αντιμετώπιση της αιτίας της διαρροής μπορεί να είναι απαραίτητη η επισκευή ή η αντικατάσταση του τμήματος του αγωγού που έχει υποστεί ζημιά.
2. Διάβρωση (Corrosion) : Η διάβρωση αποτελεί μείζονα ανησυχία για τους αγωγούς, ιδίως εκείνους που είναι κατασκευασμένοι από μέταλλο. Εάν η διάβρωση φθάσει σε κάποιο βαθμό, μπορεί να αποδυναμώσει το υλικό του αγωγού, οδηγώντας σε δομική αστοχία ή διαρροές. Θα πρέπει να εφαρμόζονται τακτικές επιθεωρήσεις και προγράμματα παρακολούθησης για τον έγκαιρο εντοπισμό της κι αν εντοπισθεί να ληφθούν μέτρα όπως η εφαρμογή προστατευτικών επιστρώσεων, η εγκατάσταση αναστολέων διάβρωσης ή η εφαρμογή συστημάτων καθοδικής προστασίας για τον μετριασμό της περαιτέρω διάβρωσης και την ενίσχυση της ακεραιότητας του αγωγού.
3. Υπερβολική παραμόρφωση (Excessive deformation) : Η υπερβολική παραμόρφωση αναφέρεται σε σημαντικές αλλαγές στο σχήμα ή τη γεωμετρία του αγωγού πέραν των αποδεκτών ορίων. Αυτό μπορεί να προκληθεί από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η μετακίνηση του εδάφους, οι μεταβολές της θερμοκρασίας, ή από εσωτερικούς παράγοντες, όπως οι διακυμάνσεις της πίεσης. Η υπερβολική παραμόρφωση μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του αγωγού και να οδηγήσει σε αστοχία.
4. Όρια πίεσης (Pressure limits) : Οι αγωγοί υδρογονανθράκων είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν εντός συγκεκριμένων ορίων πίεσης. Εάν η πίεση υπερβεί αυτά τα όρια, μπορεί να αυξηθεί ο κίνδυνος αστοχίας του αγωγού λόγω κόπωσης του υλικού, ρήξης ή απώλειας της συγκράτησης. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της πίεσης του αγωγού εντός ασφαλών παραμέτρων λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή αστοχιών.
5. Όρια θερμοκρασίας (Temperature limits) : Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών του αγωγού. Οι ακραίες θερμοκρασίες πέραν των ορίων σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσουν σε ευθραυστότητα, ρωγμές ή προβλήματα

διαστολής/συστολής που θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του αγωγού. Η τήρηση των ορίων θερμοκρασίας διασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία του αγωγού.

6. Φυσικοί κίνδυνοι: Οι αγωγοί που βρίσκονται σε περιοχές επιρρεπείς σε φυσικούς κινδύνους, όπως σεισμοί, κατολισθήσεις ή πλημμύρες, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Ο στιβαρός σχεδιασμός και οι τεχνικές κατασκευής, όπως η χρήση εύκαμπτων υλικών ή η εγκατάσταση προστατευτικών μέτρων, όπως οι ασπίδες βράχων, μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό των επιπτώσεων αυτών των κινδύνων. Θα πρέπει επίσης να υπάρχει τακτική παρακολούθηση, συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και σχέδια αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα κριτήρια αστοχίας μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τις κανονιστικές απαιτήσεις, τα βιομηχανικά πρότυπα και τα ειδικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Οι φορείς εκμετάλλευσης αγωγών οφείλουν να λαμβάνουν υπόψιν αυτά τα κριτήρια και να διενεργούν τακτικές επιθεωρήσεις, παρακολούθηση και συντήρηση για να διασφαλίσουν τη συμμόρφωση και να μετριάσουν τους κινδύνους αστοχιών.

Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού οργανισμού για θέματα αγωγών φυσικού αερίου ( EGIG, European Gas Pipeline Incident Data Group), η αστοχία υλικού και η διάβρωση είναι υπεύθυνες για το 30-40% των αστοχιών των αγωγών και το υπόλοιπο ποσοστό συμπληρώνεται από παράγοντες όπως εργασίες συντήρησης, λανθασμένες λειτουργίες και παρεμβολές τρίτων ( EGIG 2015 ).

Συνοπτικά οι κύριες αιτίες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απελευθέρωση φυσικού αερίου από τον αγωγό στην ατμόσφαιρα και να οδηγήσουν σε ατύχημα, σύμφωνα πάντα με τον EGIG, είναι:

- Η διάβρωση λόγω δράσης χημικών παραγόντων
- Η διάρρηξη λόγω μηχανικής αστοχίας (θραύση)
- Η φθορά κατά τη λειτουργία του αγωγού
- Εξωτερικοί παράγοντες
- Πρόσθετη καταπόνηση από τη μετακίνηση του εδάφους (EGIG 2008)

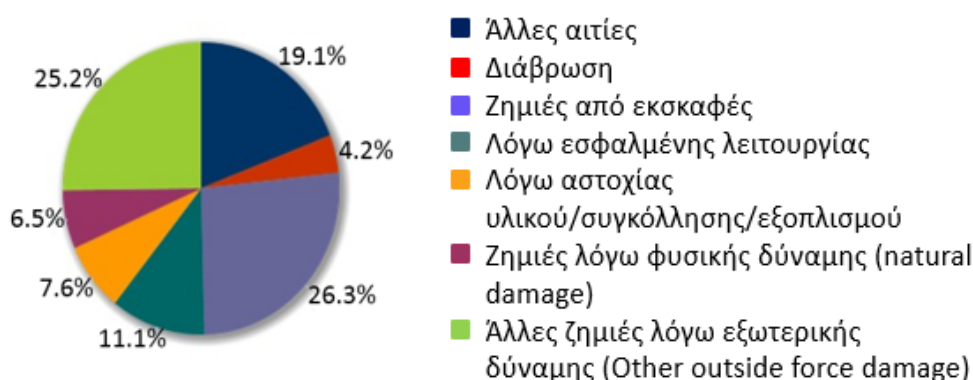
Ενώ σύμφωνα με στοιχεία από το PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration), οι αιτίες για περιστατικά αστοχίας αγωγών κατανεμημένες σε ποσοστό είναι:

#### Κατά τη διανομή

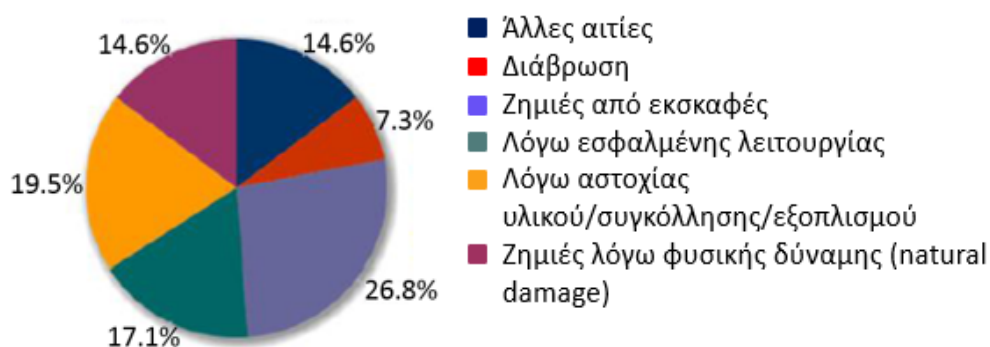
- 4.2% λόγω διάβρωσης (corrosion)
- 26.3% βλάβες από εκσκαφές (excavation damage)
- 11.1% λόγω εσφαλμένης λειτουργίας (incorrect operation)
- 7.6% λόγω αστοχίας υλικού/ συγκόλλησης/ εξοπλισμού (material/ weld / equip failure)
- 6.5% βλάβες λόγω φυσικής δύναμης (natural force damage)
- 25.2% άλλες ζημιές λόγω εξωτερικής δύναμης (other outside force damage)
- 19.1% άλλες αιτίες (other causes)

### Κατά τη μεταφορά

- 7.3% λόγω διάβρωσης (corrosion)
- 26.8% ζημιές από εκσκαφές (excavation damage)
- 17.1% λόγω εσφαλμένης λειτουργίας (incorrect operation)
- 19.5% λόγω αστοχίας υλικού/ συγκόλλησης/ εξοπλισμού (material/ weld / equip failure)
- 14.6% ζημιές λόγω φυσικής δύναμης (natural force damage)
- 14.6% άλλες αιτίες (other causes)



**Εικόνα 2.2:** Αιτίες αστοχίας αγωγών κατανεμημένες σε ποσοστό, κατά τη διάρκεια της διανομής σύμφωνα με το PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration)

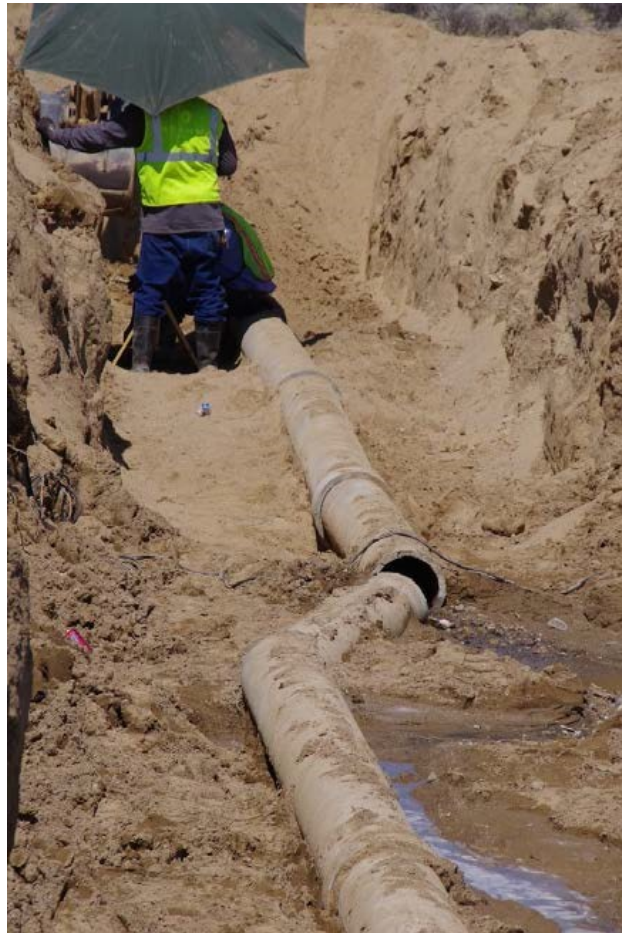


**Εικόνα 2.3:** Αιτίες αστοχίας αγωγών κατανεμημένες σε ποσοστό, κατά τη διάρκεια της μεταφοράς σύμφωνα με το phmsa (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration)





**Εικόνα 2.4:** Αγωγός που έχει αστοχήσει λόγω διάβρωσης Πηγή: Interplast



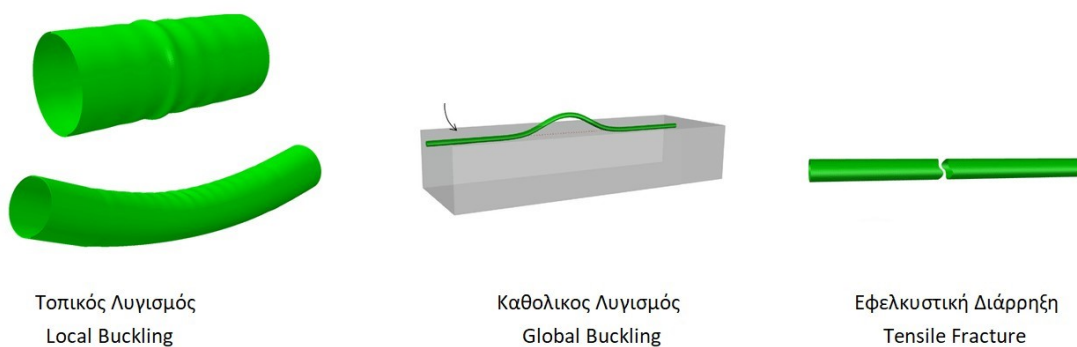
**Εικόνα 2.5:** Σπασμένος αγωγός, κατά την εκσκαφή για επισκευή μετά τον σεισμό  
Πηγή: DesignSafe



**Εικόνα 2.6:** Παραμορφωμένο τμήμα χαλύβδινου αγωγού φυσικού αερίου μετά από εκσκαφή σε σημείο διέλευσης ρήγματος. Φωτογραφία από την PG&E.

### 2.5.1 Συνήθεις Μηχανισμοί Αστοχίας σε θαμμένους, συνεχείς χαλύβδινους αγωγούς

Οι συνηθέστεροι μηχανισμοί αστοχίας για τους θαμμένους (υπόγειους) χαλύβδινους αγωγούς, είναι: ο τοπικός λυγισμός (local buckling) ο καθολικός λυγισμός (global buckling) και η εφελκυστική θραύση (tensile fracture) Τοπικός Λυγισμός – Local Buckling



**Εικόνα 2.7:** Συνήθεις μηχανισμοί αστοχίας σε θαμμένους, συνεχείς χαλύβδινους αγωγούς.  
Πηγή : Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking

- Τοπικός Λυγισμός – Local Buckling

Ο τοπικός λυγισμός, αναφέρεται σε ένα δομικό φαινόμενο, κατά το οποίο, ένα συγκεκριμένο στοιχείο ή τμήμα κάποιας κατασκευής, παρουσιάζει αστάθεια λόγω θλιπτικών δυνάμεων. Η τοπική αυτή αστάθεια, ενδέχεται να οδηγήσει σε παραμόρφωση ή και αστοχία στη συγκεκριμένη περιοχή, την στιγμή που η υπόλοιπη δομή παραμένει ανεπηρέαστη. Στο πλαίσιο των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου, αναφέρεται σε ένα είδος δομικής αστάθειας που μπορεί να εμφανιστεί σε συγκεκριμένα τμήματα του αγωγού, στα οποία, τα συμπιεστικά φορτία οδηγούν σε παραμόρφωση ή αστοχία. Μπορεί να προκύψει λόγω διαφόρων παραγόντων με πιο συνηθισμένους, την υψηλή εσωτερική πίεση, τα εξωτερικά φορτία, τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, τις γεωμετρικές διαμορφώσεις, τις ιδιότητες των υλικών κ.α. Στη φάση του σχεδιασμού, είναι υψηλής σημασίας να λαμβάνεται υπόψη το ενδεχόμενο τοπικού λυγισμού έτσι ώστε να μπορεί να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα τους.

Οι διάφοροι κανονισμοί προτείνουν ορισμένες εξισώσεις για τον υπολογισμό της θλιπτικής παραμόρφωσης. Πιο γνωστές είναι αυτές που του αμερικάνικου κανονισμού ALA:

- όριο λειτουργίας	$\varepsilon_{c,cr} = 0.5 * \frac{t}{D} - 0.0025 + 3000 * \left( \frac{dP * D}{2 * E * t} \right)^2$
- όριο ακεραιότητας	$\varepsilon_{c,cr} = 1.76 * t * D$

Όπου, το D εκφράζει τη διάμετρο του αγωγού, το t το πάχος των τοιχωμάτων, το E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και το dP τη διαφορά πίεσης.



**Εικόνα 2.8:** Τοπικός Λυγισμός μεταλλικού αγωγού. Πηγή : Takada et al. 2001

- Καθολικός Λυγισμός – Global Buckling

Ο καθολικός λυγισμός, στο πλαίσιο των αγωγών φυσικού αερίου, αναφέρεται σε έναν τύπο δομικής αστάθειας, όπου ολόκληρος ο αγωγός μπορεί να υποστεί σημαντική πλευρική παραμόρφωση ή αστοχία λόγω συμπιεστικών φορτίων, που



συχνά προκύπτουν από συνδυασμό εσωτερικής πίεσης, εξωτερικών φορτίων και άλλων παραγόντων. Ο καθολικός λυγισμός συχνά διακρίνεται σε κατακόρυφο και πλευρικό.

Το φαινόμενο του καθολικού λυγισμού είναι πολύ επικίνδυνο σε μεταλλικούς αγωγούς μικρών διαμέτρων, στους οποίους ο λόγος της διαμέτρου  $D$  ως προς το πάχος  $t$  είναι αρκετά μικρός. Ο καθολικός λυγισμός, ενδέχεται να αποτελέσει την κρίσιμη μορφή αστοχίας σε περιπτώσεις θαμμένων (υπόγειων) αγωγών με μικρό βάθος επίχωσης, είτε σε αγωγούς μεγάλης πίεσης και εσωτερικής θερμοκρασίας (λόγω επιβολής μεγάλων δυνάμεων). Συνηθέστερα, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι περισσότερο επιρρεπείς σε φαινόμενα καθολικού λυγισμού μιας και ο παράγοντας του βάθους επηρεάζει τις διαφορές θερμοκρασίας και πίεσης, επιβάλλοντας στον αγωγό θλιπτικές δυνάμεις.

Σύμφωνα με τους O'Rourke and Liu (2012), η εμφάνιση καθολικού λυγισμού στον αγωγό δεν συνεπάγεται απαραίτητα της αστοχίας του. Δημιουργούνται μεγάλες παραμορφώσεις οι οποίες στη συνέχεια θα πρέπει να ελεγχθούν με βάση τα αντίστοιχα όρια αστοχίας.



**Εικόνα 2.9:** Αστοχία μεταλλικού αγωγού λόγω Καθολικού Λυγισμού  
Πηγή : What is Piping



**Εικόνα 2.10:** Αστοχία αγωγού λόγω Καθολικού Λυγισμού

Πηγή : *Global Buckling in subsea pipelines : consequences and mitigation measures*

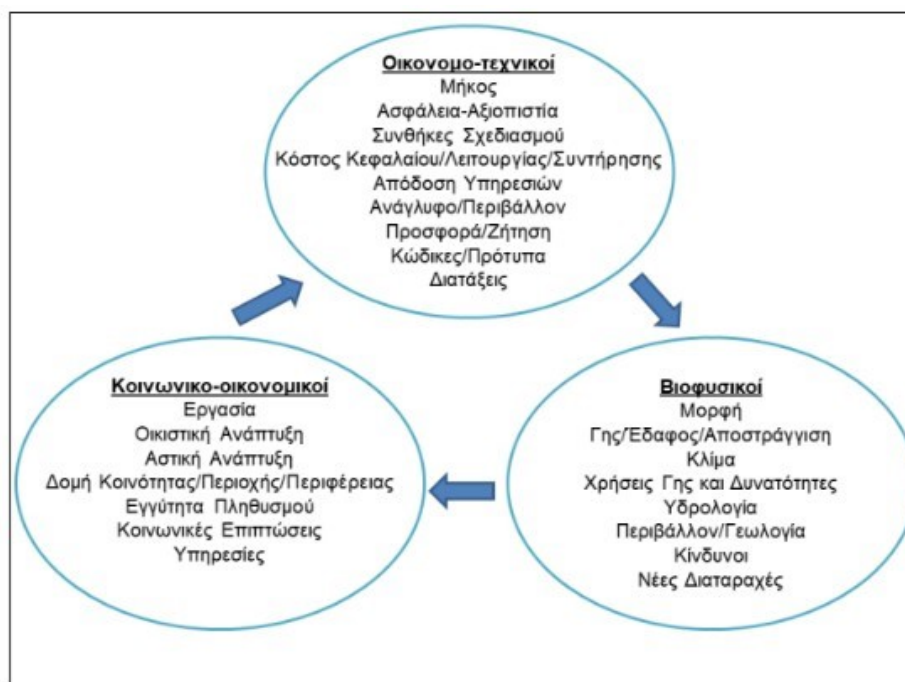
- Εφελκυστική Θραύση – Tensile Fracture

Η εφελκυστική θραύση, ως φαινόμενο στους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων, αναφέρεται στην αστοχία του υλικού ενός αγωγού λόγω εφελκυστικών τάσεων, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του υλικού κατά μήκος των επιφανειών θραύσης. Τέτοιου είδους αστοχία μπορεί να είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού παραγόντων, με κυριότερους, την αυξημένη εσωτερική πίεση λόγω του μεταφερόμενου προϊόντος η οποία μπορεί να δημιουργήσει εφελκυστικές τάσεις στα τοιχώματα του αγωγού, την επίδραση εξωτερικών φορτίων (π.χ. λόγω της μετακίνησης του εδάφους ή κάποιου σεισμικού γεγονότος που δύνανται να επιβάλλουν πρόσθετες εφελκυστικές τάσεις στον αγωγό), τις ιδιότητες του ίδιου του υλικού καθώς η εφελκυστική αντοχή, η ολκιμότητα και η ανθεκτικότητα του υλικού του αγωγού επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ευαισθησία του σε εφελκυστική θραύση, των θερμοκρασιακών διαφορών που μπορούν να οδηγήσουν σε θερμική συστολή και διαστολή συμβάλλοντας έτσι σε εφελκυστικές τάσεις στον αγωγό κ.α.

Η κατανόηση και η διαχείριση του κινδύνου εφελκυστικής θραύσης είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ασφάλειας και της ακεραιότητας των αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων. Μερικές συνήθεις πρακτικές για τον περιορισμό της είναι, η επιλογή υλικών με τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες (συμπεριλαμβανομένης της αντοχής σε εφελκυσμό και της ανθεκτικότητας) η οποία συμβάλλει στη διασφάλιση ότι ο αγωγός μπορεί να αντέξει τις πιθανές εφελκυστικές τάσεις, η επιλογή κατάλληλου πάχους τοιχώματος με στόχο την αντιμετώπιση τόσο της εσωτερικής πίεσης όσο και των εξωτερικών φορτίων, η διασφάλιση της ποιότητας των συγκολλήσεων και των αρθρώσεων μέσω κατάλληλων τεχνικών συγκόλλησης και επιθεωρήσεων, αυστηροί ποιοτικοί έλεγχοι κατά τη διάρκεια της κατασκευής, επικαλύψεις με αντιδιαβρωτική προστασία, ρύθμιση της πίεσης, κ.α.

## 2.6 Χάραξη Αγωγών

Κατά το σχεδιασμό της χάραξης του αγωγού πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν η ανθρώπινη ασφάλεια η προστασία του περιβάλλοντος και ο οικονομικός παράγοντας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού είναι ένας συνδυασμός Οικονομικο - τεχνικών, Κοινωνικο-οικονομικών και Βιοφυσικών όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.11.



**Εικόνα 2.11:** Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού  
Πηγή: Rizkalla, 2008

Η τελική διαδρομή οφείλει να είναι σε κάθε περίπτωση:

- Ασφαλής
- Περιβαλλοντικά αποδεκτή
- Πρακτική
- Οικονομική

Η διεθνής ένωση IPLOCA (International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013) προτείνει μια διαδικασία για την επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού μεγάλου μήκους η οποία περιγράφεται παρακάτω. Η εν λόγω διαδικασία αποτελεί μια τυπική προσέγγιση της χάραξης του αγωγού, ο οποίος διέρχεται από γνωστά σημεία έναρξης και τερματισμού. Προφανώς, η διαδικασία αυτή είναι γενική. Κάθε περίπτωση χάραξης είναι ξεχωριστή οπότε είναι αρκετά δύσκολο να βρεθεί μια διαδικασία που να αποτελεί τη βέλτιστη για όλες τις περιπτώσεις.

### 2.6.1 Περιγραφή της διαδικασίας για την επιλογή της διαδρομής

Η διαδικασία αρχίζει με τον ορισμό μιας ομάδας εναλλακτικών διαδρομών (corridors). Πιο συγκεκριμένα επιλέγεται ένα πλήθος περιοχών εκτεταμένου πλάτους, οι οποίες συνδέουν τα προκαθορισμένα σημεία έναρξης και τερματισμού και στη συνέχεια επιλέγεται η καταλληλότερη από αυτές. Έτσι, περιορίζεται συνεχώς το πλάτος ως την επίτευξη της τελικής διαδρομής.

Όσον αφορά την αρχική επιλογή των διαδρομών, ο σκοπός είναι η αποφυγή των πολύ βασικών περιορισμών.

Σταδιακά, λαμβάνονται υπόψιν κι άλλοι, μέχρι να οδηγηθούμε στο σημείο της τελικής επιλογής διαδρομής, στην οποία έχουν συμπεριληφθεί όλοι οι απαραίτητοι παράγοντες όπως η δημόσια ασφάλεια, οι διάφορες επιπτώσεις λόγω της κατασκευής και της λειτουργίας του αγωγού (καθώς κι εκείνες σε ενδεχόμενη διαρροή του προϊόντος μεταφοράς, λόγω ατυχήματος), τεχνικά οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια κ.α. Ως τελικός στόχος, ορίζεται η επιλογή μιας διαδρομής, η οποία θα είναι ασφαλής, περιβαλλοντικά αποδεκτή και οικονομική ως προς την κατασκευή του αγωγού.

Τα κύρια στάδια ενός έργου κατασκευής αγωγού είναι (International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013):

- Σχεδιασμός του Έργου
  1. Επιχειρηματικός Σχεδιασμός (Έλεγχος οικονομικής βιωσιμότητας)
  2. Σχεδιασμός Εγκαταστάσεων (Επιλογή βέλτιστης λύσης)
  3. Σχεδιασμός Έργου (Λεπτομερής σχεδιασμός της βέλτιστης αυτής λύσης)
- Υλοποίηση του Έργου
- Εκκίνηση και Λειτουργία

### 2.6.2 Περιγραφή φάσεων υλοποίησης έργου

Στη **Φάση I** περιλαμβάνονται οι εργασίες που στοχεύουν στον καθορισμό των εναλλακτικών επιλογών διαδρομών. Όπως αναφέρθηκε ήδη σε αυτή την αρχική φάση αποφεύγονται βασικοί περιορισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή. Με τη χρήση κατάλληλων χαρτών (όπως γεωλογικών ή τοπογραφικών), χωροταξικών σχεδίων ακόμα και φωτογραφιών μέσω δορυφόρου, συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα και οι πληροφορίες σχετικά με τους βασικούς αυτούς περιορισμούς. Ακόμα, σε αυτή τη φάση προκύπτουν και τα πρώτα βασικά χαρακτηριστικά του αγωγού τα οποία είναι ιδιαίτερης σημασίας για την έναρξη της κοστολόγησης και τον προγραμματισμό των εργασιών.

Στη **Φάση II** πραγματοποιείται επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής από τις υπάρχουσες επιλογές μετά από την εκπόνηση της «μελέτης βασικών ζητημάτων» (key issues study) η οποία αποτελεί μια οπτική αξιολόγηση της περιοχής, χρησιμοποιώντας όλα τα διαθέσιμα δημόσια έγγραφα και πληροφορίες, (τα οποία είναι αρκετά ακριβέστερα από ότι στη Φάση I). Η διαδρομή επιλέγεται έτσι ώστε να παρακάμπτει φυσικά εμπόδια, όπως μια λίμνη ή ένα ποταμό, μεγάλες αστικές πόλεις ή προστατευόμενες και ευαίσθητες περιβαλλοντικές περιοχές. Αφού επιλεγεί η τελική

διαδρομή, αρχίζει η διαδικασία καθορισμού εναλλακτικών επιλογών χάραξης της τελικής διαδρομής εντός αυτής.

Στη **Φάση III** επιλέγεται η τελική διαδρομή. Αρχικά συγκεντρώνονται ακόμη περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες για τη χαρτογράφηση των περιορισμών εντός της διαδρομής που έχει επιλεγεί. Κάθε περιορισμός που δύναται να επηρεάσει τον αγωγό, απαιτείται να καταγραφεί πλήρως. Στη συνέχεια αφού ολοκληρωθεί η καταγραφή αξιολογούνται οι εναλλακτικές διαδρομές του αγωγού (η IPLOCA προτείνει την εφαρμογή μιας ποσοτικής εκτίμησης κινδύνου QRA (Quantitative Risk Assessment)). Σύμφωνα με αυτή την εκτίμηση, για όλες τις διαδρομές ξεχωριστά, πραγματοποιείται υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης επικίνδυνων συμβάντων ενώ παράλληλα εμφανίζονται και οι ενδεχόμενες συνέπειές τους. Έτσι οι εναλλακτικές επιλογές που έχουν συγκεντρωθεί, συγκρίνονται μεταξύ τους και είναι ευκολότερη η επιλογή της βέλτιστης. Όταν ολοκληρωθεί και αυτή η διαδικασία, πραγματοποιείται μια λεπτομερής εξέταση της διαδρομής αυτής (τόσο κατά πλάτος, όσο και κατά βάθος) για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας της (συνήθως μέσω τοπογραφικών γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών ερευνών). Να σημειωθεί ότι σε αυτή τη φάση πραγματοποιούνται έρευνες πεδίου σχετικά με την χωροθέτηση των υπέργειων και των υπόγειων εγκαταστάσεων (π.χ. οδική υποδομή πρόσβασης στον αγωγό). Πριν ξεκινήσει η φάση της κατασκευής του έργου, διεξάγονται οι διαβουλεύσεις ανάμεσα στα ενδιαφερόμενα μέρη.

Αφού ολοκληρωθούν όλα τα παραπάνω, έχουν πλέον συγκεντρωθεί όλα τα απαραίτητα αρχεία και αποτελέσματα που χρειάζονται για τη κατασκευή και την αξιόπιστη λειτουργία του έργου. Η τελική διαδρομή αποτυπώνεται σε κατάλληλης κλίμακας φύλλα ευθυγράμμισης, στα οποία επίσης αναγράφονται οι συντεταγμένες όλων των σημείων μεγάλης σημασίας.

Ολοκληρώνοντας, υπάρχει η Τελική φάση που συμπεριλαμβάνει και την έγκριση της τελικής διαδρομής του αγωγού. Στη φάση αυτή, ουσιαστικά γίνεται μια οριστικοποίηση της έγκρισης του τοπικού σχεδιαστικού φορέα και των συμφωνιών μεταξύ των ιδιοκτητών της γης. Ακόμη διερευνάται διεξοδικά η ενδεχόμενη εκδήλωση γεωκινδύνων. Στη συνέχεια μπορεί να πραγματοποιηθεί η έναρξη των κατασκευών του έργου.

### **2.6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη χάραξη και κριτήρια επιλογής της βέλτιστης διαδρομής του αγωγού.**

Η επιλογή της καλύτερης διαδρομής για τη χάραξη του αγωγού, είναι μια σύνθετη διαδικασία. Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, πρέπει να επιτευχθεί ένας συνδυασμός ανάμεσα σε παράγοντες οι οποίοι ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς.

Η ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, προφανώς βρίσκεται στην κορυφή της λίστας. Είναι αναγκαίο να εξαλειφθούν οι πιθανότητες πρόκλησης ατυχήματος, τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, στο εργατικό προσωπικό, όσο και κατά τη φάση της λειτουργίας του έργου, στους πολίτες. Επιπλέον η επιλεγμένη διαδρομή οφείλει, στο περιβαλλοντικό κομμάτι, να είναι εκείνη που παρουσιάζει τις λιγότερες και μικρότερης κλίμακας επιπτώσεις.

Ιδανικά, οι επιπτώσεις αυτές θα έπρεπε να ήταν μηδενικές, όμως επειδή κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, ο στόχος είναι ο περιορισμός τους. Σε αρχικό επίπεδο γίνεται προσπάθεια αποφυγής των μεγάλων και σημαντικών επιπτώσεων όπως για παράδειγμα η καταστροφή προστατευόμενων περιοχών, βιότοπων και φυσικών τοπίων, ή σοβαρή διατάραξη της πανίδας της ευρύτερης περιοχής κυρίως κατά τη φάση των εργασιών για την κατασκευή του έργου. Στη διάρκεια λειτουργίας του αγωγού η προσπάθεια εστιάζεται στην πρόληψη ώστε να αποφευχθεί κάποια ενδεχόμενη διαρροή του προϊόντος που μεταφέρεται μέσω αυτού αλλά και στον σχεδιασμό μεθόδων, προκειμένου να διορθωθεί άμεσα η πιθανή βλάβη και να περιοριστεί όσο το δυνατό περισσότερο η ποσότητα του προϊόντος που διέρρευσε (στο χειρότερο σενάριο).

Ακόμη, ένας παράγοντας που επηρεάζει συχνά τη διαδρομή χάραξης του αγωγού, είναι οι περιοχές πολιτιστικής κληρονομιάς. Ειδικά σε χώρες με πλούσια ιστορία όπως η Ελλάδα, πολύ συχνά η διαδρομή που επιλέγεται ως βέλτιστη αρχικά, διασταυρώνεται με μνημεία. Στις περιπτώσεις αυτές, η διαδρομή πρέπει να αλλάξει είτε ολόκληρη είτε να δημιουργηθεί κάποια παράκαμψη, με σκοπό την αποφυγή του μνημείου. Φυσικά υπάρχει και ο οικονομικός παράγοντας. Το κάθε έργο έχει έναν ορισμένο προϋπολογισμό.

Προφανώς τίθεται ως προτεραιότητα η ασφαλής κατασκευή και λειτουργία του έργου κι η προσπάθεια εκμηδενισμού των επιπτώσεων στο περιβάλλον, όμως δεν πρέπει να ξεπερασθεί το ποσό του προϋπολογισμού. Αυτό δυσκολεύει αρκετά την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής αφού σε πολλές περιπτώσεις οι προαναφερθέντες παράγοντες δεν μπορούν να συνυπάρξουν.

Οι παραπάνω είναι οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψιν και σημειώνονται για την έναρξη της επιλογής της βέλτιστης διαδρομής. Υπάρχουν βέβαια και άλλοι εξίσου υψηλής σημασίας που συχνά φέρνουν αλλαγές στη χάραξη του αγωγού. Οι συνηθέστεροι από αυτούς είναι εκείνοι που σχετίζονται με τις ιδιοκτησίες της γης της ευρύτερης περιοχής, οι εδαφικές συνθήκες που υπάρχουν σε όλη την περιοχή, οι ήδη υπάρχουσες υποδομές κ.α.

Είναι έτσι σαφές ότι η τελική επιλογή δεν είναι μια εύκολη διαδικασία. Εκτός από το μεγάλο πλήθος των παραγόντων που πρέπει να συνυπάρξουν αρμονικά, η κάθε χώρα έχει διαφορετικές νομοθεσίες και κανονιστικές απαιτήσεις, καθώς και διαφορετικά όρια και περιορισμούς σε διάφορα ζητήματα (π.χ. περιβαλλοντικό). Επομένως κάθε έργο χάραξης αγωγού έχει κάποιες ιδιαιτερότητες και διαφέρει από τα προηγούμενα ή τα μελλοντικά σε ορισμένα σημεία.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια βασικά κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής με δεδομένα που πάρθηκαν από την IPLOCA (International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013) και εστιάζει σε πιθανά κριτήρια Κοινωνικής, Περιβαλλοντικής και Τεχνικής φύσης.

- Κοινωνικά κριτήρια
  1. Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη ζωή.
  2. Ελαχιστοποίηση των προβλημάτων και των συγκρούσεων σχετικά με ζητήματα που αφορούν τις χρήσεις γης καθώς και αποφυγή (αν είναι εφικτό) διασταύρωσης με ιδιοκτησίες.

3. Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων σε αστικές περιοχές, περιοχές σχετικές με τη γεωργία ή την εξόρυξη και αποφυγή (αν είναι εφικτό) δασικών περιοχών.
- Περιβαλλοντικά κριτήρια
    1. Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων σε πανίδα και χλωρίδα της ευρύτερης περιοχής καθώς και του φυσικού περιβάλλοντος.
    2. Αποφυγή προστατευόμενων περιοχών, πάρκων και καταφυγίων και περιοχών RAMSAR
    3. Αποφυγή περιοχών με αρχαιολογικά ευρήματα και χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς..
    4. Ελαχιστοποίηση του συνολικού αποτυπώματος του έργου στο περιβάλλον.
    5. Ελαχιστοποίηση των αισθητικών επιπτώσεων.
    6. Αποφυγή ασταθούς και μολυσμένου εδάφους.
  - Τεχνικά κριτήρια
    1. Ελαχιστοποίηση στο συνολικό μήκος του αγωγού με στόχο την μείωση του οικονομικού κόστους και του χρόνου εργασιών.
    2. Αποφυγή συγκεκριμένων τμημάτων περιοχών που δυσχεραίνουν την κατασκευή του έργου ή αυξάνουν το κόστος όπως μια απότομη πλαγιά, ένα ασταθές έδαφος, έδαφος με υψηλή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα ή περιοχή με σπήλαιο.
    3. Ελαχιστοποίηση εκσκαφών με στόχο την μείωση τόσο του κόστους όσο και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.
    4. Αποφυγή (όσο είναι εφικτό) των διασταυρώσεων με σιδηροδρομικές γέφυρες, οδικούς άξονες, άλλους αγωγούς, υπόγεια καλώδια κ.α.
    5. Αποφυγή ποταμών, λιμνών και περιοχών πλημμύρας.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ικανοποίηση κάθε κριτηρίου, σε κάθε τομέα είναι αδύνατη. Το κάθε έργο ξεχωριστά έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες κι έτσι οι μηχανικοί που είναι υπεύθυνοι, καλούνται να αξιολογήσουν τα κριτήρια και να ορίσουν ποια από αυτά έχουν μεγαλύτερη και ποια μικρότερη βαρύτητα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση του έργου και η εύρεση της τελικής βέλτιστης διαδρομής, η οποία θα είναι γενικώς αποδεκτή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Σεισμικά Ρήγματα

---

Στο Κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια περιγραφή της έννοιας του ρήγματος. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από τους ορισμούς, παρουσιάζονται κάποιοι βασικοί διαχωρισμοί των ρηγμάτων και αναλύονται τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου ρήγματος. Ακόμη, αναφέρονται και σχολιάζονται οι βλάβες που ενδέχεται να παρουσιάσει ένας αγωγός που διασταυρώνεται με σεισμικό ρήγμα, ύστερα από την κίνηση του εδάφους, καθώς και ορισμένοι γενικοί τρόποι πρόληψης και αποφυγής των βλαβών αυτών. Τέλος εμφανίζονται παραδείγματα αγωγών που παρουσίασαν σοβαρές βλάβες λόγω της διέλευσης τους μέσω κάποιου ρήγματος (είτε επειδή η διαδρομή τους βρισκόταν σε κοντινή απόσταση με κάποιο τέτοιο ρήγμα).

### 3.1 Ορισμοί Ρήγματος

Ετυμολογικά, ο όρος ρήγμα παράγεται από το αρχαίο ελληνικό ρήμα ρήγνυμι που σημαίνει σπάζω, θραύω, ραγίζω. Τα ρήγματα δημιουργούνται από τις ενεργές τάσεις μιας περιοχής, από το σύνολο δηλαδή των δυνάμεων που επιδρούν στους γεωλογικούς σχηματισμούς αυτής της περιοχής.

Οι διάφορες τεκτονικές δυνάμεις που επιδρούν στα πετρώματα, τους προκαλούν ένα «σπάσιμο» κατά μήκος μίας επιφάνειας η οποία ενδέχεται να περνάει από ένα ή και περισσότερα στρώματα. Έτσι από το σπάσιμο αυτό, τα στρώματα χωρίζονται και δημιουργούνται δύο τμήματα. Αν τα τμήματα αυτά μετακινηθούν (συγχρόνως) κατά μήκος της επιφάνειας που έσπασε το πέτρωμα, τότε, κάνουμε λόγο για ρήγματα. Αν δεν υπάρξει μετακίνηση, τότε μιλάμε για ρωγμές ή διακλάσεις. Δηλαδή, για να έχουμε ρήγμα, θα πρέπει να έχουμε αφενός σπάσιμο και αφετέρου μετακίνηση.

Οι μετακινήσεις αυτές, που μπορούν να είναι κάθετες, οριζόντιες, ή κι ένας συνδυασμός των δύο, είναι δυνατό να είναι χρονικά διαβαθμισμένες. Δεν είναι λίγα τα παραδείγματα αδρανών ρηγμάτων που ξεκίνησαν μετά από ένα χρονικό διάστημα να κινούνται ξανά. Το μέγεθος των μετακινήσεων κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως εκατοντάδες μέτρα. Κατά την μετακίνηση των τμημάτων πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος δημιουργείται μια λεία επιφάνεια, λόγω τριβής, η οποία ονομάζεται κατοπτρική. Στην επιφάνεια αυτή είναι δυνατό ορισμένες φορές, να διακρίνουμε παράλληλες χαραγές ή ραβδώσεις που μας δίνουν τη διεύθυνση της τελευταίας κίνησης που πραγματοποιήθηκε επάνω στην επιφάνεια αυτή.

Η έκταση, είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του ρήγματος. Ορισμένες φορές μπορεί ένα ρήγμα να καταλαμβάνει τεράστια έκταση όπως για παράδειγμα το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα, το οποίο εκτείνεται σε μήκος περίπου 1300 χιλιομέτρων και φτάνει μέχρι την επιφάνεια. Ένα ρήγμα όμως δεν φτάνει πάντα ως την επιφάνεια της Γης.

Η ρήξη των πετρωμάτων όπως και η κίνηση των τεμαχίων του ρήγματος και η συνακόλουθη μετάπτωση, απελευθερώνουν συσσωρευμένα ποσά ενέργειας.



Ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης που εκδηλώνεται σαν σεισμός. Οποιοδήποτε φυσικό σώμα έχει ένα όριο θραύσης. Όταν στο σώμα αυτό ασκηθούν τάσεις τότε του προκαλούν μια ελαστική παραμόρφωση. Το σώμα θα παραμορφωθεί, δηλαδή θα αλλάξει τις διαστάσεις του και συγχρόνως θα αποθηκεύσει μηχανική ενέργεια. Όταν οι ασκούμενες σε αυτό τάσεις ξεπεράσουν το όριο θραύσης του, ή με άλλα λόγια, η ανηγμένη παραμόρφωση του εν λόγω σώματος, ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, τότε αυτό διαρρηγνύεται δημιουργώντας έτσι μια ζώνη επιφανειών ασυνέχειας, η οποία καλείται ρήγμα. Το ρήγμα θα εξακολουθεί να λειτουργεί για το χρονικό διάστημα που θα συνεχίσουν να ασκούνται οι τάσεις που το δημιούργησαν.

Οι τάσεις που ασκούνται σε ένα σώμα μπορούν να είναι συμπιεστικές ή εφελκυστικές. Οι συμπιεστικές τάσεις τείνουν να προκαλέσουν συμπίεση του σώματος κατά τη διεύθυνση στην οποία ασκούνται, ενώ οι εφελκυστικές τείνουν να προκαλέσουν έκταση του σώματος (επίσης κατά τη διεύθυνση στην οποία ασκούνται).

### 3.2 Τύποι Ρηγμάτων

Μια πρώτη διάκριση των ρηγμάτων μπορεί να είναι αυτή που τα διαχωρίζει σε αδρανή και ενεργά. Η διάκριση αυτή πραγματοποιείται με βάση το αν η συγκέντρωση τάσεων ή η κίνηση σε αυτά, έχει σταματήσει ή όχι. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα ενεργά ρήγματα φιλοξενούν τις εστίες των τεκτονικών σεισμών, οι οποίοι είναι οι πιο καταστροφικοί. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων είναι τα ακόλουθα:

- Τέμαχος: Μετά το σπάσιμο δημιουργούνται δύο νέα τμήματα του πετρώματος. Κάθε ένα από τα τμήματα αυτά ονομάζεται τέμαχος.
- Επίπεδο του ρήγματος : Καλείται η επιφάνεια κατά μήκος της οποίας πραγματοποιείται αρχικά το σπάσιμο και στη συνέχεια η ολίσθηση. Το επίπεδο του ρήγματος προσδιορίζεται από τα γραμμικά στοιχεία παράταξη και κλίση
  - i. Παράταξη: γωνία με το Βορά
  - ii. Κλίση: γωνία με το οριζόντιο επίπεδο
- Άλμα του ρήγματος : Ορίζεται ως η απομάκρυνση μεταξύ των άκρων ενός στρώματος που χωρίζεται κατά τη διάρκεια του σπασίματος.
  - i. Οριζόντιο άλμα : οριζόντια απομάκρυνση
  - ii. Κατακόρυφο άλμα : κατακόρυφη απομάκρυνση
- Οροφή : ή στέγη, ονομάζεται το τμήμα των πετρωμάτων που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο του ρήγματος
- Τοίχωμα : ή βάση, ονομάζεται το τμήμα των πετρωμάτων που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του ρήγματος

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων η οποία είναι ίσως και η πιο γνωστή, πραγματοποιείται με βάση την διεύθυνση της σχετικής μετατόπισης των τμημάτων εκατέρωθεν της διάρρηξης.

Όταν κυρίαρχη συνιστώσα της μετατόπισης είναι η κατακόρυφη, δημιουργείται ένα κεκλιμένο επίπεδο διάρρηξης και το ρήγμα ονομάζεται κατά κλίση (dip – slip). Στην περίπτωση αυτού του ρήγματος το τέμαχος που βρίσκεται επάνω από το επίπεδο, ονομάζεται υπερκείμενο (hanging wall) και το τέμαχος που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο, υποκείμενο (footwall). Στην περίπτωση που το υπερκείμενο τέμαχος κινείται προς τα κάτω τα ρήγματα ονομάζονται κανονικά (normal) ενώ, στην περίπτωση που το υπερκείμενο τέμαχος κινείται προς τα πάνω, ονομάζονται ανάστροφα (reverse).

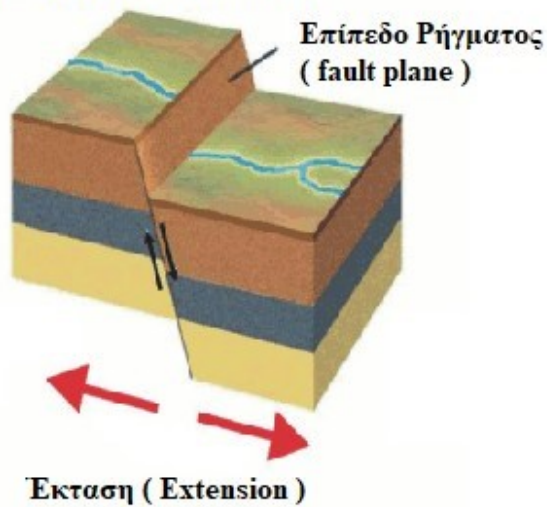
Όταν η οριζόντια είναι η κυρίαρχη συνιστώσα της μετατόπισης, τότε το ρήγμα ονομάζεται οριζόντιο (strike - slip). Τα οριζόντια ρήγματα με τη σειρά τους μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, αριστερόστροφα (left lateral) και δεξιόστροφα (right lateral). Τα οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα αναπτύσσονται συνήθως σε ζώνες στις οποίες συνυπάρχουν ένα σύνολο υποπαράλληλων ρηγμάτων. Τα ρήγματα αυτά, είναι δυνατό να ταξινομηθούν με βάση το μήκος τους αλλά και τη σχέση τους με άλλα γειτονικά ρήγματα. Σύμφωνα με αυτή την κατάταξη αναγνωρίζονται ως πρώτης τάξης τα μεγαλύτερα ρήγματα που εμφανίζονται σε μια περιοχή. Δεύτερης και τρίτης τάξης ρήγματα είναι όσα έχουν σταδιακά μικρότερο μήκος και αρχίζουν από ένα πρώτης τάξης ρήγμα. Η ταξινόμηση αυτή προϋποθέτει ότι όσα ρήγματα ξεκινούν από ένα πρώτης τάξης ρήγμα είναι δεύτερης τάξης και αντιστοίχως όσα ξεκινούν από ένα δεύτερης τάξης ρήγμα είναι τρίτης τάξης. Η τάξη των ρηγμάτων, όπως περιγράφηκε, αντιστοιχεί τόσο στο μέγεθος όσο και στην χρονική σειρά σχηματισμού των ρηγμάτων, αφού τα ρήγματα εξελίσσονται τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Έτσι τα πρώτης τάξης ρήγματα είναι αυτά που σχηματίζονται πρώτα και η εξέλιξή τους είναι μακροβιότερη ενώ όλες οι μικρότερες τάξεις ρηγμάτων μπορούν να συνδεθούν γενετικά με τα ρήγματα πρώτης τάξης. (Κουκουβέλας, 1998).

Τέλος, υπάρχει και η περίπτωση του ρήγματος λοξής μετατόπισης (Oblique – slip fault). Πρόκειται για έναν σύνθετο τύπο ρήγματος, στο οποίο η κίνηση πραγματοποιείται τόσο κατά μήκος της οριζόντιας, όσο και της κατακόρυφης διεύθυνσης του επιπέδου του ρήγματος, συνδυάζοντας χαρακτηριστικά τόσο των ρηγμάτων κατά κλίση όσο και των ρηγμάτων οριζόντιων. Ένα ρήγμα λοξής μετατόπισης, μπορεί να είναι:

1. Δεξιόστροφο (Right Lateral): Το ρήγμα έχει δεξιόστροφη οριζόντια κίνηση σε συνδυασμό είτε με κανονική (προς τα κάτω) είτε με αντίστροφη (προς τα πάνω) κίνηση κατά κλίση.
2. Αριστερόστροφο (Left Lateral): Το ρήγμα έχει αριστερόστροφη οριζόντια κίνηση μαζί με κανονική ή αντίστροφη κίνηση κατά κλίση.

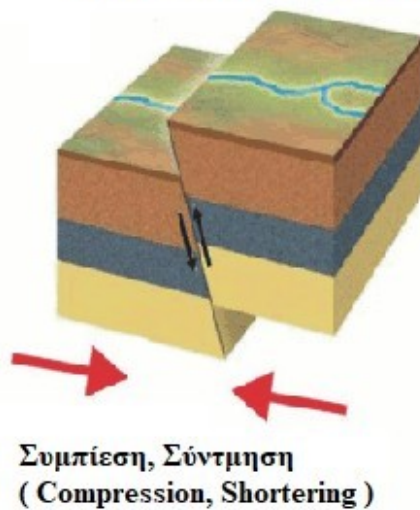
Στις ακόλουθες εικόνες, παρουσιάζονται οι παραπάνω κατηγορίες ρηγμάτων για την καλύτερη κατανόηση των διαφορών τους.

### Κανονικό Ρήγμα ( dip - slip Normal Fault )



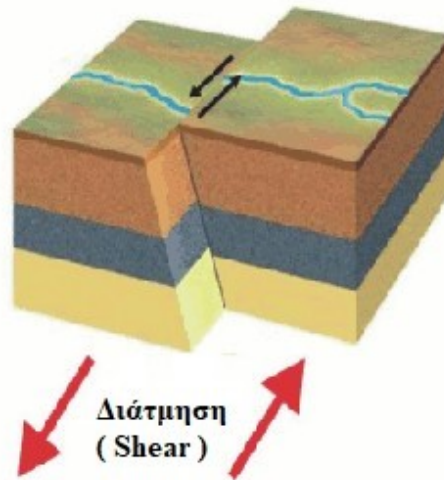
**Εικόνα 3.1:** Παρουσίαση Κανονικού Ρήγματος κατά κλίση (Normal fault, dip - slip ), στο οποίο διαχωρίζονται το υπερκείμενο (Hanging wal ) και το υποκείμενο (Footwall) τέμαχος. Στην περίπτωση του Κανονικού ρήγματος παρατηρείται έκταση (Extension).  
Πηγή: How Earthquakes Work, 2016

### Ανάστροφο Ρήγμα ( Dip - slip Reverse Fault )



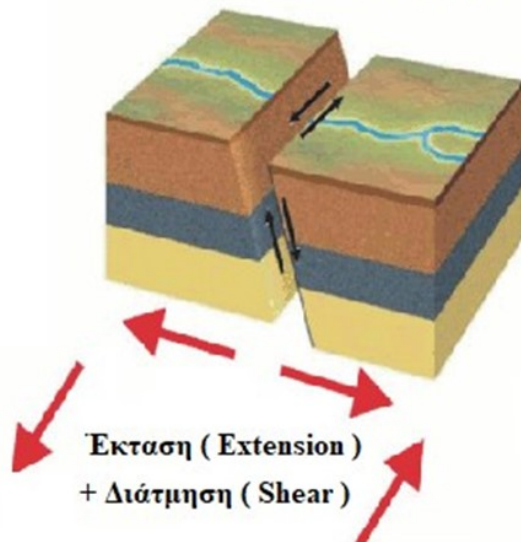
**Εικόνα 3.2:** Παρουσίαση Ανάστροφου Ρήγματος κατά κλίση ( Reverse fault, dip - slip ), στο οποίο διαχωρίζονται το υπερκείμενο ( Hanging wall ) και το υποκείμενο ( Footwall ) τέμαχος. Στην περίπτωση του Ανάστροφου ρήγματος παρατηρείται συμπίεση ( compression ).  
Πηγή: How Earthquakes Work, 2016

### Ρήγμα Οριζόντιας Μετατόπισης ( Strike - slip fault )



**Εικόνα 3.3:** Ρήγμα Οριζόντιας Μετατόπισης (Strike - slip fault). Στη περίπτωση αυτή παρατηρείται διάτμηση. Πηγή: How Earthquakes Work, 2016

### Ρήγμα Πλάγιας Ολίσθησης ( Oblique slip fault )



**Εικόνα 3.4:** Ρήγμα πλάγιας Ολίσθησης ( Oblique slip fault ). Η σύνθετη περίπτωση του συνδυασμού ρήγματος κατά κλίση και ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης ( Dip - slip + Strike - slip). Πηγή: How Earthquakes Work, 2016

### 3.3 Κύρια Ρήγματα

Ως κύρια, ορίζονται τα μεγάλα ενεργά σεισμικά ρήγματα, που είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία σημαντικής σεισμικής δραστηριότητας. Τα ρήγματα αυτά σηματοδοτούν τα όρια μεταξύ τεκτονικών πλακών και μπορεί να εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις. Δημιουργούνται από την κίνηση και την αλληλεπίδραση των πλακών αυτών, η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση τάσεων και την απελευθέρωση ενέργειας με τη μορφή σεισμών. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κύριων σεισμικών ρηγμάτων: τα ρήγματα απλής ολίσθησης και τα ρήγματα βύθισης. Η λιθόσφαιρα της Γης χωρίζεται σε διάφορες μεγάλες τεκτονικές πλάκες που επιπλέον πάνω στην ημίρρευστη Ασθενόσφαιρα που βρίσκεται κάτω από αυτές. Οι πλάκες αυτές κινούνται συνεχώς και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Τα ρήγματα απλής ολίσθησης συμβαίνουν όταν δύο τεκτονικές πλάκες κινούνται οριζόντια η μία δίπλα στην άλλη, ενώ όταν δύο τεκτονικές πλάκες συγκρούονται, η μία συνήθως ωθείται κάτω από την άλλη σε μια διαδικασία που ονομάζεται καταβύθιση. Η έντονη συμπίεση και αλληλεπίδραση μεταξύ των πλακών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός κύριου σεισμικού ρήγματος που ονομάζεται ρήγμα βύθισης.

Τέλος, τα κύρια σεισμικά ρήγματα μπορεί να εκτείνονται σε μήκος εκατοντάδων χιλιομέτρων και να φθάνουν σε σημαντικά βάθη εντός του γήινου φλοιού. Η συχνότητα και το μέγεθος των σεισμών κατά μήκος των κύριων ρηγμάτων ποικίλλουν ανάλογα με το τεκτονικό περιβάλλον και τον ρυθμό κίνησης των πλακών. Και οι δύο τύποι κύριων ρηγμάτων μπορούν να προκαλέσουν σεισμούς, αλλά τα ρήγματα βύθισης συνήθως τείνουν να προκαλούν πιο ισχυρούς σεισμούς.

Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα των πιο γνωστών κύριων σεισμικών ρηγμάτων στον κόσμο:

- Ρήγμα του Αγίου Ανδρέα: Είναι ίσως το πιο γνωστό και εκτενώς μελετημένο σεισμικό ρήγμα. Εκτείνεται σε μήκος περίπου 1.300 χιλιομέτρων (800 μιλίων) μέσα στην Καλιφόρνια και αποτελεί όριο μετασχηματισμού μεταξύ της πλάκας του Ειρηνικού και της πλάκας της Βόρειας Αμερικής. Είναι υπεύθυνο για πολυάριθμους σεισμούς στην περιοχή, συμπεριλαμβανομένου του καταστροφικού σεισμού του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο.
- Τάφρος της Ιαπωνίας (Ιαπωνία): Πρόκειται για μια ζώνη υποβύθισης που βρίσκεται στα ανοικτά των βορειοανατολικών ακτών της Ιαπωνίας. Σηματοδοτεί το όριο μεταξύ της πλάκας του Ειρηνικού και της Ευρασιατικής πλάκας. Η καταβύθιση της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την Ευρασιατική πλάκα έχει οδηγήσει σε μερικούς από τους ισχυρότερους σεισμούς στην ιστορία, συμπεριλαμβανομένου του σεισμού και του τσουνάμι Τοχόκου του 2011.
- Ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας (Τουρκία): Είναι ένα δεξιόστροφο ρήγμα απλής ολίσθησης που διατρέχει τη βόρεια Τουρκία. Σηματοδοτεί το όριο μεταξύ της Ευρασιατικής πλάκας και της πλάκας της Ανατολίας. Το ρήγμα είναι υπεύθυνο για συχνούς και καταστροφικούς σεισμούς στην περιοχή, συμπεριλαμβανομένου του καταστροφικού σεισμού της Σμύρνης το 1999.

- Ζώνη υποβύθισης Cascadia (Βόρεια Αμερική): Εκτείνεται κατά μήκος των ακτών της Βρετανικής Κολομβίας, στον Καναδά, και των αμερικανικών πολιτειών Ουάσινγκτον, Όρεγκον και βόρεια Καλιφόρνια. Πρόκειται για ένα συγκλίνον όριο πλακών όπου η πλάκα Juan de Fuca βυθίζεται κάτω από τη βορειοαμερικανική πλάκα. Η ζώνη καταβύθισης είναι ικανή να παράγει πολύ μεγάλους σεισμούς, παρόμοιους με τον καταστροφικό σεισμό του 2004 στον Ινδικό Ωκεανό.



**Εικόνα 3.5 :** Φωτογραφία από ένα τμήμα του ρήγματος του San Andreas στην περιοχή της Καλιφόρνια. Πρόκειται για ένα από τα πιο γνωστά ρήγματα στο κόσμο. Έχει συνολικό μήκος περίπου 1300 χιλιομέτρων και φτάνει ως την επιφάνεια της Γης.  
Πηγή: Amusing Planet, 2015.

### 3.4 Δευτερογενή Ρήγματα

Τα δευτερογενή σεισμικά ρήγματα, επίσης γνωστά ως ρήγματα διακλάδωσης, είναι μικρότερα ρήγματα που διακλαδίζονται από μεγαλύτερα κύρια και σχετίζονται με τη συνολική παραμόρφωση του φλοιού της Γης στην περιοχή του κύριου ρήγματος. Αναπτύσσονται συνήθως ως αποτέλεσμα της πολύπλοκης κατανομής των τάσεων και των μοτίβων παραμόρφωσης κοντά στο κύριο ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση κατά μήκος του κύριου ρήγματος μπορεί να προκαλέσει μεταβολές τάσεων στα περιβάλλοντα πετρώματα, οδηγώντας στη δημιουργία δευτερογενών ρηγμάτων. Τα ρήγματα αυτά μπορεί να σχηματίζονται παράλληλα, λοξά ή να τέμνουν το κύριο ρήγμα, ανάλογα με τις τοπικές τεκτονικές δυνάμεις και τις γεωλογικές συνθήκες.

Τα δευτερογενή ρήγματα μπορεί να ποικίλλουν σε μέγεθος, μήκος, προσανατολισμό και μετατόπιση. Μπορεί να κυμαίνονται από μικρά ρήγματα έως σημαντικά τμήματα ρηγμάτων, ανάλογα με τις περιφερειακές τεκτονικές συνθήκες και το μέγεθος του σχετικού σεισμικού γεγονότος. Μπορεί να παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς διάρρηξης με το κύριο ρήγμα, όπως κανονικό ρήγμα, ανάστροφο ρήγμα ή ρήγμα ολίσθησης. Ακόμη, μπορεί να μεταφέρουν τάσεις ή παραμορφώσεις από το κύριο ρήγμα, επηρεάζοντας τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος ρηγμάτων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα δευτερεύοντα ρήγματα μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία απελευθέρωσης συσσωρευμένων τάσεων, με αποτέλεσμα σεισμική δραστηριότητα ανεξάρτητη από το κύριο ρήγμα. Παρόλο που τα δευτερογενή ρήγματα είναι γενικά μικρότερα σε μέγεθος, σε σύγκριση με το κύριο ρήγμα, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό σεισμικό κίνδυνο. Ανάλογα με την εγγύτητά τους σε κατοικημένες περιοχές και τη δυνατότητά τους για ολίσθηση και μετατόπιση, μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία πρόσθετων σεισμικών γεγονότων και να προκαλέσουν ζημιές σε κατασκευές και υποδομές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα δευτερογενή ρήγματα μπορεί να διαρραγούν ανεξάρτητα, οδηγώντας σε μικρότερους αλλά και πάλι σημαντικούς σεισμούς.

Ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση των δευτερογενών ρηγμάτων αποτελεί σημαντική πτυχή της εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας και της έρευνας για τους σεισμούς. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της γεωλογικής χαρτογράφησης, των γεωδαιτικών μετρήσεων και της σεισμικής παρακολούθησης, για να μελετήσουν τη γεωμετρία, τη συμπεριφορά και την πιθανή δραστηριότητα των δευτερογενών ρηγμάτων. Η κατανόηση των σχέσεων μεταξύ κύριων και δευτερογενών ρηγμάτων βοηθά στην εκτίμηση του συνολικού σεισμικού κινδύνου και στη βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης σεισμών.

Ακολουθούν και μερικά παραδείγματα αξιοσημείωτων δευτερογενών σεισμικών ρηγμάτων:

- Ρήγμα San Jacinto (Καλιφόρνια, ΗΠΑ): Το ρήγμα San Jacinto είναι ένα σημαντικό δευτερογενές ρήγμα στη Νότια Καλιφόρνια που διακλαδίζεται από το ρήγμα San Andreas. Εκτείνεται για περίπου 250 χιλιόμετρα (155 μίλια) και διατρέχει την περιοχή ανατολικά του Λος Άντζελες. Είναι γνωστό για τη δυνατότητά του να παράγει σημαντικούς σεισμούς και αποτελεί σημαντικό στοιχείο της σύνθετης τεκτονικής δραστηριότητας στην περιοχή.
- Ρήγμα Garlock (Καλιφόρνια, ΗΠΑ): Είναι ένα σημαντικό δευτερογενές ρήγμα στην Καλιφόρνια που εκτείνεται για περίπου 300 χιλιόμετρα (186 μίλια) κατά μήκος του νοτιότερου τμήματος των βουνών Sierra Nevada. Πρόκειται για ένα δεξιόστροφο ρήγμα διάτμησης – ολίσθησης που τέμνει το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Το ρήγμα Garlock έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει μέτριους έως μεγάλους σεισμούς και αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του πολύπλοκου συστήματος ρηγμάτων της περιοχής.
- Ζώνη υποβύθισης της Βολιβίας (Νότια Αμερική): Η Βολιβιανή Ζώνη υποβύθισης είναι ένα συγκλίνον όριο πλακών όπου η πλάκα Nazca βυθίζεται κάτω από την πλάκα της Νότιας Αμερικής. Συνδέεται με



πολλά δευτερογενή ρήγματα που συμβάλλουν στη σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή.

Αυτά τα ρήγματα, όπως το ρήγμα Iquique και το ρήγμα Liquiñe-Ofqui, είναι υπεύθυνα για σημαντικούς σεισμούς, συμπεριλαμβανομένου του σεισμού της Χιλής το 2010.

- Northridge Blind Thrust Fault (Καλιφόρνια, ΗΠΑ): Είναι ένα δευτερογενές ρήγμα που ευθύνεται για τον σεισμό του Northridge το 1994 στη Νότια Καλιφόρνια. Πρόκειται για ένα ρήγμα ώθησης, που σημαίνει ότι παρουσιάζει αντίστροφη διάρρηξη, και δεν είναι σαφώς ορατό στην επιφάνεια της Γης. Καταδεικνύει τη σημασία των δευτερογενών ρηγμάτων στη συμβολή τους σχετικά με τη σεισμική δραστηριότητα και τους κινδύνους.



**Εικόνα 3.6:** Κινητό φορτηγό, σαρώνει το επιφανειακό ρήγμα Garlock στην περιοχή της ερήμου Μοχάβι έπειτα από σεισμό μεγέθους 7.1 βαθμών στη κλίμακα Ρίχτερ.

Πηγή: Nasa Earth Observatory

### 3.5 Ρήγματα και Αγωγοί

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα Κεφάλαια, τα σημερινά δίκτυα αγωγών εκτείνονται σε τεράστιες αποστάσεις πάνω στην επιφάνεια της Γης. Οι χερσαίοι αγωγοί είναι συνήθως θαμμένοι κάτω από την επιφάνεια της Γης, μιας και η ταφή τους, παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα και συμβάλει στην ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους.

Ένας σοβαρός κίνδυνος που διατρέχουν, ο οποίος αναφέρθηκε εν συντομία και στο υποκεφάλαιο με τους Γεωκινδύνους, είναι η διασταύρωση τους με σεισμικά ρήγματα. Η διάρρηξη του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες των γραμμών κοινής ωφέλειας, οδηγώντας σε διακοπή των υπηρεσιών. Η ρήξη αγωγών φυσικού αερίου ενδέχεται να προκαλέσει διαρροές και εκρήξεις, ενώ τα κατεστραμμένα



ηλεκτρικά καλώδια μπορεί να προκαλέσουν διακοπές ρεύματος. Οι βλάβες στο δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης είναι πιθανό να οδηγήσουν σε διακοπή παροχής και μόλυνση. Ακόμη, μπορεί να δημιουργηθούν ανώμαλες επιφάνειες εδάφους που θα καταστήσουν δυσχερή την πρόσβαση στην περιοχή αυτή. Τέλος υπάρχει περίπτωση να προκληθούν κατολισθήσεις ή ρευστοποίηση του εδάφους που ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή και τις υποδομές.

Η εφαρμογή μέτρων μπορεί να μετριάσει τις επιπτώσεις από πιθανή διάρρηξη του εδάφους. Τέτοια μέτρα, είναι:

- Η διενέργεια γεωτεχνικών ερευνών (για τον εντοπισμό γραμμών ρήγματος)
- Κατάλληλος σχεδιασμός (χρήση εύκαμπτων υλικών, ενισχυμένων αγωγών και εύκαμπτων συνδέσμων)
- Εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης με στόχο την ανίχνευση της εδαφικής κίνησης και της έγκαιρης προειδοποίησης
- Ανάπτυξη σχεδίων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης

Από τις αρχικές κιόλας διαδικασίες που πραγματοποιούνται στο κομμάτι του σχεδιασμού και της επιλογής της κατάλληλης όδευσης του αγωγού, μελετάται σε βάθος η περιοχή, και για την ύπαρξη σεισμικών ρηγμάτων. Η αποφυγή μεγάλων, γνωστών, κύριων ρηγμάτων είναι θεωρητικά απλή και στην πράξη συνήθως εφαρμόσιμη. Στην περίπτωση που βρεθεί ότι στην υποψήφια διαδρομή ο αγωγός περνά μέσα από σεισμικό ρήγμα, η διαδρομή συχνά απορρίπτεται. Έπειτα, είτε εξετάζεται το ενδεχόμενο να γίνει κάποια μικρή παράκαμψη με στόχο την αποφυγή του εν λόγω ρήγματος, είτε εξετάζεται μια τελείως διαφορετική διαδρομή. Ορισμένα ρήγματα όμως, παραμένουν άγνωστα ή δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα. Τα δευτερογενή, δημιουργούνται συχνά, σε αποστάσεις από τα κύρια, είναι πιθανό, στη προσπάθεια αποφυγής διασταύρωσης του αγωγού με το κύριο ρήγμα, εκείνος να συναντήσει κάποιο δευτερογενές.

Όταν ένας αγωγός περνά μέσα από ένα ρήγμα, υπάρχει κίνδυνος βλαβών κατά τη διάρκεια σεισμού. Όταν ένα ρήγμα κινείται, μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση του εδάφους, η οποία επηρεάζει άμεσα τον αγωγό, καθώς αυτή η κίνηση μπορεί να οδηγήσει σε πίεση και καταπόνηση του αγωγού και ενδεχομένως σε βλάβη ή αστοχία.

Στην περίπτωση που το ρήγμα έχει εντοπιστεί στην προκαταρκτική μελέτη, όμως κρίνεται ότι είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί κάποια παράκαμψη ή επιλογή άλλης διαδρομής, τότε ο αγωγός σχεδιάζεται έτσι ώστε να αντέχει την αναμενόμενη εδαφική κίνηση κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Κατά τον σχεδιασμό ενός αγωγού που διασχίζει ένα σεισμικό ρήγμα, οι μηχανικοί λαμβάνουν υπόψη την αναμενόμενη κίνηση του ρήγματος.

Ο σχεδιασμός του αγωγού ενσωματώνει μέτρα για την προσαρμογή στην κίνηση του εδάφους, όπως η χρήση βρόχων διαστολής ή η χρήση εύκαμπτων συνδέσμων σε συγκεκριμένα διαστήματα. Οι φορείς εκμετάλλευσης αγωγών μπορούν επίσης να εγκαταστήσουν πρόσθετα μέτρα, όπως συστήματα σεισμικής παρακολούθησης, στον αγωγό για να ανιχνεύσουν τυχόν αλλαγές στη συμπεριφορά ή την κατάσταση του αγωγού κατά τη διάρκεια του σεισμού ή μετά από αυτόν. Οι τακτικές επιθεωρήσεις και η συντήρηση του αγωγού είναι απαραίτητες για τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων ή βλαβών που προκαλούνται από σεισμική δραστηριότητα. Σε περίπτωση σεισμού, ο

φορέας εκμετάλλευσης θα εφαρμόσει σχέδια αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον και τη δημόσια ασφάλεια.

Συνοψίζοντας, οι αγωγοί που διασχίζουν ένα δευτερογενές σεισμικό ρήγμα απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό και συντήρηση για να πραγματοποιηθεί η ασφαλής μεταφορά υλικών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τον κίνδυνο ρύπανσης του περιβάλλοντος και τον κίνδυνο για τη δημόσια ασφάλεια. Οι αγωγοί που διασχίζουν σεισμικά ρήγματα υπόκεινται σε κανονιστικές απαιτήσεις και διαδικασίες αδειοδότησης. Η συμμόρφωση με αυτούς τους κανονισμούς διασφαλίζει ότι ο αγωγός σχεδιάζεται, κατασκευάζεται, λειτουργεί και συντηρείται με τρόπο που ελαχιστοποιεί τους κινδύνους που συνδέονται με τη διέλευση ρηγμάτων. Συνολικά, η διέλευση ενός αγωγού υδρογονανθράκων από ένα σεισμικό ρήγμα απαιτεί προσεκτικό μηχανολογικό σχεδιασμό, συνεχή παρακολούθηση και τήρηση πρωτοκόλλων ασφαλείας. Με την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων, είναι δυνατόν να μειωθούν οι κίνδυνοι και να διασφαλιστεί η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του αγωγού σε σεισμογενείς περιοχές.

### **3.5.1 Χαρακτηριστικοί τύποι βλαβών σε αγωγούς λόγω θραύσης ρήγματος**

Όταν ένας αγωγός υδρογονανθράκων διέρχεται από ένα σεισμικό ρήγμα, υπάρχει μια πληθώρα πιθανών βλαβών που ενδέχεται να προκύψουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της κίνησης του ρήγματος και του αγωγού. Οι κυριότερες βλάβες που μπορεί να εμφανιστούν σε τέτοιες περιπτώσεις είναι:

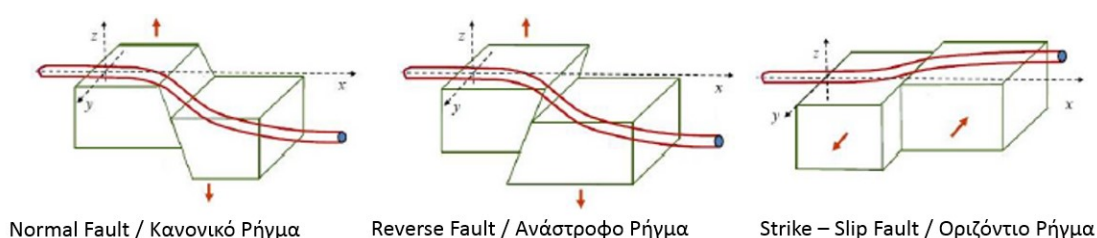
- **Ρήξη αγωγού:** Η σεισμική δραστηριότητα είναι πιθανό, να προκαλέσει σημαντική μετακίνηση του εδάφους, οδηγώντας έτσι σε τεράστια καταπόνηση του αγωγού. Η καταπόνηση αυτή, μπορεί να υπερβεί τη δομική ικανότητα του αγωγού, με αποτέλεσμα τη μερική ρήξη ή την αστοχία του. Η ρήξη του αγωγού ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση υδρογονανθράκων, θέτοντας σε κίνδυνο το περιβάλλον και την ανθρώπινη ασφάλεια.
- **Λυγισμός αγωγού:** Η κίνηση σεισμικών ρηγμάτων μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση του εδάφους, με αποτέλεσμα πλευρική ή κατακόρυφη μετατόπιση. Αυτή η μετατόπιση είναι πιθανό να προκαλέσει με τη σειρά της, κάμψη ή λυγισμό στον αγωγό, σε ορισμένα τμήματα. Ο λυγισμός μπορεί να περιορίσει τη ροή των υδρογονανθράκων, να θέσει σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα του αγωγού και να οδηγήσει σε διαρροές ή ρήξεις.
- **Παραμόρφωση αγωγού:** Τα σεισμικά γεγονότα μπορούν να υποβάλουν τον αγωγό σε παραμόρφωση, συμπεριλαμβανομένου του εφελκυσμού ή της συμπίεσης. Η τάση μπορεί να προκαλέσει επιμήκυνση και τέντωμα του αγωγού, οδηγώντας σε τοπική λέπτυνση ή ακόμη και σε ρήξη. Η συμπίεση από την άλλη, μπορεί να δημιουργήσει λυγισμό του αγωγού. Τόσο οι τάσεις εφελκυσμού όσο και οι θλιπτικές τάσεις μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη συνολική ακεραιότητα του αγωγού.
- **Αστοχία συνδέσμου σωλήνων:** Η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει μετακινήσεις στους αρμούς όπου συνδέονται τα τμήματα του αγωγού. Αυτή η μετακίνηση μπορεί να καταπονήσει τους αρμούς

και να οδηγήσει σε αστοχία τους, οδηγώντας στη συνέχεια σε διαρροές ή διαχωρισμό του αγωγού.

- Βλάβη στην επικάλυψη ή τη μόνωση: Η μετακίνηση του σεισμικού ρήγματος μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση του εδάφους και διατμητικές δυνάμεις που μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στις προστατευτικές επιστρώσεις ή τη μόνωση του αγωγού. Οι κατεστραμμένες επικαλύψεις μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο διάβρωσης, ενώ η υποβαθμισμένη μόνωση μπορεί να επηρεάσει τις θερμικές ιδιότητες του αγωγού. Ενδεχομένως ο αγωγός να οδηγηθεί σε ρηγμάτωση λόγω διάβρωσης από εξωτερική τάση.
- Μετατόπιση του εδάφους: Τα σεισμικά γεγονότα μπορούν να προκαλέσουν σημαντική μετατόπιση του εδάφους κατά μήκος της γραμμής του ρήγματος. Εάν ο αγωγός είναι άκαμπτα συνδεδεμένος με το έδαφος, η μετατόπιση αυτή μπορεί να ασκήσει υπερβολική πίεση στον αγωγό, με αποτέλεσμα δομική βλάβη ή αστοχία.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η σοβαρότητα αυτών των βλαβών μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος, το βάθος και τα χαρακτηριστικά του ρήγματος, το σχεδιασμό και την κατασκευή του αγωγού και την ποιότητα των πρακτικών συντήρησης και παρακολούθησης. Ο σωστός σχεδιασμός, οι τακτικές επιθεωρήσεις και η εφαρμογή προστατευτικών μέτρων είναι απαραίτητα για την ελαχιστοποίηση των πιθανών ζημιών και τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας των αγωγών υδρογονανθράκων που διέρχονται από σεισμικά ρήγματα.

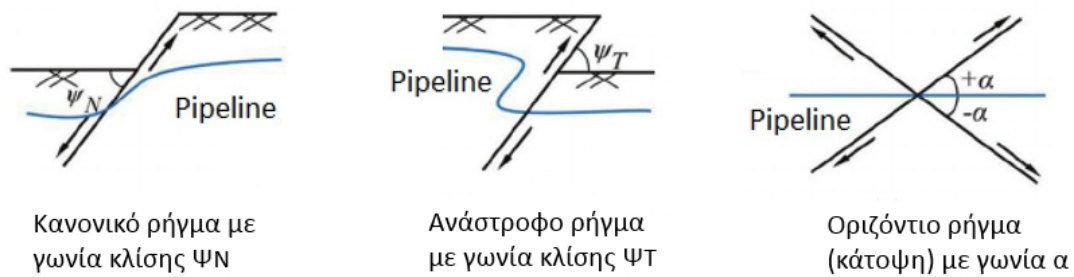
Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η αναπαράσταση της διέλευσης ενός αγωγού μέσω σεισμικού ρήγματος, ακολουθούν ορισμένες εικόνες. Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η διασταύρωση του αγωγού με τους δύο βασικούς τύπους ρήγματος, που περιεγράφηκαν αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.1, τα ρήγματα κατά κλίση (dip – slip), κανονικά και ανάστροφα, και τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (strike – slip), Δεξιόστροφα και Αριστερόστροφα.



**Εικόνα 3.7:** Αναπαράσταση αγωγού που διέρχεται μέσω σεισμικού ρήγματος για 3 διαφορετικούς τύπους ρήγματος.

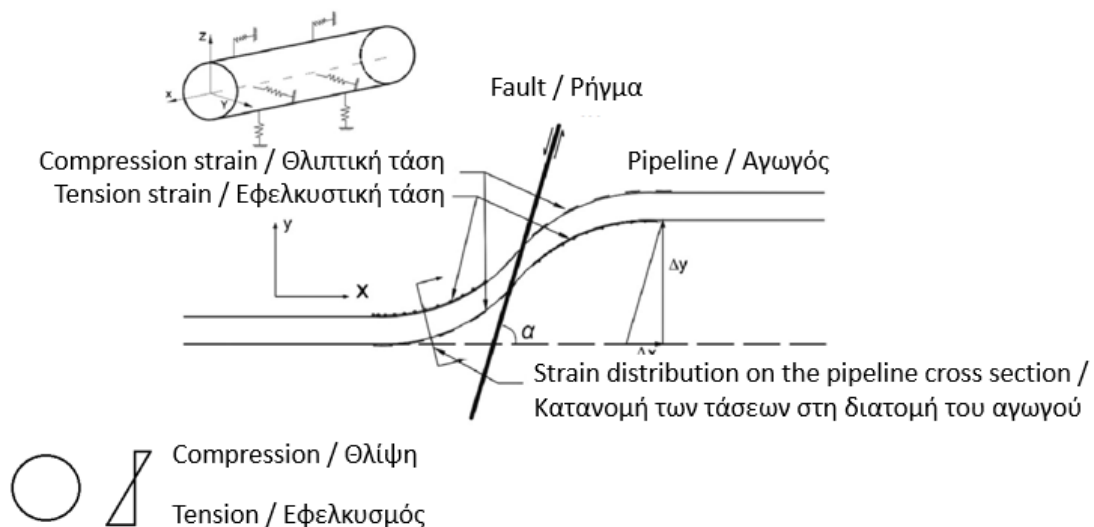
Πηγή: Research Gate

Στην Εικόνα 3.8, παρουσιάζεται η διέλευση του αγωγού από τους 3 αυτούς τύπους ρήγματος σε ένα απλούστερο σχήμα, ενώ συγχρόνως εμφανίζονται στο σχήμα και οι γωνίες  $\Psi_N$  και  $\alpha$ .



**Εικόνα 3.8:** Αναπαράσταση αγωγού που διέρχεται μέσω σεισμικού ρήγματος. Παρουσιάζονται οι 3 βασικοί τύποι ρήγματος καθώς και οι γωνίες  $\psi_N$  και  $\alpha$ .  
Πηγή: Research Gate

Τέλος στην Εικόνα 3.9, παρουσιάζεται ένα λίγο πιο σύνθετο σχήμα, που εμφανίζει έναν αγωγό που διέρχεται μέσω ενός σεισμικού ρήγματος, ενώ επιπροσθέτως σημειώνονται οι Εφελκυστικές και Θλιπτικές τάσεις που παρατηρούνται στο κάτω και στο πάνω μέρος του αγωγού λίγο πριν και λίγο μετά την περιοχή του ρήγματος.



**Εικόνα 3.9:** Αναπαράσταση αγωγού που διέρχεται μέσω σεισμικού ρήγματος. Παρουσιάζονται επίσης τα σημεία του αγωγού που παρατηρούνται θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις. Πηγή: Research Gate

### **3.5.2 Παραδείγματα αστοχιών σε δίκτυα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων λόγω σεισμικού ρήγματος**

Στο παρελθόν έχουν σημειωθεί αρκετά περιστατικά αστοχιών αγωγών που διέρχονταν μέσω κάποιου σεισμικού ρήγματος. Σε κάποιες περιπτώσεις οι συνέπειες περιορίστηκαν σε περιβαλλοντικές και οικονομικές, ενώ σε άλλες υπήρξαν και ανθρώπινες απώλειες. Ορισμένα από αυτά τα παραδείγματα παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω με χρονολογική σειρά.

Tarija, Βολιβία (1998): Το 1998, ένας αγωγός φυσικού αερίου στην Tarija της Βολιβίας έσπασε λόγω της διασταύρωσής του με ένα κοντινό σεισμικό ρήγμα. Παρόλο που δεν σημειώθηκε κάποιος θάνατος, η αστοχία προκάλεσε μεγάλη διαρροή αερίου και είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές ζημιές σε κοντινές υποδομές και περιουσίες.

Αλάσκα, ΗΠΑ (2002): Το 2002, ένας σεισμός μεγέθους 7,9 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, σημειώθηκε κοντά στο σύστημα αγωγών Trans-Alaska Pipeline System (TAPS), προκαλώντας μετακίνηση του αγωγού και είχε ως αποτέλεσμα τη διαρροή αργού πετρελαίου. Αν και η διαρροή περιορίστηκε γρήγορα, το περιστατικό ανέδειξε την ανάγκη για βελτιωμένη σεισμική παρακολούθηση και μέτρα ασφαλείας για τον αγωγό.

Σουμάτρα, Ινδονησία (2006): Τον Οκτώβριο του 2006, ένας αγωγός φυσικού αερίου στη Σουμάτρα της Ινδονησίας εξερράγη, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν περισσότεροι από 20 άνθρωποι και να τραυματιστούν δεκάδες άλλοι. Η αιτία της έκρηξης διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω κοντινού σεισμικού ρήγματος.

Chuanqing, Κίνα (2008): Τον Δεκέμβριο του 2008, ένας αγωγός φυσικού αερίου που ανήκε στην Chuanqing Gas στην επαρχία Guizhou της Κίνας εξερράγη, με αποτέλεσμα 10 άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους και περισσότεροι από 30 να τραυματιστούν. Η αιτία της έκρηξης ύστερα από έρευνα, διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω της διασταύρωσής του με κοντινό σεισμικό ρήγμα.

Νέα Ζηλανδία (2009): Το 2009, ένας σεισμός μεγέθους 7,8 βαθμών σημειώθηκε κοντά στον αγωγό West Coast Main Line στη Νέα Ζηλανδία, προκαλώντας σημαντικές ζημιές στον αγωγό και οδηγώντας σε μεγάλη διαρροή πετρελαίου. Η αιτία της διαρροής προσδιορίστηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω της διασταύρωσής του με ένα κοντινό σεισμικό ρήγμα.

Σαν Μπρούνο, Καλιφόρνια, ΗΠΑ (2010): Τον Σεπτέμβριο του 2010, ένας αγωγός φυσικού αερίου που ανήκε στην Pacific Gas and Electric (PG&E) στο Σαν Μπρούνο της Καλιφόρνια εξερράγη, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν οκτώ άνθρωποι και να καταστραφούν δεκάδες σπίτια. Έπειτα από έρευνες διαπιστώθηκε ότι αιτία της έκρηξης, ήταν η ρήξη του σωλήνα λόγω ενός κοντινού δευτερογενούς σεισμικού ρήγματος.

Wuhan, Κίνα (2010): Τον Ιούλιο του 2010 στην περιοχή Γουχάν της Κίνας σημειώθηκε έκρηξη ενός αγωγού φυσικού αερίου που είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο τουλάχιστον 12 ανθρώπων και τον τραυματισμό περισσότερων από 150. Η αιτία της έκρηξης ήταν η ρήξη του αγωγού λόγω της διασταύρωσής του με κοντινό σεισμικό ρήγμα.

Βαίβα, Πακιστάν (2012): Τον Φεβρουάριο του 2012, ένας αγωγός φυσικού αερίου στην πόλη Βαίβα του Πακιστάν εξερράγη, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν περισσότεροι από 20 άνθρωποι και να τραυματιστούν δεκάδες άλλοι. Η αιτία της έκρηξης διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω της διασταύρωσής του με κοντινό σεισμικό ρήγμα.

Μοντερέι, Μεξικό (2012): Τον Σεπτέμβριο του 2012, ένας αγωγός φυσικού αερίου στη περιοχή του Μοντερέι στο Μεξικό εξερράγη, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν τουλάχιστον 30 άνθρωποι και να τραυματιστούν δεκάδες άλλοι. Η αιτία της έκρηξης διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω της διασταύρωσής του με κοντινό σεισμικό ρήγμα.

Τερίκ, Μεξικό (2012): Τον Ιούνιο του 2012, ένας αγωγός φυσικού αερίου στο Τέρικ του Μεξικού εξερράγη, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν 27 άνθρωποι και να τραυματιστούν περισσότεροι από 50 άλλοι. Η αιτία της έκρηξης διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω ενός κοντινού σεισμικού ρήγματος.

Σιτσουάν, Κίνα (2013): Τον Νοέμβριο του 2013, ένας αγωγός φυσικού αερίου στην επαρχία Σιτσουάν της Κίνας εξερράγη, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν 13 άνθρωποι και περισσότεροι από 100 να τραυματιστούν. Η αιτία της έκρηξης διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω κοντινού σεισμικού ρήγματος.

Καλιφόρνια, ΗΠΑ (2015-2016): Τον Οκτώβριο του 2015, μια γεώτρηση στην εγκατάσταση αποθήκευσης φυσικού αερίου Aliso Canyon στην Καλιφόρνια απέτυχε, προκαλώντας μαζική διαρροή αερίου μεθανίου. Η διαρροή συνεχίστηκε για αρκετούς μήνες και είχε ως αποτέλεσμα την εκκένωση πολλών περιοχών. Αιτία της διαρροής διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του περιβλήματος του φρέατος λόγω ενός κοντινού σεισμικού ρήγματος.

Κουμαμότο, Ιαπωνία (2016): Τον Απρίλιο του 2016, μια σειρά σεισμών έπληξε την περιοχή Κουμαμότο της Ιαπωνίας, προκαλώντας σημαντικές ζημιές σε υποδομές και περιουσίες. Μία από τις σημαντικότερες επιπτώσεις του σεισμού ήταν η αστοχία ενός αγωγού φυσικού αερίου κοντά στην πόλη Mashiki, η οποία είχε ως αποτέλεσμα μια τεράστια πυρκαγιά και την εκκένωση της περιοχής.

Ισημερινός ( Εκουαδόρ ) (2016): Τον Απρίλιο του 2016, ένας σεισμός μεγέθους 7,8 βαθμών σημειώθηκε κοντά στον αγωγό του Ισημερινού, προκαλώντας σημαντικές ζημιές στον αγωγό και οδηγώντας σε μεγάλη διαρροή πετρελαίου. Η αιτία της διαρροής διαπιστώθηκε ότι ήταν ρήξη του αγωγού λόγω της διασταύρωσής του με ένα κοντινό σεισμικό ρήγμα. Τον Μάιο του 2017, ένας αγωγός φυσικού αερίου στο Yongwaun της Νότιας Κορέας έσπασε λόγω της διασταύρωσής του με ένα κοντινό σεισμικό ρήγμα. Η αστοχία προκάλεσε μεγάλη διαρροή αερίου και είχε ως αποτέλεσμα την εκκένωση της περιοχής.

Τα παραδείγματα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία της συνεκτίμησης των σεισμικών κινδύνων και την ανάγκη για βελτιωμένη σεισμική παρακολούθηση και μέτρα ασφαλείας για τους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων που τέμνονται με σεισμικά ρήγματα. Τα μέτρα αυτά όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να περιλαμβάνουν τακτικές επιθεωρήσεις και συντήρηση, καθώς και τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως σεισμικοί αισθητήρες και βαλβίδες διακοπής για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση της σεισμικής δραστηριότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Αριθμητική προσομοίωση αγωγού υπό κινηματική καταπόνηση λόγω δευτερεύοντος ρήγματος.

---

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ο τρόπος δημιουργίας ενός ρήγματος καθώς και οι συνηθέστεροι τύποι ρηγμάτων. Έγινε περιγραφή των διαφορών μεταξύ κύριου και δευτερογενούς ρήγματος ενώ ακόμη εμφανίστηκαν τα κατά κλίση (strike slip), τα κατά παράταξη (dip slip) και τα ρήγματα λοξής μετατόπισης (oblique slip).

Η διάρρηξη ενός ρήγματος είναι ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο που έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό ερευνητές και μηχανικούς μιας και δύναται να είναι ιδιαίτερα καταστροφικό για κτήρια, δομές και δίκτυα κοινής ωφέλειας. Για τους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων, οι μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις που προκαλούνται συχνά από τη διάρρηξη ρηγμάτων, είναι από τους πιο επικίνδυνους γεωκινδύνους. Στο παρελθόν έχουν καταγραφεί αρκετά περιστατικά βλαβών, ακόμη και καταστροφών σε τέτοιους αγωγούς λόγω της εγγύτητας τους σε σεισμικό ρήγμα, με πολλά από αυτά να παρουσιάζονται στη ενότητα 3.3.

Μια τακτική που ακολουθείται συχνά, όπως αναφέρθηκε και στο 2ο Κεφάλαιο, είναι, ο αγωγός να «ταξιδεύει» παράλληλα με τα ρήγματα που θα εντοπιστούν κατά τη διάρκεια της τοπογραφικής και γεωλογικής μελέτης, με στόχο τον περιορισμό ή και τον εκμηδενισμό των βλαβών λόγω των διαρρήξεων. Φυσικά, όπως επίσης αναφέρεται στο εν λόγω Κεφάλαιο, αυτή η διαδικασία δεν είναι τόσο απλή, μιας και σε αρκετές περιπτώσεις η αλλαγή της διαδρομής του αγωγού επιβαρύνει σε πολύ μεγάλο βαθμό οικονομικά το έργο ή είναι τεχνικά μη εφικτή. Επομένως δημιουργείται η ανάγκη για μια ρεαλιστική προσομοίωσης της καταπόνησης των αγωγών αυτών ύστερα από διασταύρωση τους με σεισμικό ρήγμα.

Βιβλιογραφικά, υπάρχουν πολλά προσομοιώματα μικρής και λιγότερα μεγάλης κλίμακας, λόγω του ότι η διερεύνηση αυτού του φαινομένου είναι υψηλού κόστους και ιδιαίτερα χρονοβόρα. Ακόμη, παρατηρείται, πως δεν υπάρχει μεγάλη έρευνα για την περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με δευτερογενείς διαρρήξεις στην προσπάθεια αποφυγής του κύριου ρήγματος.

Τα προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται συνήθως μπορεί να είναι πειραματικά, αναλυτικά ή αριθμητικά. Η πειραματική διερεύνηση του φαινομένου περιλαμβάνει κυρίως φυγοκεντρικά προσομοιώματα μικρής κλίμακας. Η επιτάχυνση μέσω φυγοκέντρισης στοχεύει στην προσομοίωση των εδαφικών συνθηκών με αυτές που υπάρχουν στο πεδίο. Πριν από την ανάπτυξη των αριθμητικών, τα αναλυτικά προσομοιώματα ήταν τα πιο διαδεδομένα για τη μελέτη της καταπόνησης των αγωγών μιας και είχαν σαν πλεονέκτημα την ταχύτητα τους και το γεγονός ότι είναι αυτοματοποιημένα. Ωστόσο μιας και οι μεθοδολογίες είχαν υποστεί αρκετές απλοποιήσεις τα τελικά αποτελέσματα παρουσίαζαν αβεβαιότητες.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία για τη προσομοίωση του εδάφους και του αγωγού χρησιμοποιήθηκαν τα αριθμητικά προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν από τους Chatzidakis et al. (2021). Τα προσομοιώματα αυτά περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες αυτού του Κεφαλαίου και τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα στο 5ο Κεφάλαιο.

## **4.2 Περιγραφή αριθμητικών προσομοιωμάτων**

Αρχικά θεωρείται χρήσιμο να οριστεί η έννοια του αριθμητικού προσομοιώματος. Ως αριθμητικό προσομοίωμα ορίζεται ένα υπολογιστικό πρόγραμμα, το οποίο αναπαριστά τη συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος, μέσω μαθηματικών μοντέλων κι αλγορίθμων. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του πραγματικού συστήματος, εκτελεί υπολογισμούς χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Τέτοια προσομοιώματα χρησιμοποιούνται συχνά και σε πολλούς τομείς και με τη βοήθεια τους μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες, να προβλεφθεί η εξέλιξη του μελλοντικά και να πραγματοποιηθούν πειράματα που θα ήταν από πολύ δύσκολο έως ανέφικτο να γίνουν στην πραγματικότητα.

Οι τύποι αριθμητικών προσομοιώσεων ποικίλλουν ανάλογα με το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί αλλά και τον τομέα εφαρμογής. Στη μηχανική, τα αριθμητικά προσομοιώματα χρησιμοποιούνται συχνά για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση μηχανικών συστημάτων, όπως λόγου χάρη αεροσκάφη, οχήματα, γέφυρες και κτίρια, μιας και βοηθούν στην εκτίμηση διαφόρων παραγόντων, νωρίτερα από τη φάση κατασκευής. Αυτό μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή δοκιμών και πειραμάτων υψηλού κόστους, καθώς και στη βελτίωση της απόδοσης και ασφάλειας των μηχανικών συστημάτων.

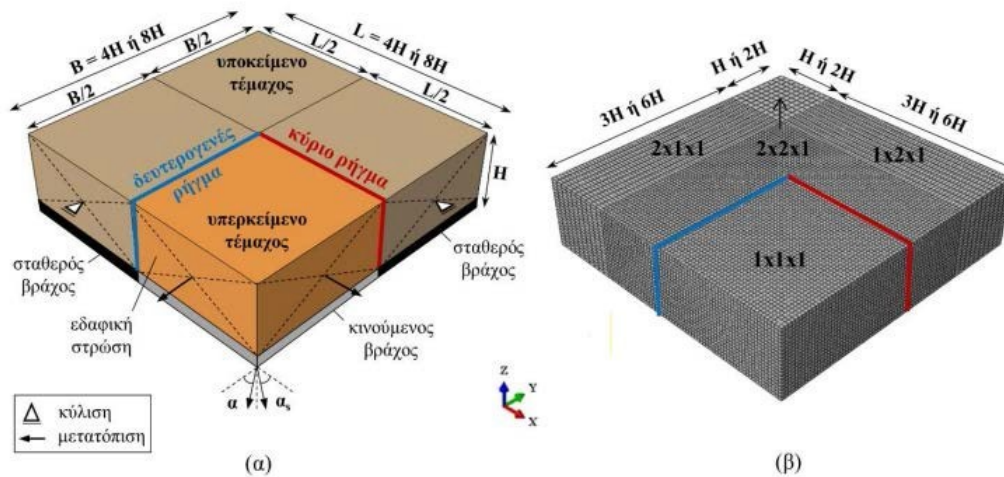
Συνολικά, το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη μοντελοποίηση, την πρόβλεψη και τον πειραματισμό σε ποικίλους τομείς. Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και υπολογιστών, είναι δυνατή η αναπαράσταση και η ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων και φαινομένων και η ταυτόχρονη παροχή πολύτιμων πληροφοριών. Είναι σημαντικό όμως, να μην λησμονείται, ότι τα αριθμητικά προσομοιώματα βασίζονται σε μαθηματικά μοντέλα και απλοποιήσεις της πραγματικότητας. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των μοντέλων και την κατανόηση των παραμέτρων και των συνθηκών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση.

### **4.2.1 Αριθμητικό προσομοίωμα εδάφους**

Για τη δημιουργία του αριθμητικού προσομοιώματος, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ABAQUS (Simulia, 2014). Η επιλογή της ανάλυσης Dynamic – Explicit αυτού του λογισμικού, έναντι της συμβατικής Static – Standard, είχε ως βασική αιτία το αρκετά υψηλότερο οικονομικό κόστος της δεύτερης. Δεδομένου ότι η ανάλυση που επιλέχθηκε είναι δυναμική, γεγονός που συνεπάγεται τη δημιουργία αδρανειακών δυνάμεων οι οποίες εξαρτώνται από το ρυθμό φόρτισης και επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, χρειάστηκε η προσεκτική επιλογή του ρυθμού μετακίνησης η οποία δύναται να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση της



επιρροής των αδρανειακών δυνάμεων και την παραγωγή ψευδο-στατικών αποτελεσμάτων σύμφωνα με τους Ni et al. (2018). Πιο συγκεκριμένα ο ρυθμός μετακίνησης που ορίζεται ως το πηλίκο της κατακόρυφης μετακίνησης βάσης ως προς τη διάρκεια του βήματος ανάλυσης, επιλέγεται να είναι γραμμικός και ίσος με 1%. Στην Εικόνα 4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται.



**Εικόνα 4.1:** Αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε: (α) Συνοριακές συνθήκες, (β) διαστάσεις πεπερασμένων στοιχείων. Πηγή: Χατζηδάκης, Δ. (2021)

Όπως φαίνεται, κάτω από το την αμμώδη εδαφική στρώση υπάρχει στέρεος βράχος ο οποίος χωρίζεται σε σταθερό και κινούμενο τμήμα τα οποία αντιστοιχούν στο υποκείμενο και το υπερκείμενο αντίστοιχα, τέμαχος. Ακόμη, έχει επιλεγθεί διαφορετικό χρώμα στις γραμμές που αντιπροσωπεύουν τα ρήγματα για την αποφυγή σύγχυσης. Το κύριο ρήγμα συμβολίζεται από την κόκκινη γραμμή, ενώ το δευτερογενές από τη μπλε. Το πάχος της εδαφικής στρώσης, συμβολίζεται με το γράμμα  $H$ , ενώ το μήκος και το πλάτος του προσομοιώματος συμβολίζονται αντίστοιχα με τα γράμματα  $L$  και  $B$ . Το πάχος  $H$  θεωρείται ομοιόμορφο σε όλη την περιοχή μελέτης, ενώ για τις περιπτώσεις του κανονικού και του ανάστροφου κύριου ρήγματος, το μήκος  $L$  και το πλάτος  $B$  του προσομοιώματος έχουν επιλεγθεί ίσα με τιμή 4 φορές μεγαλύτερη της εδαφικής στρώσης ( $L=B=4H$ ) ώστε τα αποτελέσματα να μην επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος. Η επιλογή αυτών των τιμών των παραπάνω διαστάσεων προτείνεται αρχικά από τον Bray (1990) κι έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετά αριθμητικά προσομοιώματα για μεμονωμένα ρήγματα (Agalianos et al., 2020; Anastasopoulos et al., 2007; Anastasopoulos & Gazetas, 2007b; Rokonzaman et al., 2015).

Για την περίπτωση ταυτόχρονης διάρρηξης δύο ρηγμάτων, οι προαναφερθείσες διαστάσεις κρίνονται επαρκείς για κανονικό και ανάστροφο κύριο ρήγμα. Δεν επαρκούν όμως για την περίπτωση του ρήγματος πλάγιου τύπου λόγω των περίπλοκων μοτίβων διάρρηξης που αναπτύσσονται. Έτσι, στις περιπτώσεις αυτές

το μήκος  $L$  και το πλάτος  $B$  του προσομοιώματος λαμβάνουν τιμή 8 φορές μεγαλύτερη της εδαφικής στρώσης  $H$  ( $L=B=8H$ ).

Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης εφαρμόζεται η βαρύτητα στο προσομοίωμα και συγχρόνως αναπτύσσονται κι οι αρχικές γεωστατικές τάσεις του εδάφους ενώ στο δεύτερο βήμα, εφαρμόζονται οι μετατοπίσεις των ρηγμάτων.

Οι κόμβοι της βάσης είναι αρθρωμένοι στο πρώτο βήμα ενώ στο δεύτερο παραμένουν αρθρωμένοι μόνο εκείνοι του υποκείμενου τεμάχους, με αυτούς του υπερκείμενου να μετατοπίζονται κατά μήκος των τριών διαστάσεων ( $X, Y, Z$ ) με σκοπό την προσομοίωση της διάρρηξης του ρήγματος.

Η παραπάνω μετατόπιση αντιστοιχεί σε κλίση των ρηγμάτων με τους άξονες. Πιο συγκεκριμένα, κλίση  $\alpha$  μεταξύ του κύριου ρήγματος και του άξονα  $Y$  και κλίση  $\alpha$  μεταξύ του δευτερογενούς ρήγματος και του άξονα  $X$ , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1.

Όσον αφορά τους κόμβους κατακόρυφης επιφάνειας έναντι του κύριου ρήγματος, μετατοπίζονται αποκλειστικά στον άξονα  $Y$ . Η κατακόρυφη μετατόπιση στον άξονα  $Z$  προκύπτει από την μετατόπιση των κόμβων της βάσης και τη βαρύτητα. Οι κόμβοι κατακόρυφης επιφάνειας έναντι του δευτερογενούς ρήγματος, μετατοπίζονται αποκλειστικά κατά τον άξονα  $X$  στην περίπτωση του πλάγιου κύριου ρήγματος για να υπάρξει η προσομοίωση της οριζόντιας μετατόπισης, ενώ παραμένουν σταθεροί στην περίπτωση του κύριου ρήγματος κατά κλίση. Να σημειωθεί ότι το κύριο ρήγμα μπορεί να είναι κατά κλίση ή πλάγιου τύπου, ενώ το δευτερογενές είναι πλάγιου μιας και κάθε μετακίνηση προκύπτει από εκείνες του κύριου.

Τέλος η προσομοίωση της εδαφικής στρώσης πραγματοποιείται με εξαεδρικά οκτακομβικά στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (C3D8R) τα οποία υπάρχουν στην βιβλιοθήκη του λογισμικού ABAQUS (Simulia, 2014). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1β, υπάρχουν ορισμένες διαφορές στην διακριτοποίηση των στοιχείων. Στην περιοχή γύρω από τα ρήγματα οι διαστάσεις των στοιχείων είναι:

$$d_{FE,X} = d_{FE,Y} = d_{FE,Z} = 1m$$

Για ρήγμα κατά την κλίση τα στοιχεία αυτά βρίσκονται σε ένα μήκος  $3H$  ενώ για πλάγιο σε ένα μήκος  $6H$ .

Στις περιοχές του υποκείμενου τεμάχους, υπάρχουν δύο διαφορετικές διακριτοποιήσεις. Όπως ακριβώς φαίνεται και στην Εικόνα 4.1β, υπάρχουν δύο περιοχές με διαστάσεις  $H \times 3H$  για ρήγμα κατά κλίση ή  $2H \times 6H$  για πλάγιου τύπου, όπου η διακριτοποίηση είναι λίγο πιο αραιή και τα στοιχεία έχουν διαστάσεις:

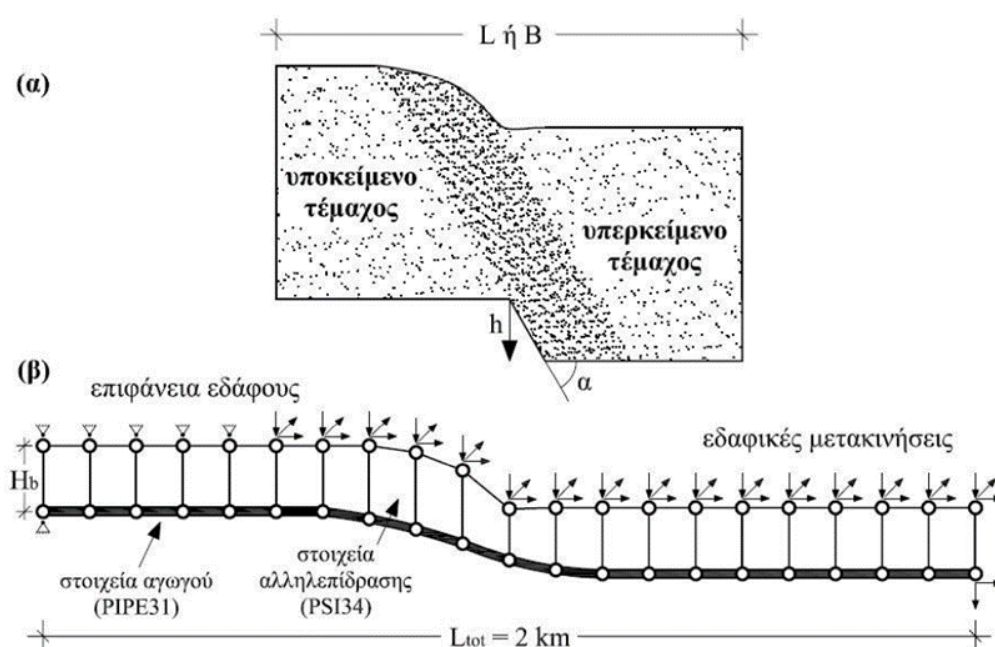
$$d_{FE,X} = 1m \text{ ή } 2m, d_{FE,Y} = 1m \text{ ή } 2m \text{ και } d_{FE,Z} = 1m$$

Ενώ στη τελευταία περιοχή με διαστάσεις  $H \times H$  ή  $2H \times 2H$  ανάλογα με το αν το ρήγμα είναι κατά κλίση ή πλάγιου τύπου, η διακριτοποίηση είναι ακόμα πιο αραιή και οι διαστάσεις των στοιχείων είναι:

$$d_{FE,X} = d_{FE,Y} = 2m \text{ και } d_{FE,Z} = 1m$$

#### 4.2.2 Αριθμητικό προσομοίωμα αγωγού

Για την επίτευξη της προσομοίωσης της καταπόνησης του αγωγού λόγω των σχετικών εδαφικών μετακινήσεων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και η ανάλυση Static – Standard από το λογισμικό ABAQUS (Simulia, 2014). Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία τύπου PIPE31 με ένα σημείο ολοκλήρωσης. Όσον αφορά την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού έγινε χρήση τρισδιάστατων στοιχείων τύπου PSI34 τα οποία αποτελούνται από 4 κόμβους (2 βρίσκονται στον αγωγό και 2 στην επιφάνεια του εδάφους, τα δύο ζευγάρια κόμβων έχουν απόσταση ίση με το βάθος επίχωσης  $H_b$ ) και οδηγούν στη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους σε 3 διευθύνσεις (κατακόρυφα – πλευρικά – αξονικά). Η Εικόνα 4.2 που ακολουθεί, προσφέρει μια καθαρότερη εικόνα των παραπάνω.



**Εικόνα 4.2 :** Εδαφική Παραμόρφωση λόγω της μετατόπισης του ρήγματος (α) και προσομοίωμα για την αλληλεπίδραση εδάφους – Αγωγού (β). Πηγή: Χατζηδάκης, Δ. (2021)

Ο λόγος επιλογής των παραπάνω στοιχείων έναντι των απλούστερων, τύπου ελατηρίου, είναι αρχικά η δυνατότητά τους να δημιουργούν περιστροφή των διευθύνσεων αλληλεπίδρασης, βάσει της περιστροφής του αγωγού. Ακόμη έχουν τη δυνατότητα παροχής αυτόματου υπολογισμού των δυνάμεων αλληλεπίδρασης (πάνω στον αγωγό) από τις εξισώσεις του αμερικάνικου κανονισμού ALA (2001) βάσει των χαρακτηριστικών του εδάφους (π.χ. γωνία εσωτερικής τριβής, ειδικό βάρος) και του βάθους  $H_b$ . Έτσι, τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά. Να σημειωθεί, πως λήφθηκε υπόψη για την προσομοίωση και η επιρροή των πλαστικών παραμορφώσεων και της γεωμετρικής μη γραμμικότητας.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικόνα 4.2, οι σχετικές εδαφικές μετακινήσεις που έχουν υπολογιστεί για την αντίστοιχη θέση του αγωγού εφαρμόζονται στους κόμβους επιφάνειας των στοιχείων PSI34 εντός ενός συγκεκριμένου μήκους (L ή B). Εντός του τμήματος αυτού για τα στοιχεία του αγωγού ισχύει ότι :

$$d_{FE} = 1\text{m ή } 2\text{m}$$

Ύστερα από αντίστοιχη μελέτη για τα στοιχεία του αγωγού εκτός αυτού του τμήματος επιλέχθηκε:

$$d_{FE} = 2\text{m}$$

Τέλος το μήκος του αγωγού παίρνει την τιμή:

$$L_{\text{tot}} = 2\text{km}$$

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στο άκρο του αγωγού προς το υπερκείμενο τμήμα, ο αγωγός μετακινείται σύμφωνα με τη μετατόπιση του ρήγματος και το ίδιο συμβαίνει και με τους κόμβους επιφάνειας των στοιχείων PSI34. Στο άκρο του αγωγού προς το υποκείμενο τμήμα, ο αγωγός πακτώνεται και οι κόμβοι αρθρώνονται.

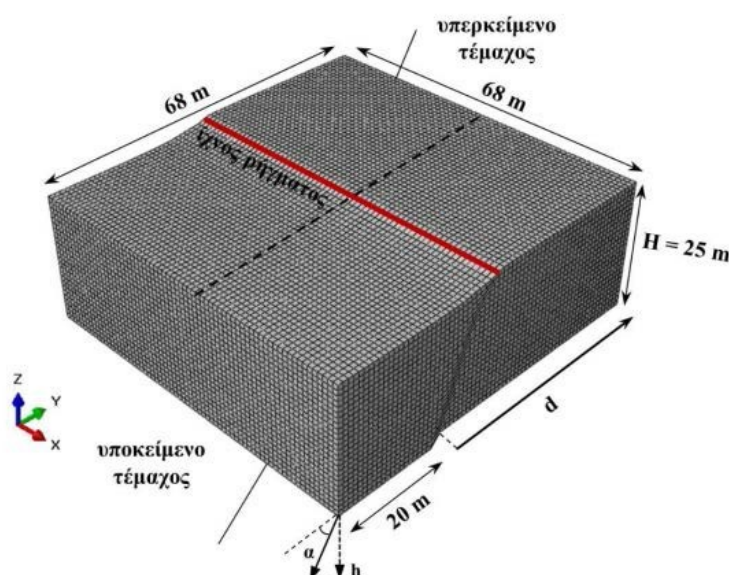
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Σύγκριση αριθμητικών Προσομοιωμάτων με Πειραματικά Δεδομένα

Ένα αριθμητικό προσομοίωμα οφείλει να είναι ρεαλιστικό, να ανταποκρίνεται δηλαδή στην πραγματικότητα. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την εξασφάλιση αυτού, είναι η σύγκριση του με πειραματικά αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιήθηκαν τα προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν από τους Chatzidakis et al. (2021).

### 5.1 Αριθμητικό Προσομοίωμα Εδάφους

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η δυσκολία εντοπίζεται στο γεγονός ότι βιβλιογραφικά δεν υπάρχουν πειραματικά προσομοιώματα για ταυτόχρονη διάρρηξη κύριου και δευτερογενούς ρήγματος. Έτσι χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μια τροποποίηση ώστε το προσομοίωμα να αντιστοιχεί στην περίπτωση μεμονωμένου ρήγματος, το οποίο στη συνέχεια συγκρίνεται με πειραματικά αποτελέσματα του προσομοιώματος των Anastopoulos et al. (2007) για την περίπτωση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος.



**Εικόνα 5.1:** Αριθμητικό προσομοίωμα για την περίπτωση μεμονωμένου Κανονικού ρήγματος. Πηγή: Χατζηδάκης, Δ. (2021)

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα για την περίπτωση του κανονικού ρήγματος. Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαστάσεις του συγκεκριμένου προσομοιώματος συμφωνούν με εκείνες των πειραματικών προσομοιωμάτων των Anastopoulos et al. (2007). Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος πεπερασμένων στοιχείων κι οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες. Τέλος η διακριτοποίηση ήταν πιο πυκνή με τις διαστάσεις των στοιχείων να είναι σε όλο το προσομοίωμα:

$$d_{FE,X} = d_{FE,Y} = d_{FE,Z} = 1m$$

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε φυγοκεντριστή επιτάχυνσης 100g για κανονικά και ανάστροφα ρήγματα, στο Πανεπιστήμιο του Dundee. Τα χαρακτηριστικά της άμμου που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στο Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1.** Χαρακτηριστικά άμμου που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα του πανεπιστημίου του Dundee

Τύπος άμμου	Μέτρια προς Πυκνή τύπου Fontainebleau
Σχετική Πυκνότητα $D_r$	80%
Μέγιστη γωνία εσωτερικής τριβής εδάφους $\phi_p$	$39^\circ$
Υπολειπόμενη γωνία εσωτερικής τριβής εδάφους $\phi_{res}$	$30^\circ$
Μέγιστη γωνία διαστολής εδάφους $\psi_p$	$11^\circ$

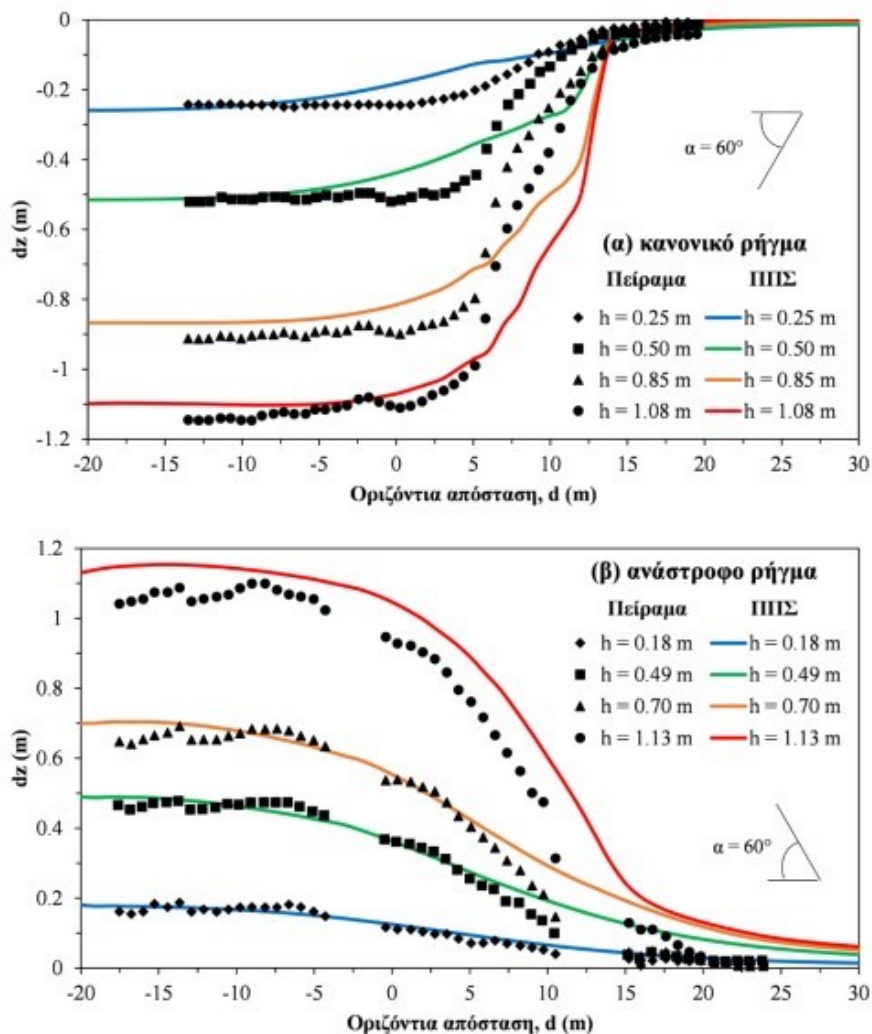
Επίσης, για στοιχεία διαστάσεων  $d_{FE} = 1\text{ m}$  κι επιτάχυνση 100g, η οκταεδρική πλαστική διατμητική παραμόρφωση αστοχίας υπολογίστηκε  $\gamma_p = 0.215$ , το βάθος της εδαφικής στρώσης λαμβάνει τη τιμή  $H = 25\text{ m}$ , ο λόγος Poisson είναι ίσος με  $\nu = 0.33$  και παραμένει σταθερός, ενώ τέλος το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τις δοκιμές άμεσης διάτμησης θεωρήθηκε ότι αυξάνεται γραμμικά με το βάθος  $z$  ως εξής:

$$E = 0.8z + 5$$

Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πιο συγκεκριμένα η σύγκριση εστιάζει στις κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις και για το κανονικό και για το ανάστροφο ρήγμα. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος που εφαρμόζονται ( $h$ ) είναι διαφορετικές για κάθε περίπτωση ρήγματος, ενώ η γωνία κλίσης του ρήγματος είναι σε κάθε περίπτωση  $\alpha = 60^\circ$ .

- Κανονικό ρήγμα:  $h = 0.25, 0.5, 0.85$  και  $1.08$  m
- Ανάστροφο ρήγμα:  $h = 0.18, 0.49, 0.7$  και  $1.13$  m

Τα αποτελέσματα του αριθμητικού προσομοιώματος είναι πολύ κοντά στα αντίστοιχα του πειραματικού και στις δύο περιπτώσεις ρήγματος μιας και οι αποκλίσεις είναι μικρές για όλες τις μετατοπίσεις ρήγματος. Μάλιστα για μικρές μετατοπίσεις ρήγματος, οι επιφανειακές μετακινήσεις οριακά ταυτίζονται στα δύο προσομοιώματα. Όσο η μετατόπιση  $h$  λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή το αριθμητικό προσομοίωμα φαίνεται να δίνει μεγαλύτερες επιφανειακές μετακινήσεις, οι οποίες όμως θεωρούνται αποδεκτές. Οι αποκλίσεις μπορούν να αποδοθούν στην ακρίβεια ή την ποιότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων ύστερα από υποθέσεις παραδοχές και απλοποιήσεις του αριθμητικού προσομοιώματος. Σε καμία περίπτωση αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν τόσο μεγάλες ώστε να καθιστούν το αριθμητικό προσομοίωμα μη επαρκές.



**Εικόνα 5.2 :** Σύγκριση μεταξύ των μετακινήσεων του αριθμητικού και του πειραματικού προσομοιώματος για τις περιπτώσεις Κανονικού (α) και Ανάστροφου (β) ρήγματος.

Πηγή: Χατζηδάκης, Δ. (2021)



## 5.2 Αριθμητικό Προσομοίωμα Αγωγού

Το αριθμητικό προσομοίωμα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, βασίζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία του κανονισμού ALA (2001). Η μεθοδολογία αυτή έχει συγκριθεί στο παρελθόν με πειραματικά αποτελέσματα και έχει παρουσιάσει αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια (Jalali et al., 2016; X. Liu, Zhang, Han, et al., 2016; Rofooei et al., 2018; Saiyar et al., 2016).

Το προτεινόμενο αριθμητικό προσομοίωμα συγκρίθηκε με το πειραματικό αλλά και το αριθμητικό προσομοίωμα των Tsatsis et al. (2019) για την περίπτωση μεμονωμένου ρήγματος, μιας και ενώ υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα για τη διασταύρωση του αγωγού με κύριο ρήγμα, στην περίπτωση της διασταύρωσης με δευτερογενές, παρατηρείται έλλειψη.

Το προσομοίωμα αυτό είναι για αγωγό μικρής κλίμακας για την περίπτωση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα του θεωρήθηκαν κατάλληλα ως προς τη σύγκριση λόγω του βάθους στο οποίο έχει θαφτεί ο αγωγός (η απόσταση μεταξύ του αγωγού και της βάσης του πειραματικού προσομοιώματος αντιστοιχεί περίπου στο 15% του συνολικού βάθους).

Στον πίνακα εμφανίζονται στοιχεία σχετικά με τις τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών που έχουν επιλεγεί από τους Tsatsis et al (2019).

**Πίνακας 5.2:** Τιμές διαφόρων χαρακτηριστικών που έχουν επιλεγεί στο προσομοίωμα των Tsatsis et al. (2019).

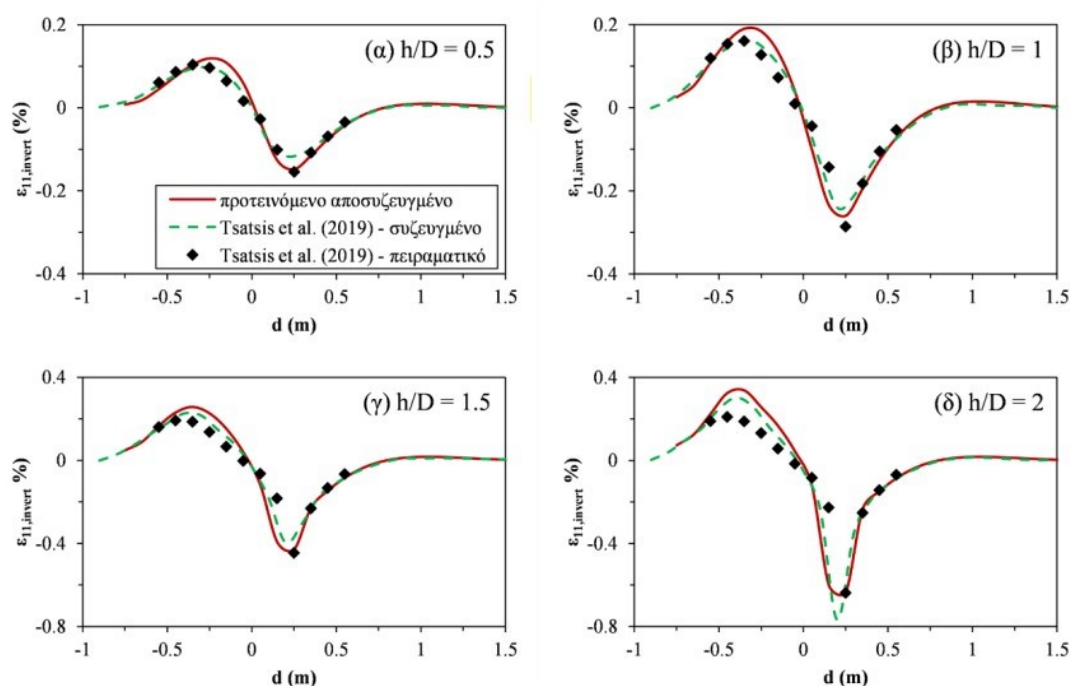
Τύπος Εδάφους	Ξηρή άμμος ( τύπου Longstone )
Σχετική Πυκνότητα άμμου	$D_r = 90 \%$
Ολικό ειδικό βάρος	$\gamma = 15,68 \frac{kN}{m^3}$
Διάμετρος Αγωγού	$D = 35 \text{ mm}$
Πάχος τοιχωμάτων Αγωγού	$t = 0.5 \text{ mm}$
Ποιότητα Χάλυβα	AISI Type 444
Βάθος Επίχωσης	0.55m
Γωνία Εσωτερικής Τριβής	$\varphi = 38^\circ$
Συντελεστής Πλευρικών Ωθήσεων	$K_o = 1 - \sin\varphi = ( 0,384 )$
Συντελεστής Απομείωσης Τριβής	$k = 0.8$
Μήκος Αγωγού	$L = 70 * D = 2.45 \text{ m}$
Μήκος Πεπερασμένων Στοιχείων	$d_{FE} = 0.1 \text{ m}$



Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για 4 διαφορετικές κανονικοποιημένες κατακόρυφες μετατοπίσεις ρήγματος:

$$\text{i) } \frac{h}{D} = 0.5, \text{ ii) } \frac{h}{D} = 1, \text{ iii) } \frac{h}{D} = 1.5, \text{ iv) } \frac{h}{D} = 2$$

μεταξύ του προτεινόμενου προσομοιώματος και του συζευγμένου αριθμητικού καθώς και του πειραματικού προσομοιώματος, που αναπτύχθηκαν από τους Tsatsis et al. (2019), ενώ σαν μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε η παραμόρφωση στην κάτω παρειά του αγωγού,  $\varepsilon_{11, \text{invert}}$ . Στην Εικόνα 5.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα και διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες για τα 3 προσομοιώματα βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους. Το προτεινόμενο προσομοίωμα φαίνεται να αποκλίνει ελάχιστα όσον αφορά τις εφελκυστικές παραμορφώσεις όμως παρουσιάζει μια μεγαλύτερη ταύτιση στις θλιπτικές. Σε κάθε περίπτωση οι αποκλίσεις αυτές είναι αρκετά μικρές με αποτέλεσμα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα αποτελέσματα του προτεινόμενου προσομοιώματος να θεωρούνται ικανοποιητικά.



**Εικόνα 5.3 :** Σύγκριση του αριθμητικού προσομοιώματος που προτάθηκε, με τα πειραματικό και αριθμητικό προσομοίωμα των Tsatsis et al. (2019) για κανονικό ρήγμα και 4 διαφορετικές μετατοπίσεις ( $h/D$ , α-δ). Πηγή: Χατζηδάκης, Δ. (2021)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Παραμετρική Ανάλυση Αγωγού υπό Κινηματική Καταπόνηση λόγω Δευτερογενούς Ρήγματος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική έρευνα της διπλωματική εργασίας. Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο 4ο και 5ο Κεφάλαιο, για τον αγωγό και το έδαφος, και το λογισμικό Abaqus (Simulia, 2014), πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με σκοπό τη συλλογή αποτελεσμάτων σχετικά με τις μετακινήσεις και τις παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού λόγω της διασταύρωσης του με σεισμικό ρήγμα. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αυτά σχετίζονται με τις κατακόρυφες μετακινήσεις (δηλαδή τις μετακινήσεις των σημείων κατά τον άξονα z) και τις μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις των σημείων αυτών, οι οποίες ταυτίζονται με εφελκυστικές και θλιπτικές αντίστοιχα. Όσον αφορά το είδος των σεισμικών ρηγμάτων, όπως εξηγείται και παρακάτω πιο αναλυτικά, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις του κύριου και του δευτερογενούς ρήγματος, για τους τύπους κανονικό (normal), ανάστροφο (reverse) και λοξής μετατόπισης (oblique slip).

Η επιλογή των τιμών για τα διάφορα χαρακτηριστικά του αγωγού και του εδάφους, βασίστηκε κατά κύριο λόγο σε προτάσεις από βιβλιογραφία με στόχο την όσο το δυνατό μεγαλύτερη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων. Οι επιλεγμένες αυτές τιμές παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2.

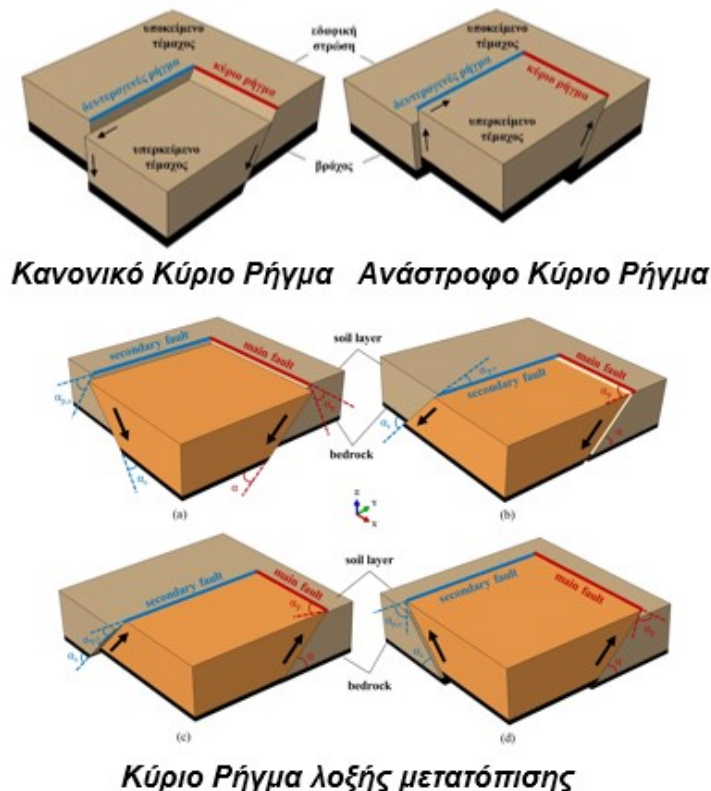
**Πίνακας 6.1:** Τιμές διαφόρων χαρακτηριστικών του αγωγού

Διάμετρος Αγωγού	$D = 0.9144 \text{ m} (= 36'')$
Πάχος Τοιχωμάτων Αγωγού	$t = 0.01905 \text{ m} (= 0.75'')$
Τύπος Χάλυβα Αγωγού	X65
Μέτρο Ελαστικότητας	$E = 210 \text{ GPa}$
Τάση Διαρροής	$\sigma_y = 490 \text{ MPa}$
Λόγος Poisson	$\nu = 0.3$
Συντελεστές Ramberg – Osgood	$n = 32.5$ $\alpha_r = 1.18$
Συντελεστής Απομείωσης Τριβής	$k = 0.6$

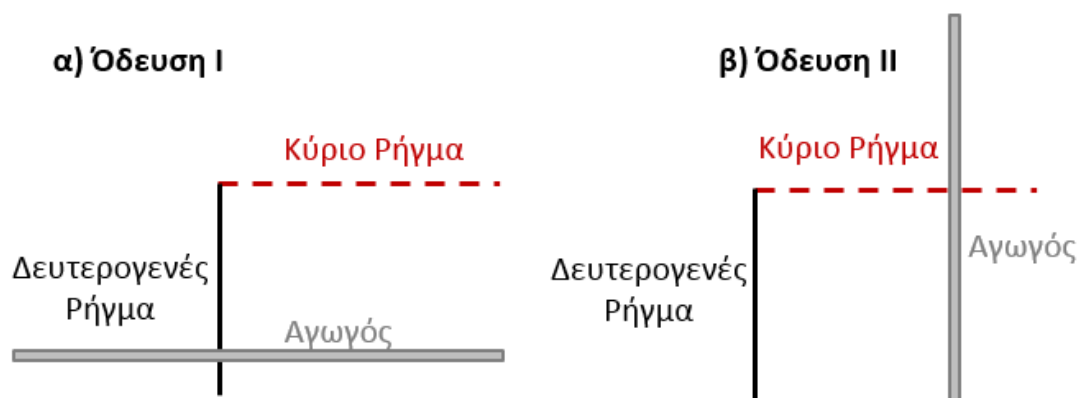
**Πίνακας 6.2:** Τιμές χαρακτηριστικών του εδάφους από το οποίο περνάει ο αγωγός.

Τύπος Εδάφους	Μέτρια Άμμος (medium sand , $c = 0$ )
Βάθος Επίχωσης	$H_b = 2m$
Γωνία κλίσης	$\alpha = 60^\circ$
Κανονικοποιημένη Μετατόπιση Βάσης	$h = 1m \quad \frac{h}{D} = 5\%$
Πάχος Εδαφικής Στρώσης	$H = 20m$
Συντελεστής πλευρικής ώθησης	$K_0 = 0,5$

Όπως φαίνεται στις Εικόνες 6.1 και 6.2 εξετάστηκαν τρία είδη κύριου ρήγματος και δύο διαφορετικές οδεύσεις του αγωγού. Έχει γίνει παραδοχή ότι τα δύο ρήγματα δημιουργούνται ταυτόχρονα και σχηματίζουν γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους. Στη μια οδεύση ο αγωγός διασταυρώνεται κάθετα με το κύριο ρήγμα ενώ στην άλλη, διασταυρώνεται πάλι κάθετα με το δευτερογενές ρήγμα στην προσπάθεια αποφυγής του κύριου. Ο αγωγός έχει μήκος 2 km και τέμνει κάθετα μόνο ένα από τα ρήγματα, ευρισκόμενος μακριά από τη συμβολή τους.



**Εικόνα 6.1:** Μετατοπίσεις κύριου και δευτερεύοντος ρήγματος, για την περίπτωση κανονικού ανάστροφου κύριου ρήγματος (πάνω) και κύριο ρήγμα λοξής μετατόπισης (κάτω): α. αριστερόστροφο πλαγιοκανονικό κύριο ρήγμα, β. δεξιόστροφο πλαγιοκανονικό κύριο ρήγμα, γ. αριστερόστροφο πλαγιοανάστροφο κύριο ρήγμα, δ. δεξιόστροφο πλαγιοανάστροφο κύριο ρήγμα.



**Εικόνα 6.2:** Οι δύο διαφορετικές επιλογές όδευσης του αγωγού

Οι αναλύσεις που έγιναν, έδωσαν αποτελέσματα για τη κάθετη μετατόπιση και τις παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού στις περιπτώσεις του κανονικού (normal) και του ανάστροφου (reverse) ρήγματος. Έπειτα, δημιουργήθηκαν διαγράμματα με σκοπό να γίνει η γραφική παρουσίαση. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμές με σκοπό τη σύγκριση των διαγραμμάτων αυτών με τα αντίστοιχα που προκύπτουν έπειτα από αλλαγή κάποιων χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν κάποιες ακόμη τιμές, για το πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού, για το συντελεστή απομείωσης τριβής, για το βάθος επίχωσης του αγωγού και τέλος για τον τύπου του χάλυβα. Σε κάθε μια διαδοχική δοκιμή, η τιμή της εξεταζόμενης παραμέτρου μεταβαλλόταν και λαμβάνονταν εκ νέου αποτελέσματα τα οποία οδηγούσαν στην κατασκευή γραφημάτων. Έπειτα τα γραφήματα αυτά, συγκρίνονταν με τα αντίστοιχα που προέκυπταν από τις προηγούμενες τιμές της παραμέτρου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι κάθε φορά άλλαζε η τιμή μόνο μιας παραμέτρου. Οι υπόλοιπες παρέμεναν σταθερές για να μελετηθεί αποκλειστικά η επιρροή της υπό εξέταση κάθε φορά παραμέτρου. Ακόμη να σημειωθεί, ότι οι τιμές για τα άλλα χαρακτηριστικά του αγωγού και του εδάφους που περιγράφονται στους πίνακες 6.1 και 6.2 πέρα από τις εξεταζόμενες παραμέτρους παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

**Πίνακας 6.3:** Τιμές παραμέτρων που εξετάζονται

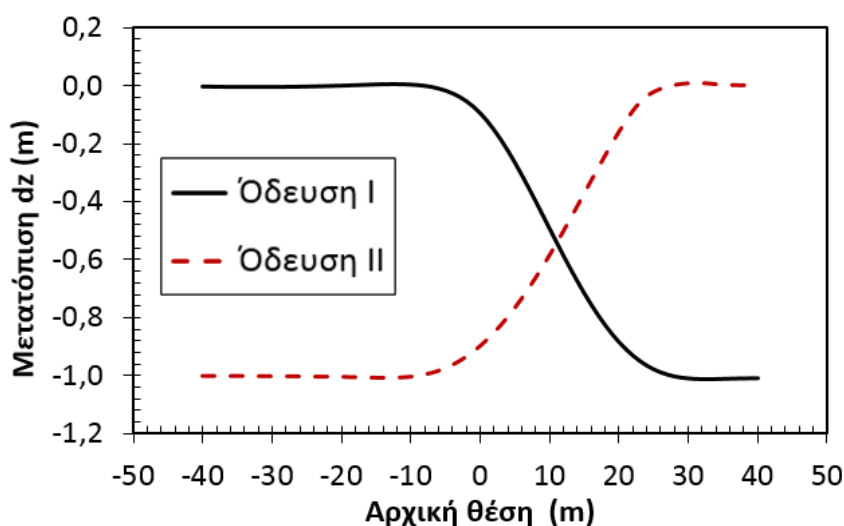
Πάχος Τοιχώματος $t$ (inches)	Συντελεστής Απομείωσης Τριβής $k$	Βάθος Επίχωσης $H_b$ (m)	Τύπος Χάλυβα
$t_1 = 1''$	$k_1 = 0.5$	$H_b = 1.5 \text{ m}$	X60 ( $\sigma_y = 456 \text{ MPa}$ )
$t_2 = 0.5''$	$k_2 = 0.7$	$H_b = 1.0 \text{ m}$	X70 ( $\sigma_y = 522 \text{ MPa}$ )
$t_3 = 1.25''$	$k_3 = 0.9$	-	-

Στον Πίνακα 6.3 εμφανίζονται συνολικά οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν. Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα με τη μορφή διαγραμμάτων και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους, η οποία οδηγεί σε κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Εκτός από τις μεμονωμένες περιπτώσεις του κανονικού και του ανάστροφου ρήγματος (Ενότητες 6.1 και 6.2) εξετάζεται και η πιο σύνθετη περίπτωση του λοξού ρήγματος (Ενότητα 6.3) .

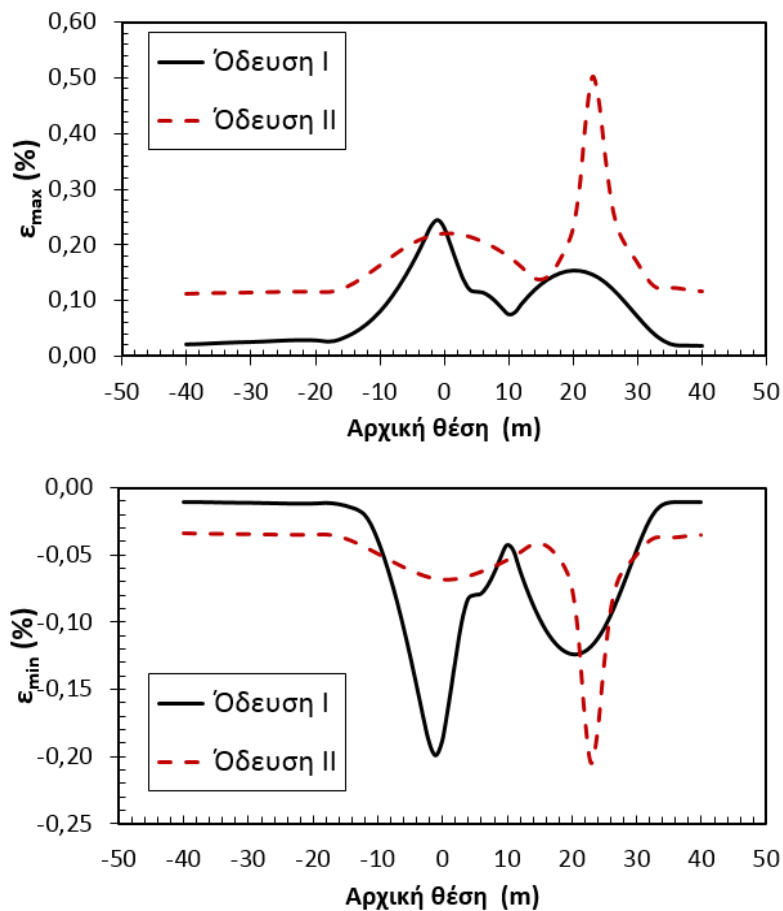
## 6.1 Κανονικό Κύριο Ρήγμα

Αρχικά πραγματοποιούνται αναλύσεις για την περίπτωση του Κανονικού Ρήγματος με χρήση των τιμών που βρίσκονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2. Έπειτα οι αναλύσεις αυτές επαναλαμβάνονται για κάθε αλλαγή στις τιμές των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμεύουν για την κατασκευή διαγραμμάτων. Στο σχήμα 6.1 εμφανίζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις στον άξονα  $z$  των σημείων του αγωγού πριν από την αλλαγή του πάχους  $t$ , του συντελεστή  $k$ , του βάθους  $H_b$  ή του τύπου του χάλυβα. Στη συνέχεια στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται κι οι αντίστοιχες παραμορφώσεις (μέγιστες κι ελάχιστες).

Να σημειωθεί ότι και στα δύο σχήματα υπάρχουν 2 καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τις δύο διαφορετικές οδεύσεις που εξετάζονται για τον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα η Όδευση I αφορά την διασταύρωση του αγωγού με το δευτερογενές ρήγμα ενώ η Όδευση II με το κύριο . Για την αποφυγή σύγχυσης οι δύο γραμμές έχουν διαφορετικά χρώματα κι επιπροσθέτως η καμπύλη για την όδευση μέσω του κύριου ρήγματος είναι διακεκομμένη. Όπως διαπιστώνεται, όσον αφορά τις παραμορφώσεις, η Όδευση II παρουσιάζει υψηλότερες τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων ενώ στη περίπτωση των ελαχίστων οι τιμές για τις δύο οδεύσεις δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές.



**Σχήμα 6.1:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για δύο διαφορετικές οδεύσεις.



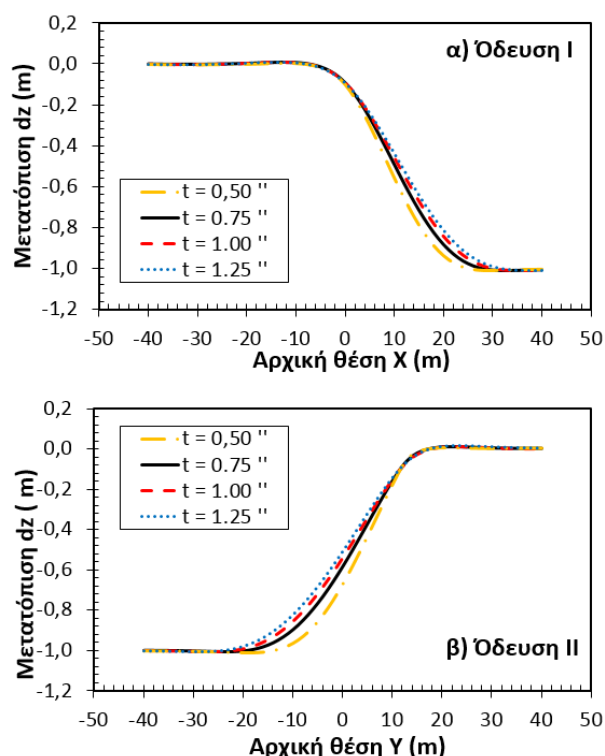
**Σχήμα 6.2:** Μέγιστες ( $\varepsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\varepsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για δύο διαφορετικές οδεύσεις.

### 6.1.1 Διατομή Αγωγού

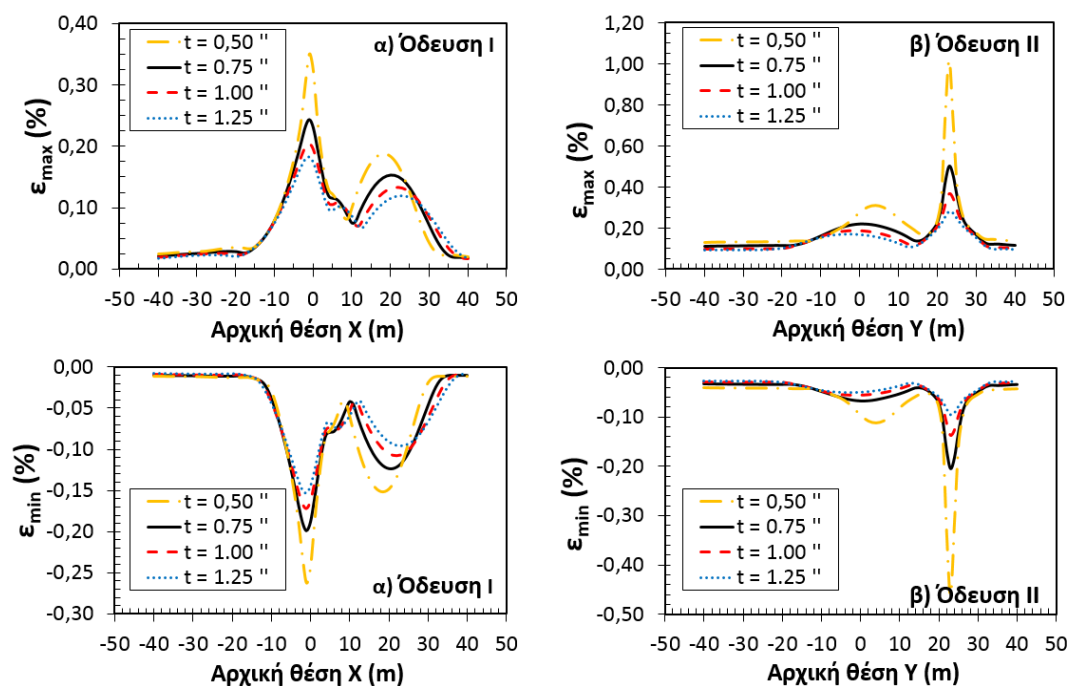
Όπως αναφέρθηκε οι δοκιμές πραγματοποιούνται για 3 διαφορετικές τιμές του πάχους του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την περίπτωση για την αρχική τιμή του πάχους ( $t = 0.75''$ ), γίνονται αναλύσεις για: i)  $t = 1''$ , ii)  $t = 0.5''$ , iii)  $t = 1.25''$ .

Όπως είναι αναμενόμενο, σταδιακή μείωση του πάχους, οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων (εφελκυστικές και θλιπτικές). Ακόμη, παρατηρείται ότι, η αλλαγή μεταξύ των δύο οδεύσεων έχει ως αποτέλεσμα αρκετά μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων. Στη περίπτωση των μέγιστων (εφελκυστικών), όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε ορισμένα σημεία οι τιμές των παραμορφώσεων είναι έως και 3 φορές μεγαλύτερες για την Οδευση II (διασταύρωση αγωγού με κύριο ρήγμα), ενώ και στην περίπτωση των ελάχιστων (θλιπτικών) είναι εμφανές ότι στο δεύτερο σχήμα οι τιμές των παραμορφώσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες.

Στο Σχήμα 6.3 εμφανίζεται η σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων του αγωγού μεταξύ των 4 διαφορετικών παχών για τις περιπτώσεις των δύο οδεύσεων. Στο Σχήμα 6.4 πραγματοποιείται σύγκριση και για τις παραμορφώσεις (μέγιστες και ελάχιστες).



**Σχήμα 6.3:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές του  $t$  και για δύο διαφορετικές οδεύσεις.



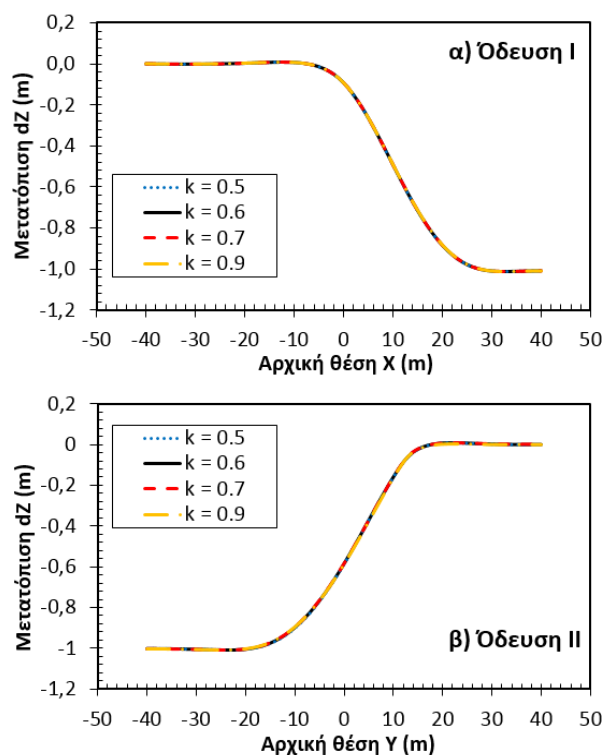
**Σχήμα 6.4:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $t$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, σταδιακή μείωση του πάχους οδηγεί σε μια αύξηση των κατακόρυφων μετακινήσεων των σημείων του αγωγού. Οι μετατοπίσεις έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες αποκλίσεις σε κάποια σημεία για την περίπτωση της Όδευσης II.

### 6.1.2 Επικάλυψη Αγωγού

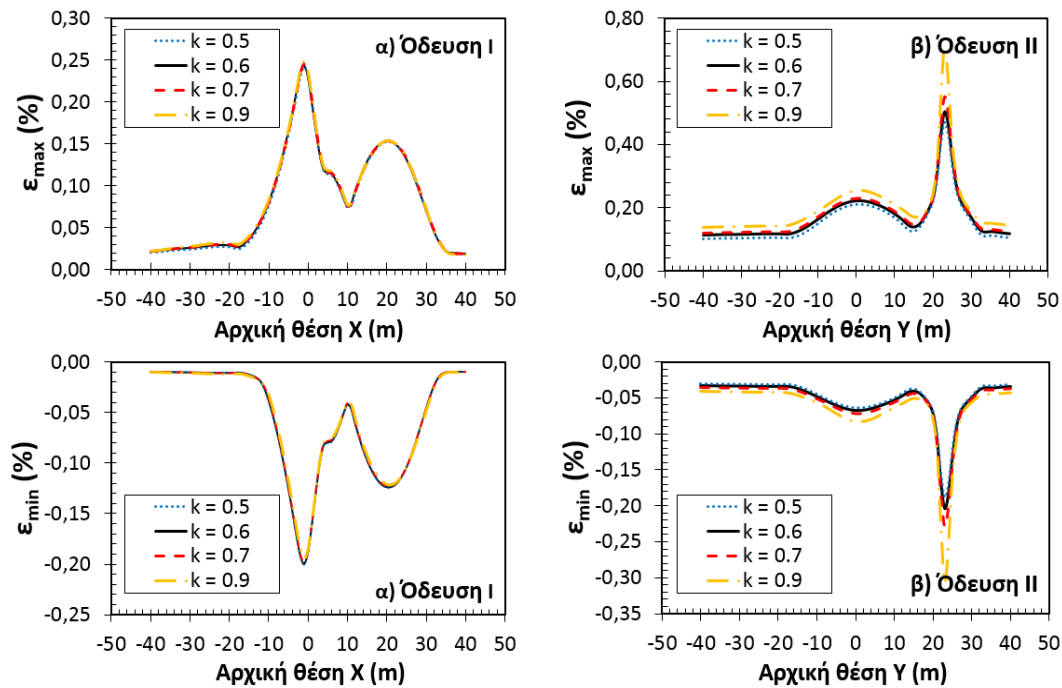
Σε αυτή τη παράγραφο εξετάζεται η επιρροή της αλλαγής του συντελεστή απομείωσης τριβής ( $k$ ). Το πάχος του αγωγού μένει σταθερό στην τιμή  $t = 0.75''$  ενώ και τα υπόλοιπα στοιχεία παίρνουν τις τιμές που αναφέρονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2. Οι πρώτες αναλύσεις έδωσαν αποτελέσματα, με το συντελεστή να λαμβάνει τη τιμή  $k=0.6$ . Στη συνέχεια πραγματοποιούνται περαιτέρω αναλύσεις για τις τιμές: i)  $k=0.5$ , ii)  $k=0.7$ , iii)  $k=0.9$  και τέλος συγκρίνονται μεταξύ τους.

Στο Σχήμα 6.5 εμφανίζονται οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων ενώ στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις.



**Σχήμα 6.5:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.





**Σχήμα 6.6:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

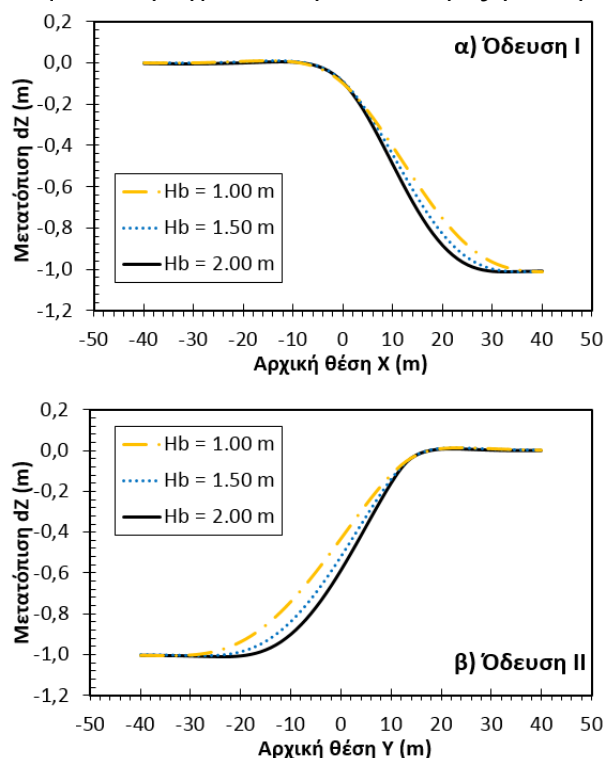
Σε αντίθεση με τις αλλαγές της ενότητας 6.1.1, σε αυτή τη περίπτωση οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές σε σημείο τέτοιο, ώστε να φαίνεται να υπάρχει μια σύμπτωση των καμπυλών. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο σχήμα 6.5, οι διαφορές παρατηρούνται κυρίως λόγω της επιλογής διαφορετικών χρωμάτων για κάθε καμπύλη.

Στην περίπτωση που ο αγωγός περνά από το δευτερογενές ρήγμα οι μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αποκλίσεις μετά από τις αλλαγές στις τιμές του συντελεστή  $k$ . Στην άλλη περίπτωση υπάρχουν κάποιες εμφανείς αποκλίσεις (μικρότερες βέβαια από εκείνες των αντίστοιχων διαγραμμάτων για τιμές  $t$ ). Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ των δύο οδεύσεων παρατηρείται ότι οι τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες στα αρχικά σημεία ενώ από το σημείο με αρχική θέση 10m κι έπειτα λαμβάνουν πολύ μεγαλύτερες τιμές. Από την άλλη μεριά, οι θλιπτικές παραμορφώσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλες διαφορές στις τιμές, με μοναδική εξαίρεση ίσως μερικά σημεία της καμπύλης για συντελεστή  $k=0.9$ .

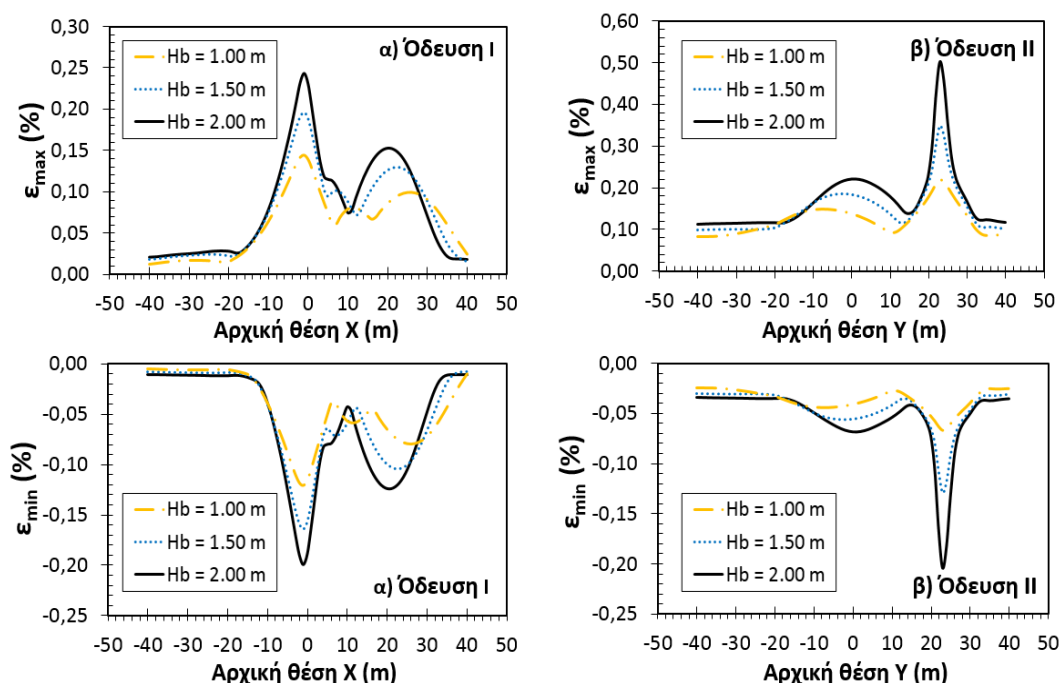
### 6.1.3 Βάθος Επίχωσης Αγωγού

Το βάθος που επιλέχθηκε για τις πρώτες αναλύσεις έχει την τιμή  $H_b=2m$ . Πραγματοποιούνται 2 ακόμη δοκιμές για μικρότερες τιμές βάθους : i)  $H_b=1.5m$  και ii)  $H_b=1m$ . Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία, τα αποτελέσματα των αναλύσεων χρησιμοποιούνται για την δημιουργία γραφημάτων, σχετικά με την κατακόρυφη μετακίνηση και τις παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού.

Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7 και 6.8 και συγκρίνονται μεταξύ τους. Δεδομένου ότι οπτικά οι διαφορές είναι ικανοποιητικές και ευδιάκριτες, δεν θεωρείται απαραίτητο να πραγματοποιηθούν δοκιμές για περισσότερα βάθη.



**Σχήμα 6.7:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές του  $H_b$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.



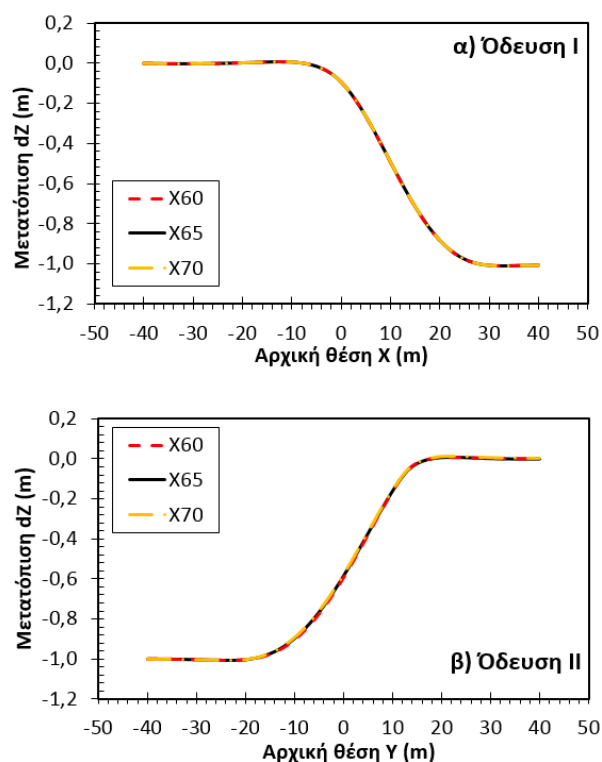
**Σχήμα 6.8:** Μέγιστες ( $\epsilon_{max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές  $H_b$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

Οι καμπύλες, και στις δύο περιπτώσεις, εμφανίζονται όπως ήταν αναμενόμενο. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στο τμήμα του αγωγού που περιέχει τα σημεία με αρχικές τιμές από +10m έως +30m για την Όδευση Ι και από -30m έως +10 m για την Όδευση ΙΙ αντίστοιχα. Τέλος, στη περίπτωση της διασταύρωσης με το κύριο ρήγμα, οι αποστάσεις μεταξύ των καμπυλών φαίνεται να είναι πιο έντονες.

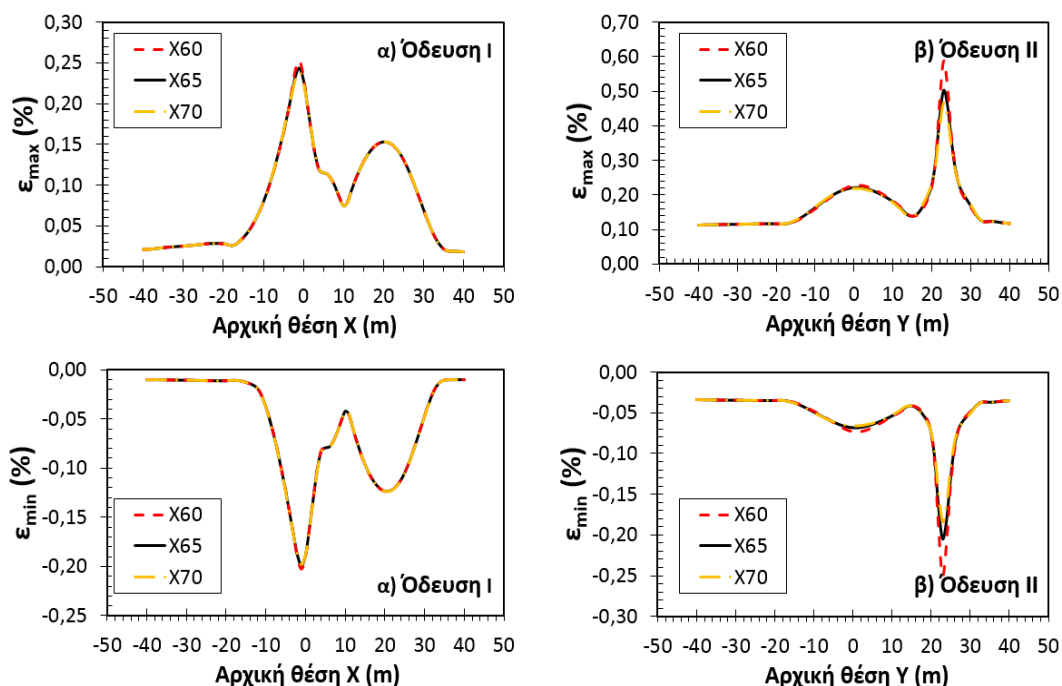
Όπως και στα διαγράμματα για τη μετατόπιση έτσι και σε αυτά των παραμορφώσεων παρατηρούνται εμφανείς αποκλίσεις μετά τη διαδοχική μείωση του βάθους επίχωσης Hb. Όσον αφορά τα δύο διαγράμματα εφελκυστικών παραμορφώσεων, διαπιστώνεται ότι στο σενάριο διασταύρωσης του αγωγού με το κύριο ρήγμα οι τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες. Τέλος, στα διαγράμματα για τις θλιπτικές παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι λαμβάνουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση της Όδευσης Ι.

#### 6.1.4 Τύπος Χάλυβα Αγωγού

Το υλικό κατασκευής του αγωγού είναι ο χάλυβας. Στις προηγούμενες αναλύσεις, επιλέχθηκε χάλυβας κατηγορίας X65 με τάση διαρροής  $\sigma_y=490$  MPa. Στην υποενότητα αυτή, πραγματοποιούνται αναλύσεις για δύο επιπλέον τύπους χάλυβα με διαφορετικές τάσεις διαρροής. Πιο συγκεκριμένα μελετώνται: i) χάλυβας X60 με τάση διαρροής  $\sigma_y=456$  MPa και ii) χάλυβας X70 με τάση διαρροής  $\sigma_y=522$  MPa. Στο σχήμα 6.9 και στο Σχήμα 6.10 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες (κατακόρυφης μετατόπισης και παραμορφώσεων των σημείων του αγωγού) για αυτές τις τελευταίες δοκιμές.



**Σχήμα 6.9:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις.



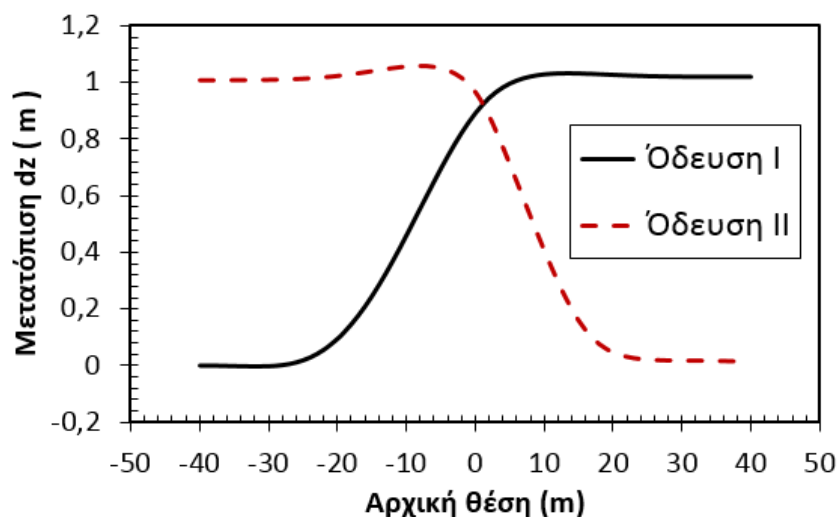
**Σχήμα 6.10:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$ %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

Όπως και στις αναλύσεις για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $k$ , οι αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών είναι υπερβολικά μικρές με αποτέλεσμα, σχηματικά, να διακρίνονται κυρίως λόγω του ότι επιλέχθηκαν διαφορετικά χρώματα για κάθε γραμμή. Το γεγονός ότι οι τάσεις διαρροής στους επιλεγμένους τύπους χάλυβα δεν έχουν τόσο μεγάλες διαφορές σίγουρα ευθύνεται σημαντικά. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και στα γραφήματα για τις παραμορφώσεις. Βέβαια διαπιστώνεται και σχηματικά, ότι στην περίπτωση διασταύρωσης με το κύριο ρήγμα τα σημεία του αγωγού παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές μέγιστων παραμορφώσεων και ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ελάχιστων.

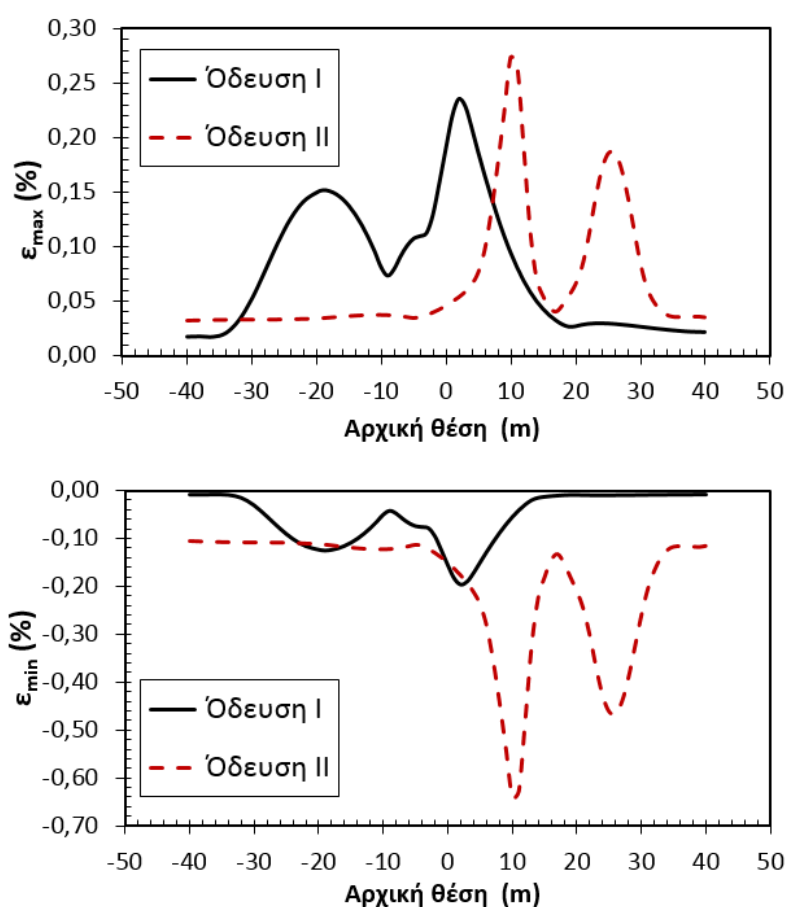
## 6.2 Ανάστροφο Κύριο Ρήγμα

Αφού ολοκληρώθηκε η έρευνα για την επιρροή των αλλαγών, ορισμένων παραμέτρων σχετικά με τις μετακινήσεις στον κατακόρυφο άξονα και τις παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού για την περίπτωση του Κανονικού κύριου ρήγματος, πραγματοποιούνται αναλύσεις και για την περίπτωση του Ανάστροφου κύριου ρήγματος. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια, διατηρώντας σταθερές τις τιμές που βρίσκονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2 και επιλέγοντας : i)  $t=0.75''$ , ii)  $k=0.6$ , iii)  $H_b=2m$  και iv) χάλυβα ποιότητας X65 ( $\sigma_y=456MPa$ ), με χρήση του προγράμματος Abaqus (Simulia, 2014) πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστούν διαγράμματα στα οποία όπως και πριν φαίνονται οι τιμές των μετακινήσεων (κατακόρυφων) και παραμορφώσεων (εφελκυστικών και θλιπτικών) για ορισμένα σημεία του αγωγού. Στη συνέχεια, όπως ακριβώς και στο Κανονικό κύριο ρήγμα, οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν, με σκοπό να παρουσιαστούν γραφήματα που να εμφανίζουν την επιρροή των συγκεκριμένων αλλαγών.

Στα σχήματα 6.11 και 6.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα από τις αναλύσεις πριν τις διαδοχικές αλλαγές των παραμέτρων (πάχος  $t$ , συντελεστής  $k$ , βάθος  $H_b$  και τύπος χάλυβα). Στα γραφήματα αυτά, εμφανίζονται ταυτόχρονα οι καμπύλες για τις περιπτώσεις και των δύο Οδεύσεων (διασταύρωση με δευτερογενές (I), με κύριο (II)) και προς αποφυγή σύγχυσης οπτικά, οι καμπύλες έχουν διαφορετικό χρώμα.



**Σχήμα 6.11:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για δύο διαφορετικές οδεύσεις.

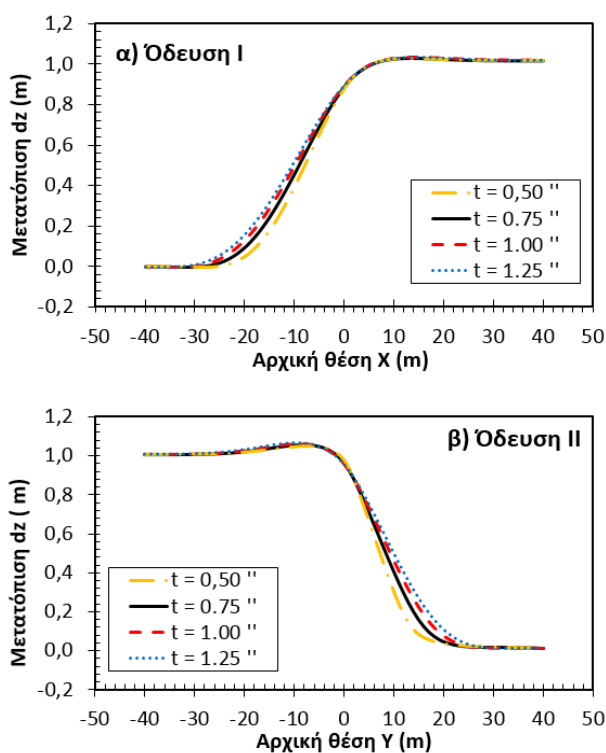


**Σχήμα 6.12:** Μέγιστες ( $\epsilon_{max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για δύο διαφορετικές οδεύσεις.

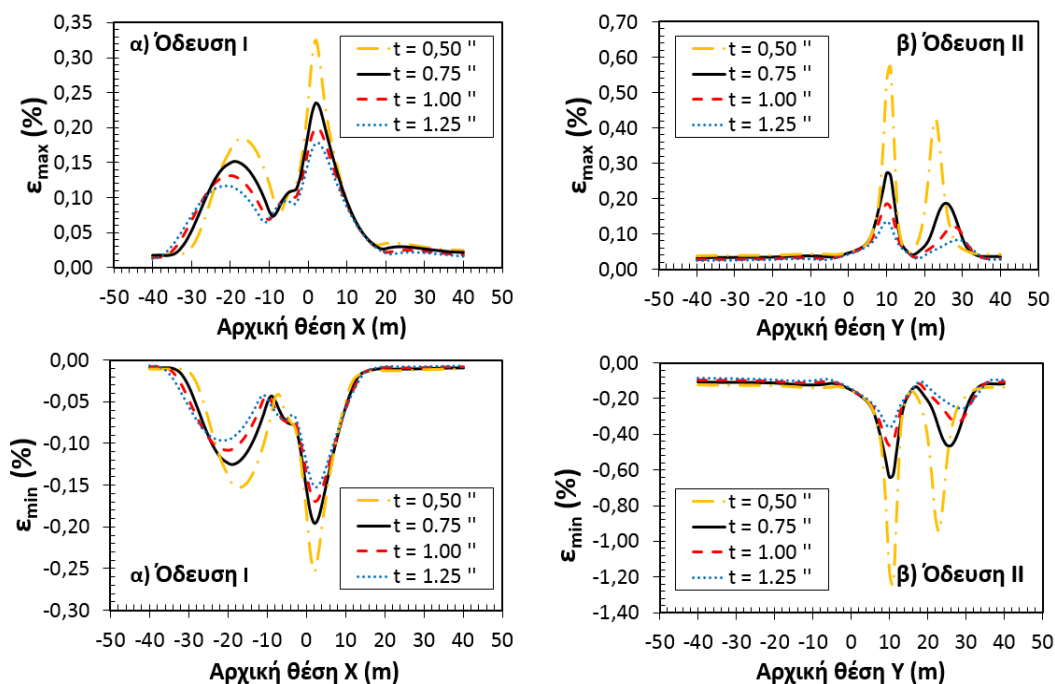
### 6.2.1 Διατομή Αγωγού

Όσον αφορά τη διατομή του αγωγού, πραγματοποιούνται οι ίδιες δοκιμές, όπως και για την περίπτωση του Κανονικού ρήγματος, για διαφορετικά πάχη i)  $t=1''$ , ii)  $t=0.5''$  και iii)  $t=1.25''$ .

Στο Σχήμα 6.13 που ακολουθεί εμφανίζονται τα δύο διαγράμματα των μετακινήσεων στον άξονα  $z$ , για την περίπτωση διασταύρωσης αγωγού με δευτερογενές και κύριο ρήγμα αντιστοίχως. Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζονται και οι τιμές των παραμορφώσεων, για τις δύο περιπτώσεις διαφορετικής Όδευσης. Σε αντίθεση με το Κανονικό κύριο ρήγμα, όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές των μετακινήσεων ( $dz$ ) σε όλα τα αντίστοιχα διαγράμματα είναι θετικές (για Κανονικό ρήγμα λάμβαναν αρνητική τιμή).



**Σχήμα 6.13:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές του  $t$  και για δύο διαφορετικές οδεύσεις



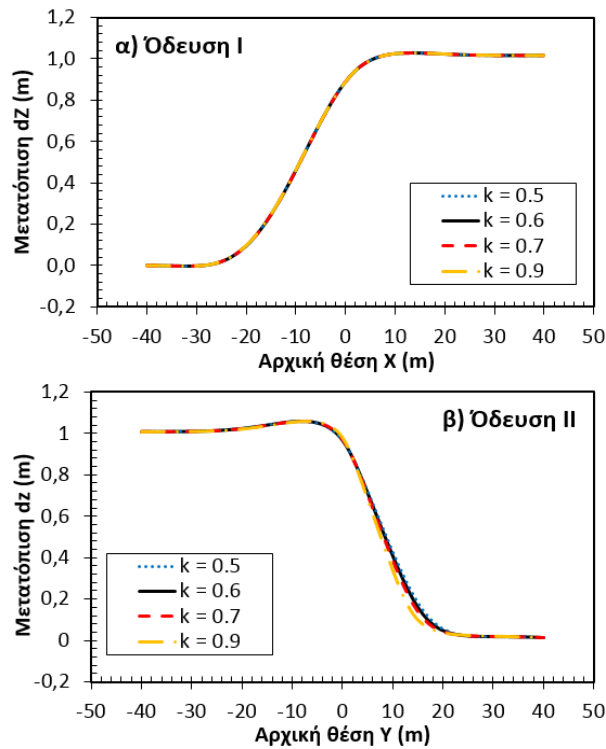
**Σχήμα 6.14:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $t$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

Στα διαγράμματα των παραμορφώσεων του σχήματος παρατηρείται ότι οι διαδοχικές αλλαγές στο πάχος, οδηγούν σε μεγάλες αλλαγές των τιμών παραμόρφωσης. Ακόμα, συγκρίνοντας τις διαφορετικές Οδεύσεις βγαίνει το συμπέρασμα ότι και στην περίπτωση των εφελκυστικών και σε αυτή των θλιπτικών παραμορφώσεων, συναντάμε πολύ υψηλότερες τιμές σε ορισμένα σημεία. Οι τιμές στην περίπτωση της διασταύρωσης με το κύριο ρήγμα, σε αρκετά σημεία είναι σχεδόν 2 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για διασταύρωση με το δευτερογενές ρήγμα όσον αφορά τις μέγιστες και από 3 έως και 5 φορές μεγαλύτερες όσον αφορά τις ελάχιστες.

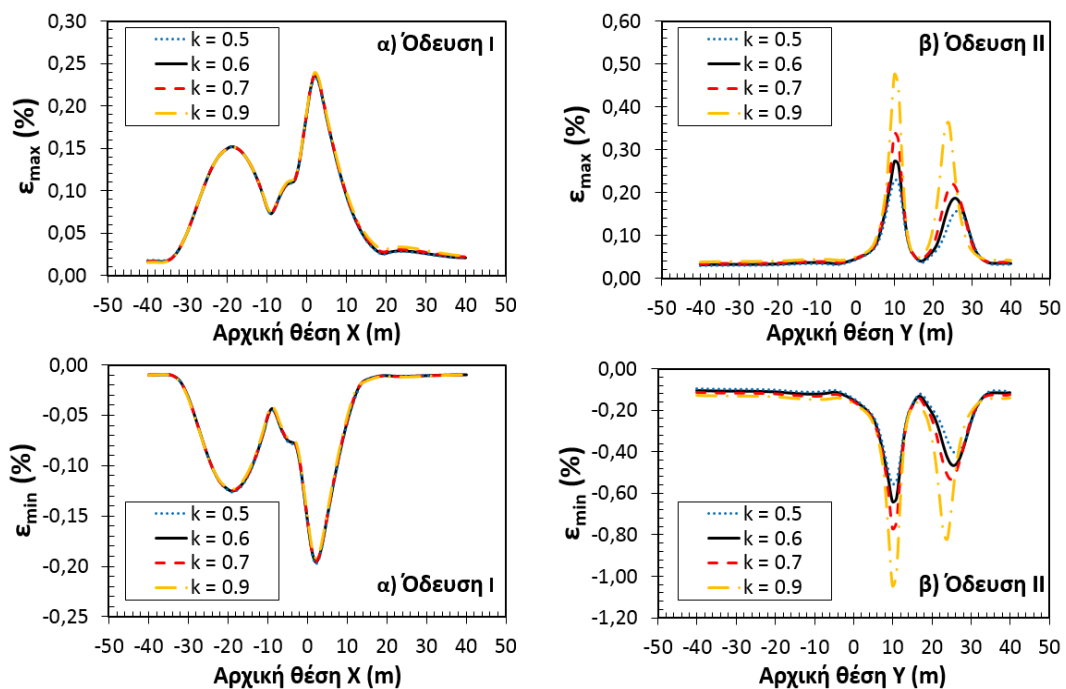
Η καμπύλη που αντιστοιχεί το πάχος  $t=1.25''$  παρουσιάζει όπως ήταν λογικό την καλύτερη συμπεριφορά μιας και λαμβάνει τις μικρότερες τιμές παραμόρφωσης σε σχέση με τις άλλες καμπύλες και συγχρόνως στη σύγκριση κύριου και δευτερεύοντος οι τιμές δεν έχουν τόσο διαφορά όσο έχουν οι υπόλοιπες.

## 6.2.2 Επικάλυψη Αγωγού

Όπως και στα γραφήματα της ενότητας 6.1.2 οι διαδοχικές αλλαγές της τιμής του  $k$  δεν οδηγούν σε σημαντικές αποκλίσεις των γραμμών. Οι διαφορές είναι μικρές και οι καμπύλες φαίνεται να «πέφτουν» η μια πάνω στην άλλη. Βέβαια να σημειωθεί, πως στην περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με το κύριο ρήγμα εμφανίζονται κάποιες μεγαλύτερες αποκλίσεις σε ορισμένα σημεία (π.χ. στα σημεία με αρχικές τιμές από +5m έως +20m). Οι αποκλίσεις αυτές είναι μεν μικρές, αλλά είναι εμφανείς.



**Σχήμα 6.15:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.



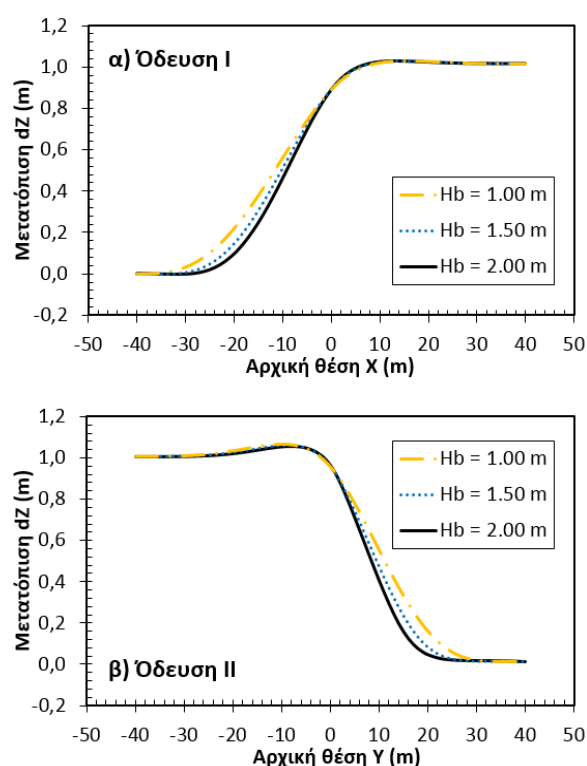
**Σχήμα 6.16:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.



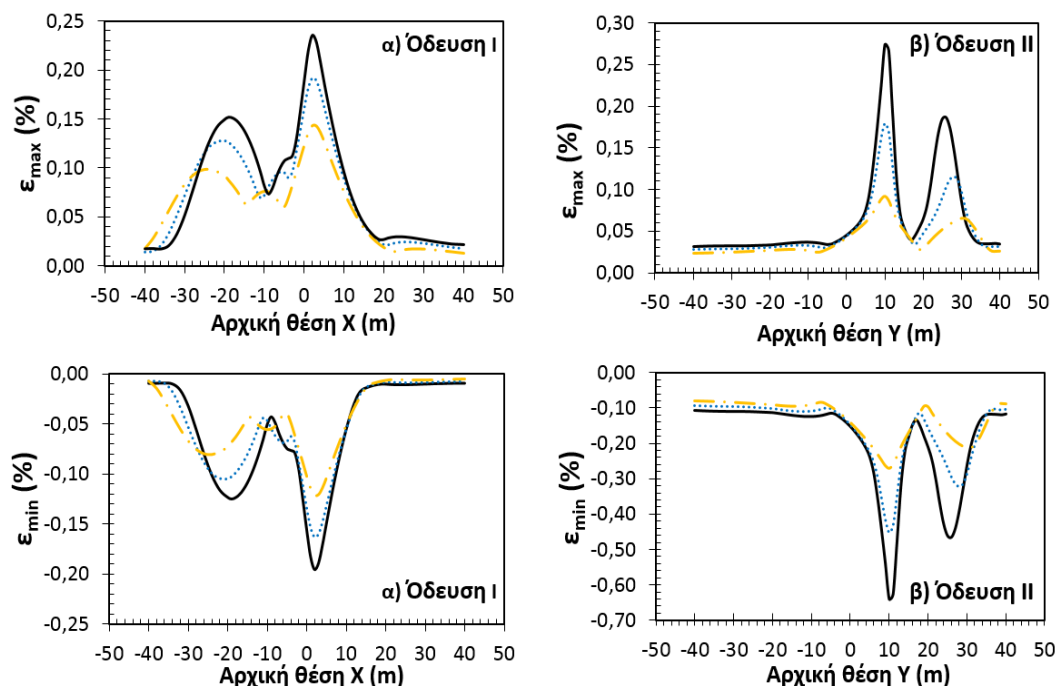
Στις καμπύλες που σχετίζονται με τις παραμορφώσεις, διαπιστώνεται ότι στο ενδεχόμενο διασταύρωσης του αγωγού με το δευτερογενές ρήγμα τόσο οι μέγιστες όσο και οι ελάχιστες παραμορφώσεις δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές για τις διαδοχικές τιμές του  $k$ . Στο ενδεχόμενο της διασταύρωσης με το κύριο ρήγμα οι παραμορφώσεις αυτές είναι αρχικά ελαφρώς μικρότερες από τις αντίστοιχες για την Όδευση Ι και εν συνεχεία παρατηρούνται ορισμένες αποκλίσεις που σε κάποια σημεία (π.χ. κοντά στο σημείο με αρχική θέση +10m ή τα σημεία με αρχικές θέσεις από +20m έως +30m) είναι αρκετά μεγάλες.

### 6.2.3 Βάθος Επίχωσης Αγωγού

Στη συνέχεια ελέγχεται και η επιρροή του βάθους επίχωσης  $H_b$ . Η καμπύλη που εκπροσωπεί την τιμή  $H_b=2m$ , συγκρίνεται με τις καμπύλες που προέκυψαν ύστερα από αναλύσεις για : i)  $H_b=1.5m$  και ii )  $H_b=1m$ . Στα Σχήματα 6.17 και 6.18 που ακολουθούν παρουσιάζεται η εν λόγω σύγκριση σχετικά με κατακόρυφη μετακίνηση και παραμορφώσεις.



**Σχήμα 6.17:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών , για 3 διαφορετικές τιμές του  $H_b$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.



**Σχήμα 6.18:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές  $H_b$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στα σχήματα, οι καμπύλες για τη κατακόρυφη μετακίνηση δεν παρουσιάζουν κάτι μη αναμενόμενο. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και στα γραφήματα των παραμορφώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των εφελκυστικών δεν φαίνεται να υπάρχουν μεγάλες διαφορές των τιμών ανάμεσα στις δύο διαφορετικές Οδεύσεις, εν αντιθέσει με την περίπτωση των θλιπτικών που οι διαφορές αυτές είναι αρκετά μεγαλύτερες.

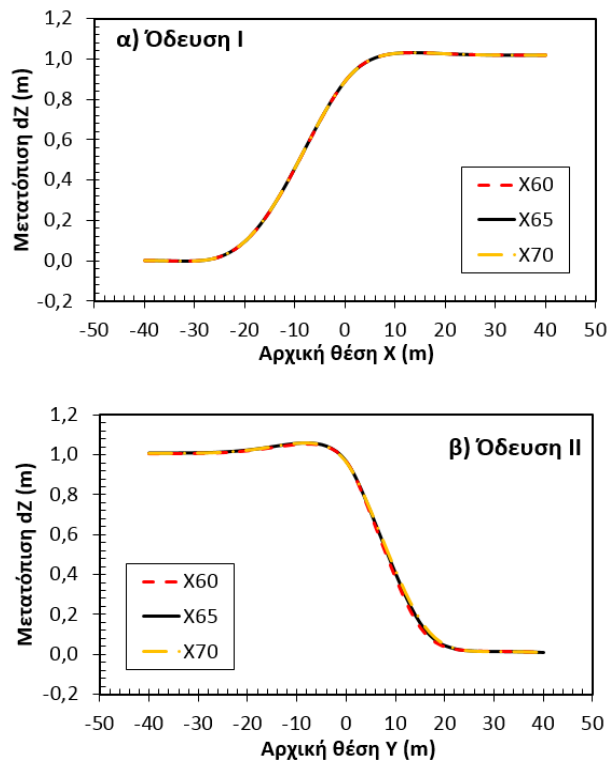
#### 6.2.4 Τύπος Χάλυβα Αγωγού

Τέλος, για να ολοκληρωθεί η έρευνα και για την περίπτωση του Ανάστροφου κύριου ρήγματος, δοκιμάστηκαν κάποιοι επιπλέον τύποι χάλυβα.

Πιο συγκεκριμένα :

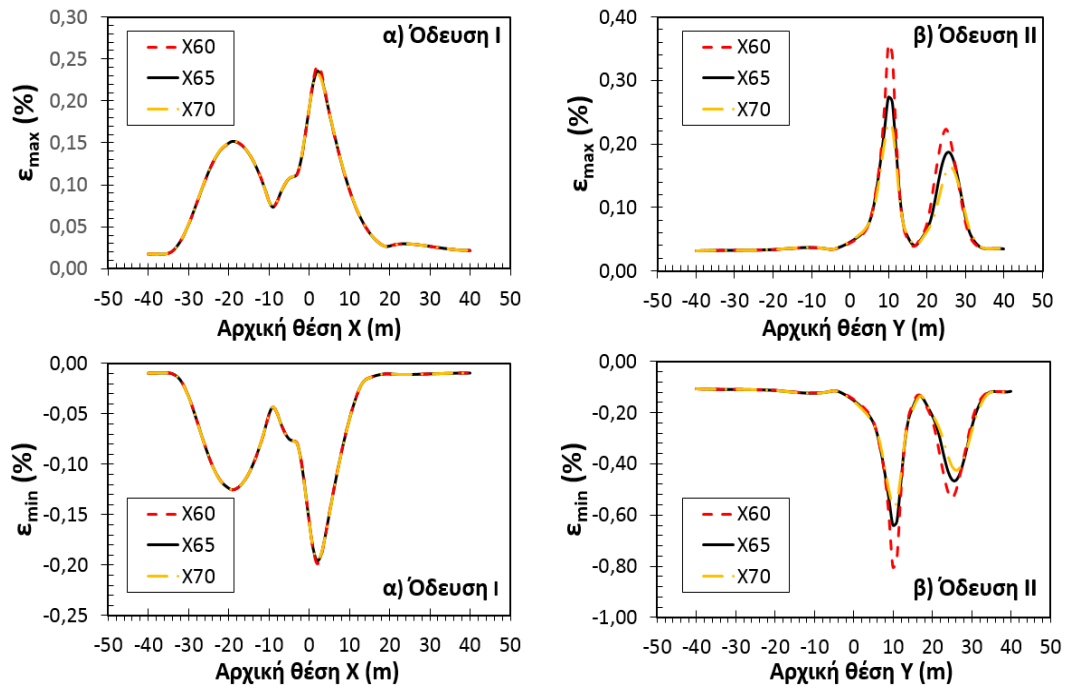
- i ) χάλυβας ποιότητας X60 με τάση διαρροής  $\sigma_y=456$  MPa και
- ii ) χάλυβας ποιότητας X70 με τάση διαρροής  $\sigma_y=522$  MPa.

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.19 και στο Σχήμα 6.20 και συγκρίνονται μεταξύ τους, αλλά και με εκείνα που προέκυψαν από χάλυβα ποιότητας X65 με τάση διαρροής  $\sigma_y=490$  MPa.



**Σχήμα 6.19:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

Σχετικά με τα διαγράμματα που εμφανίζονται στο σχήμα, διαπιστώνεται το ίδιο που είχε διαπιστωθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα μετατόπισης του χάλυβα για κανονικό κύριο ρήγμα. Παρατηρείται μια σύμπτωση των καμπυλών με μια πολύ μικρή εξαίρεση στο διάγραμμα για την Όδευση II όπου φαίνεται μια ελάχιστη απόκλιση. Στη περίπτωση των παραμορφώσεων ισχύει περίπου το ίδιο. Όπως και στα αντίστοιχα διαγράμματα της ενότητας 6.1.4 στην περίπτωση διασταύρωσης αγωγού – δευτερογενούς ρήγματος, μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αποκλίσεις για αλλαγές του τύπου του χαλύβδινου αγωγού. Στη περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με το κύριο ρήγμα παρατηρούνται ορισμένες αποκλίσεις οι οποίες όμως εμφανίζονται σε συγκεκριμένα σημεία. Τέλος σχετικά με τις διαφορές των τιμών των παραμορφώσεων μεταξύ της Όδευσης I και της Όδευσης II ισχύει, ότι στην περίπτωση διασταύρωσης με κύριο ρήγμα οι τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων είναι λίγο μεγαλύτερες ενώ οι αντίστοιχες των θλιπτικών παρατηρείται ότι είναι αρκετά μεγαλύτερες (σε κάποια σημεία έως και 4 φορές).



**Σχήμα 6.20:** Μέγιστες ( $\epsilon_{max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{min}$ %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

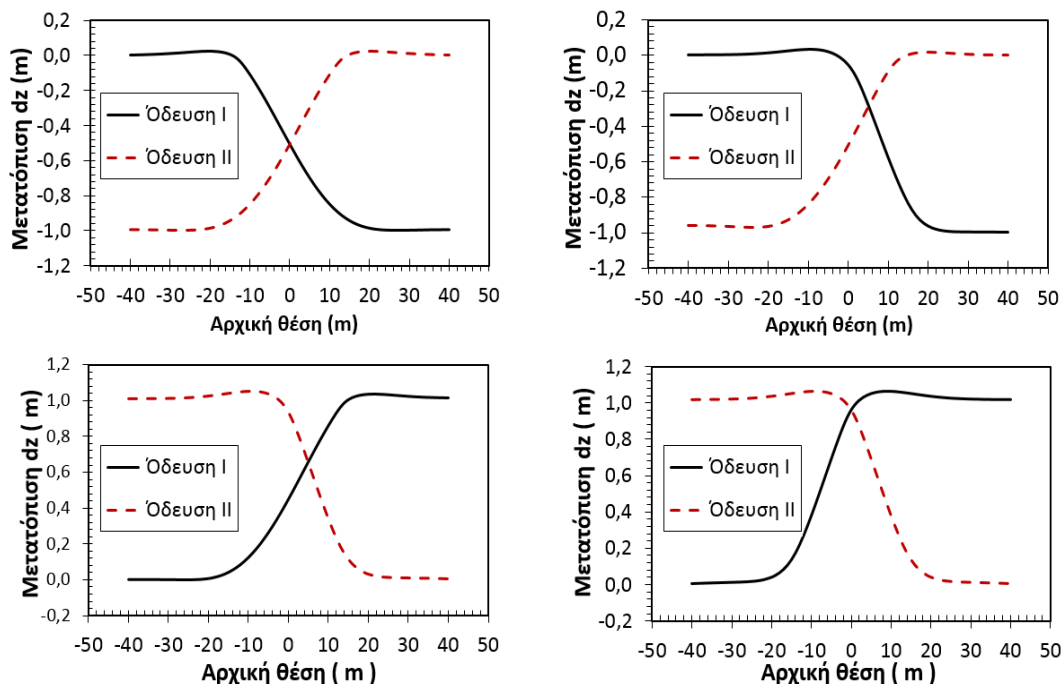
### 6.3 Ρήγμα Λοξής Μετατόπισης

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκαν με τη μορφή γραφημάτων, οι τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων και των παραμορφώσεων, ορισμένων σημείων του αγωγού, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις Οδεύσεων, ύστερα από διαδοχικές αλλαγές των τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων για την περίπτωση του Κανονικού κύριου και του Ανάστροφου κύριου ρήγματος. Σε αυτή την ενότητα, εξετάζεται μια πιο σύνθετη περίπτωση, του ρήγματος λοξής μετατόπισης.

Όπως και στις περιπτώσεις που περιγράφονται στις ενότητες 6.1 και 6.2, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στο λογισμικό Abaqus (Simulia 2014), για τις διαφορετικές περιπτώσεις των ρηγμάτων. Στη συνέχεια στα Σχήματα 6.21, 6.22 και 6.23 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν από τα αποτελέσματα των αναλύσεων (για κατακόρυφη μετακίνηση  $dz$  και παραμορφώσεις) για κάθε περίπτωση ρηγμάτων :

1. Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα
2. Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα
3. Αριστερόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα
4. Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα

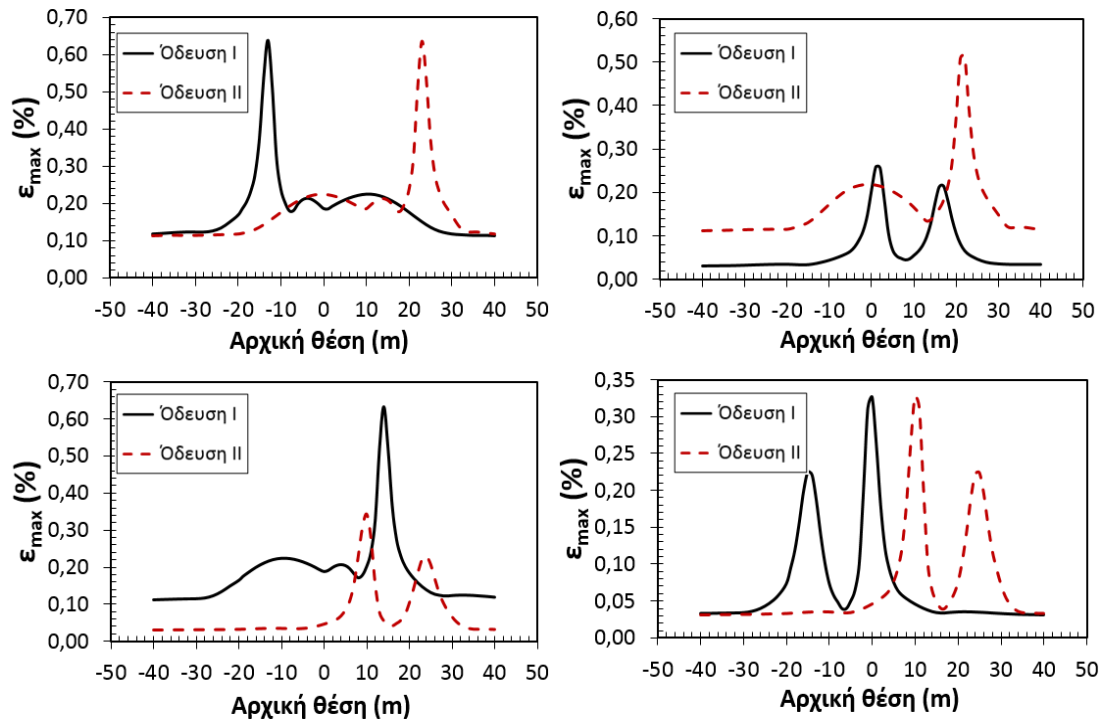
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αφορούν τις τιμές που περιγράφονται στους Πίνακες 6.1 και 6.2, πριν δηλαδή τις διαδοχικές μεταβολές των παραμέτρων. Ακόμη να σημειωθεί πως στα ακόλουθα διαγράμματα επιλέχθηκε να τοποθετηθούν οι καμπύλες και για τα δύο διαφορετικά ενδεχόμενα διασταύρωσης του αγωγού (Οδευση I διασταύρωση αγωγού με δευτερογενές ρήγμα, Οδευση II με κύριο).



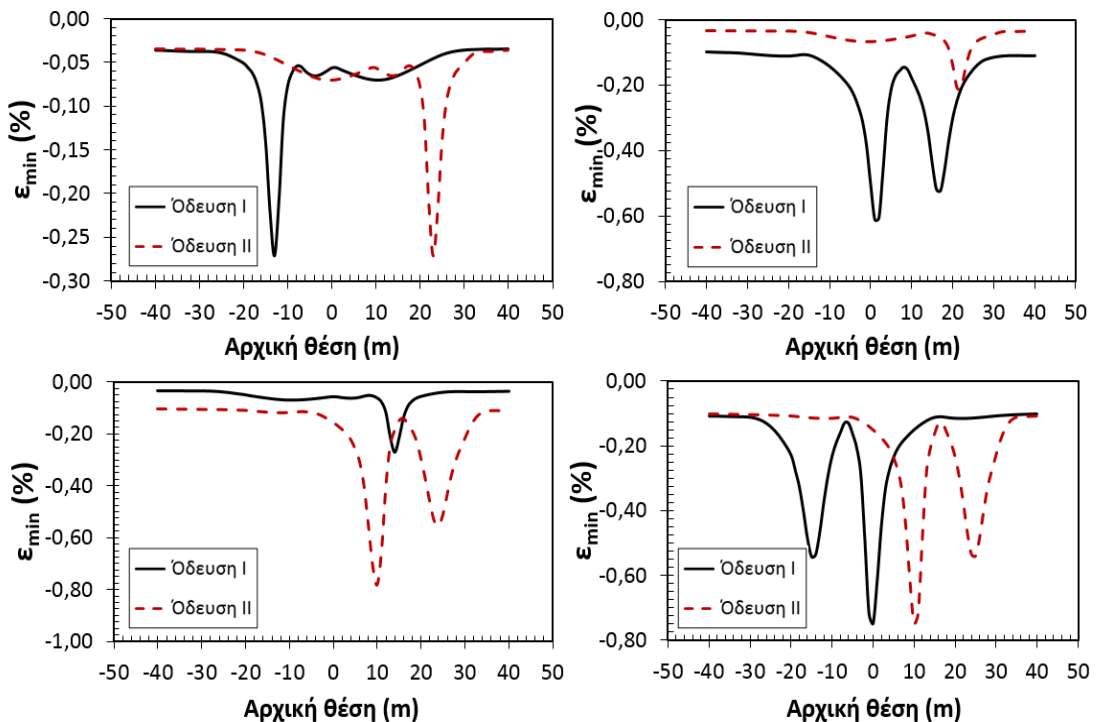
**Σχήμα 6.21:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) σημείων του αγωγού ως προς αρχική θέση του σημείου για δύο διαφορετικές οδεύσεις και τους 4 διαφορετικούς τύπους ρήγματος

Στα Σχήματα 6.22 και 6.23 που ακολουθούν παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα των παραμορφώσεων για τους 4 τύπους ρήγματος. Όπως συνέβη και στα διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό χρώμα και μορφοποίηση στις καμπύλες για τις 2 Οδεύσεις.

Διαπιστώνεται από τα σχήματα ότι στις περιπτώσεις του Αριστερόστροφου Πλαγιοκανονικού και του Δεξιόστροφου Πλαγιοανάστροφου ρήγματος οι γραμμές των μέγιστων και των ελάχιστων παραμορφώσεων για τις δύο Οδεύσεις είναι κατοπτρικές. Στην περίπτωση του Δεξιόστροφου Πλαγιοκανονικού ρήγματος παρατηρείται ότι οι τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων για την Οδευση I είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για την διασταύρωση αγωγού με δευτερογενές ρήγμα, ενώ για τις τιμές των ελάχιστων παραμορφώσεων ισχύει το αντίθετο. Τέλος, στην περίπτωση του Αριστερόστροφου Πλαγιοανάστροφου, κυριαρχεί το ακριβώς αντίστροφο.



**Σχήμα 6.22:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) σημείων του αγωγού ως προς αρχική θέση του σημείου για δύο διαφορετικές οδεύσεις και τους 4 διαφορετικούς τύπους ρήγματος



**Σχήμα 6.23 :** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) σημείων του αγωγού ως προς αρχική θέση του σημείου για δύο διαφορετικές οδεύσεις και τους 4 διαφορετικούς τύπους ρήγματος

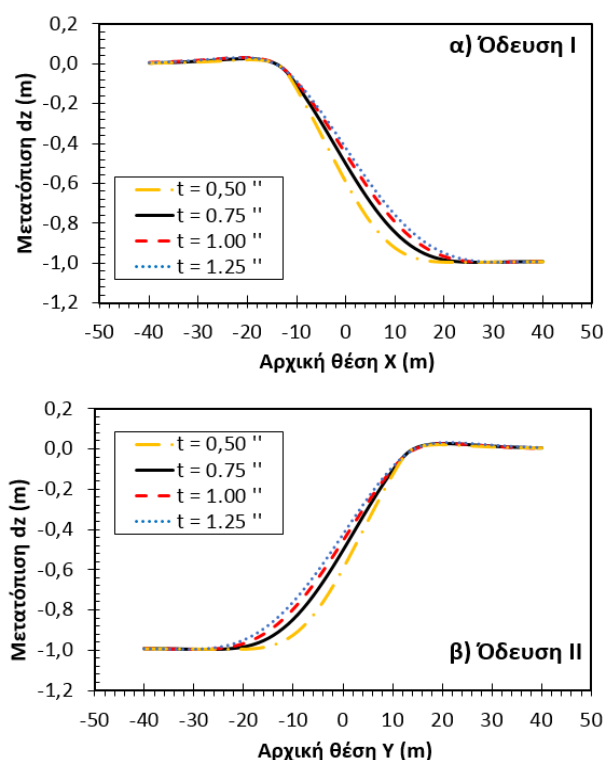
Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία, με διαδοχικές αλλαγές των τιμών του πάχους τοιχώματος ( $t$ ), του συντελεστή απομείωσης τριβής ( $k$ ), του βάθους επίχωσης ( $H_b$ ) και του τύπου του χάλυβα (κι ως συνέπεια της τάση διαρροής  $\sigma_y$ ). Η κάθε ανάλυση οδηγεί σε εξαγωγή αποτελεσμάτων, βάση των οποίων, κατασκευάζονται διαγράμματα κατακόρυφων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων ως προς την αρχική θέση του εκάστοτε σημείου (αρχική θέση στον άξονα  $X$  για την περίπτωση της Όδευσης I και αρχική θέση  $Y$  για την περίπτωση της Όδευσης II). Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στις αντίστοιχες υποενότητες και συγκρίνονται μεταξύ τους.

### 6.3.1 Διατομή Αγωγού

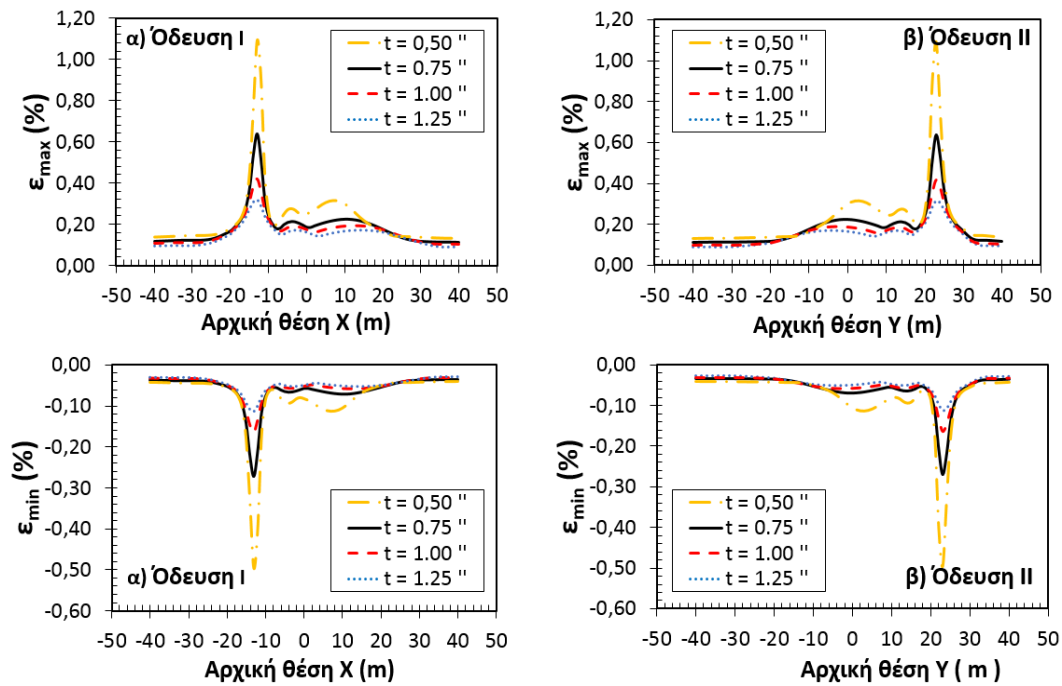
Όσον αφορά τη διατομή του αγωγού, και πιο συγκεκριμένα το πάχος  $t$ , πραγματοποιούνται δοκιμές για 3 επιπλέον τιμές : i)  $t=1''$ , ii)  $t=0.5''$  και iii)  $t=1.25''$  για κάθε μια περίπτωση ρήγματος. Έπειτα οι καμπύλες που κατασκευάστηκαν από τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης συγκρίνονται ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή της αλλαγής του πάχους  $t$  σχετικά με τις μετακινήσεις  $dz$  και τις μέγιστες κι ελάχιστες παραμορφώσεις.

- Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό κύριο Ρήγμα

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.24 η διαδοχική αλλαγή του  $t$  οδηγεί σε αρκετά μεγάλες αποκλίσεις στα διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων. Όμοια εικόνα παρατηρείται και στο Σχήμα 6.25 για τα διαγράμματα των παραμορφώσεων. Η σειρά με την οποία εμφανίζονται οι καμπύλες είναι η αναμενόμενη καθώς όσο μειώνεται το πάχος παρατηρούνται μεγαλύτερες μετακινήσεις και παραμορφώσεις.

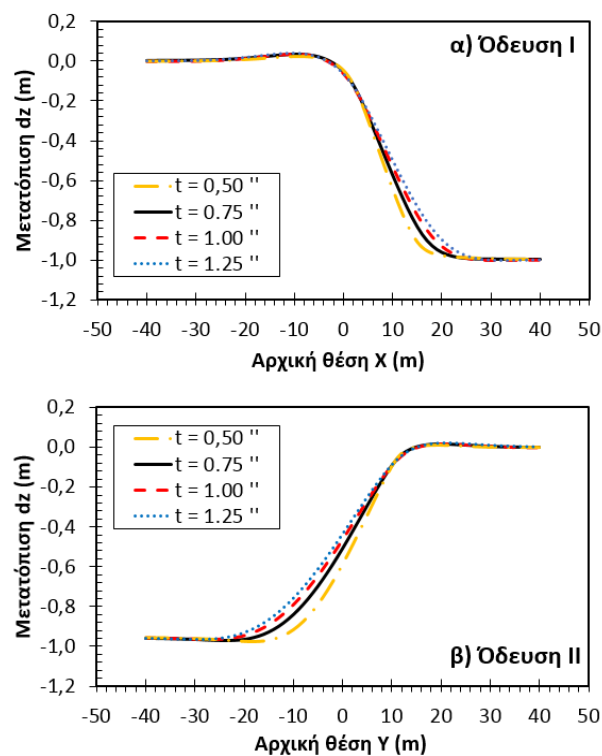


**Σχήμα 6.24:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές του  $t$  και για δύο διαφορετικές οδεύσεις



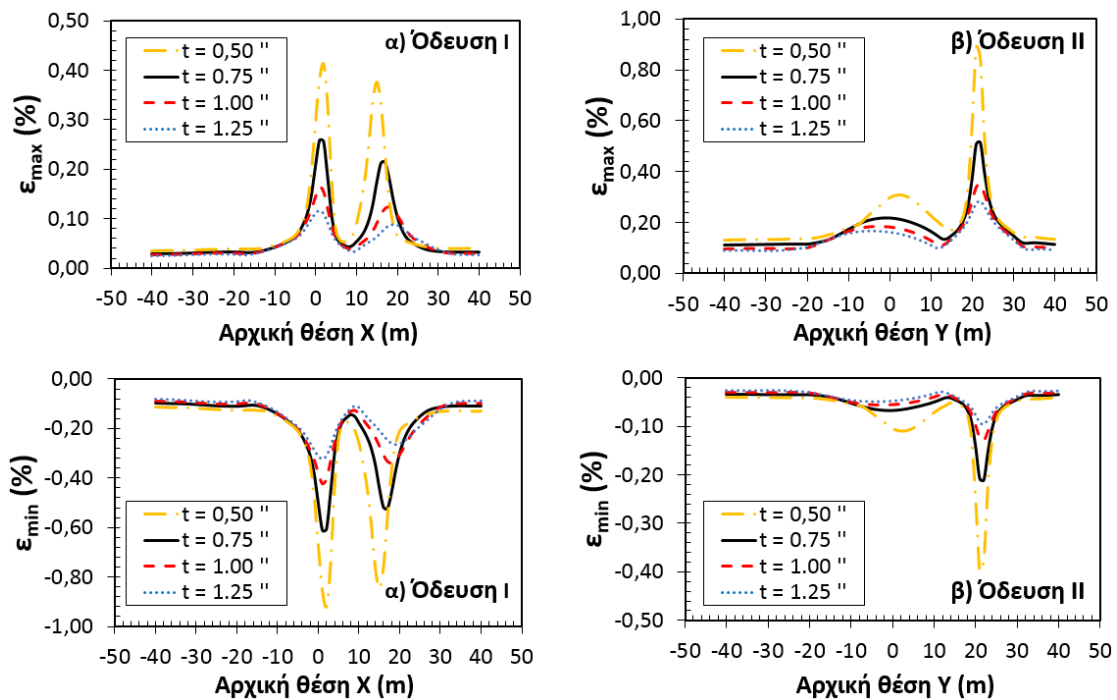
**Σχήμα 6.25:** Μέγιστες ( $\varepsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\varepsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $t$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

- Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα



**Σχήμα 6.26:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές του  $t$  και για δύο διαφορετικές οδεύσεις





**Σχήμα 6.27:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $t$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

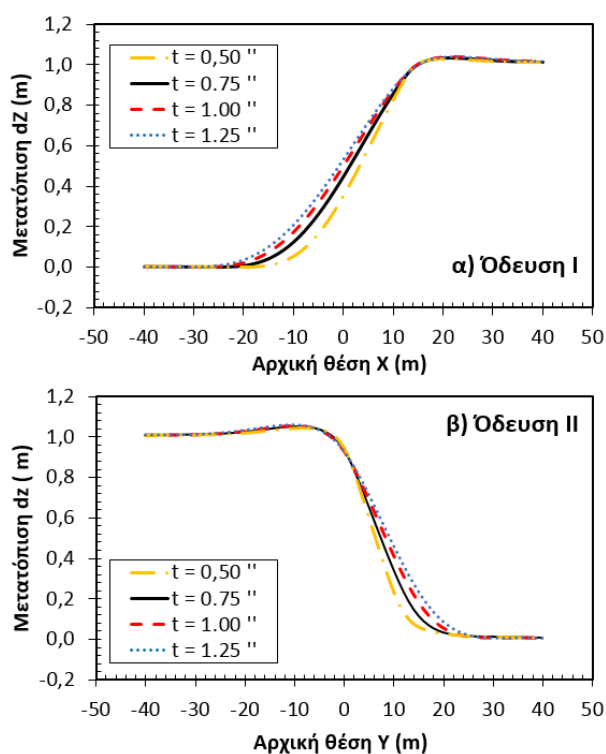
Οι κατακόρυφες μετακινήσεις των σημείων στον άξονα Z, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζουν ικανοποιητικές αποκλίσεις μετά τις αλλαγές στην τιμή του  $t$ . Στην περίπτωση της διασταύρωσης με το δευτερογενές ρήγμα οι αποκλίσεις αυτές είναι ελαφρώς μικρότερες από τις αντίστοιχες για την Όδευση II. Στα διαγράμματα των παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.27 οι διαφορές των καμπυλών είναι εντονότερες σε συγκεκριμένα σημεία, αλλά παραμένουν εμφανείς σε όλο το διάγραμμα.

Διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση της διασταύρωσης του αγωγού με το κύριο ρήγμα, οι τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων κοντά στο σημείο με αρχική θέση 0m φαίνεται να είναι λίγο χαμηλότερες, όμως οι αντίστοιχες για τα σημεία που βρίσκονται στις θέσεις από +10m έως +30m είναι αρκετά υψηλότερες. Αντίθετη εικόνα υπάρχει στις τιμές των ελάχιστων παραμορφώσεων, όπου στην περίπτωση της διασταύρωσης με το δευτερογενές ρήγμα σημειώνονται αρκετά μεγαλύτερες τιμές.

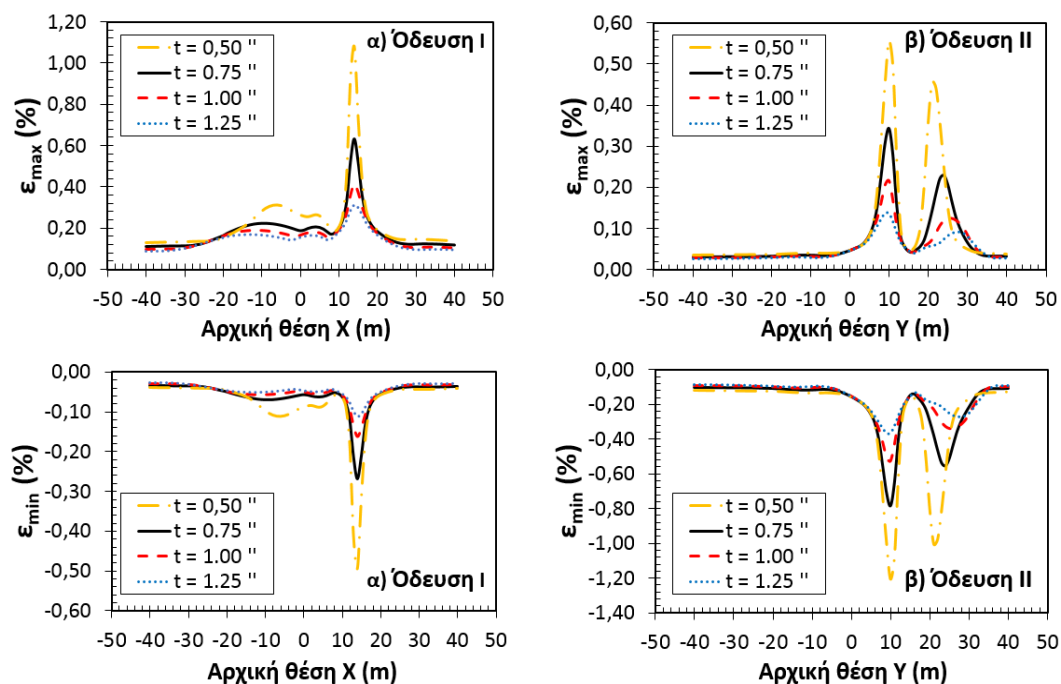
- Αριστερόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα

Σε αυτή τη περίπτωση ρήγματος, σχετικά με τα διαγράμματα που εμφανίζονται στο Σχήμα 6.28 η εικόνα είναι η αναμενόμενη. Όπως και σε όλα τα προηγούμενα διαγράμματα που αφορούσαν μετατοπίσεις σημείων κατά τον άξονα Z, οι διαδοχικές αλλαγές της τιμής του πάχους φαίνεται να οδηγεί σε εμφανείς αποκλίσεις των καμπυλών. Στο Σχήμα 6.29 φαίνεται να υπάρχει η αντίθετη εικόνα από το αντίστοιχο διάγραμμα παραμορφώσεων της προηγούμενης παραγράφου.

Πιο συγκεκριμένα, αυτή τη φορά οι τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων που σημειώνονται για τη περίπτωση της Όδευσης I, είναι μεγαλύτερες από εκείνες που θα προέκυπταν από διασταύρωση με το κύριο ρήγμα, ενώ για τις ελάχιστες ισχύει το ανάποδο.

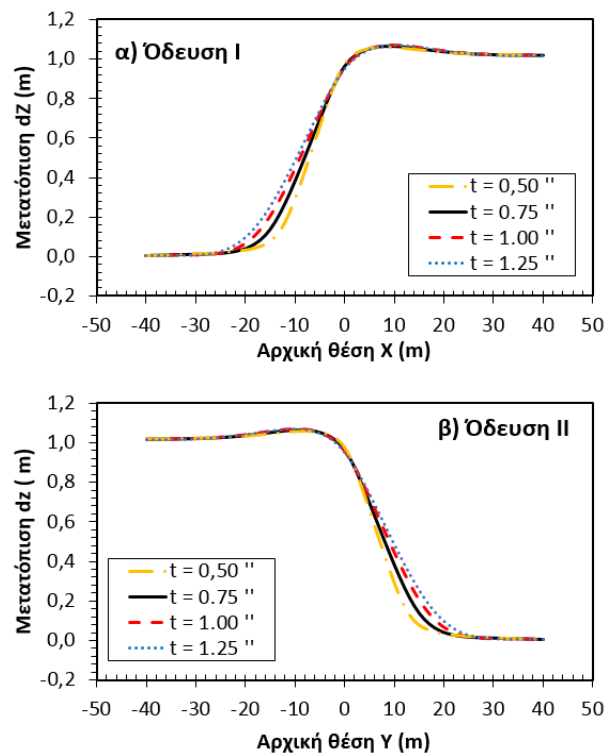


**Σχήμα 6.28:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές του  $t$  και για δύο διαφορετικές οδεύσεις

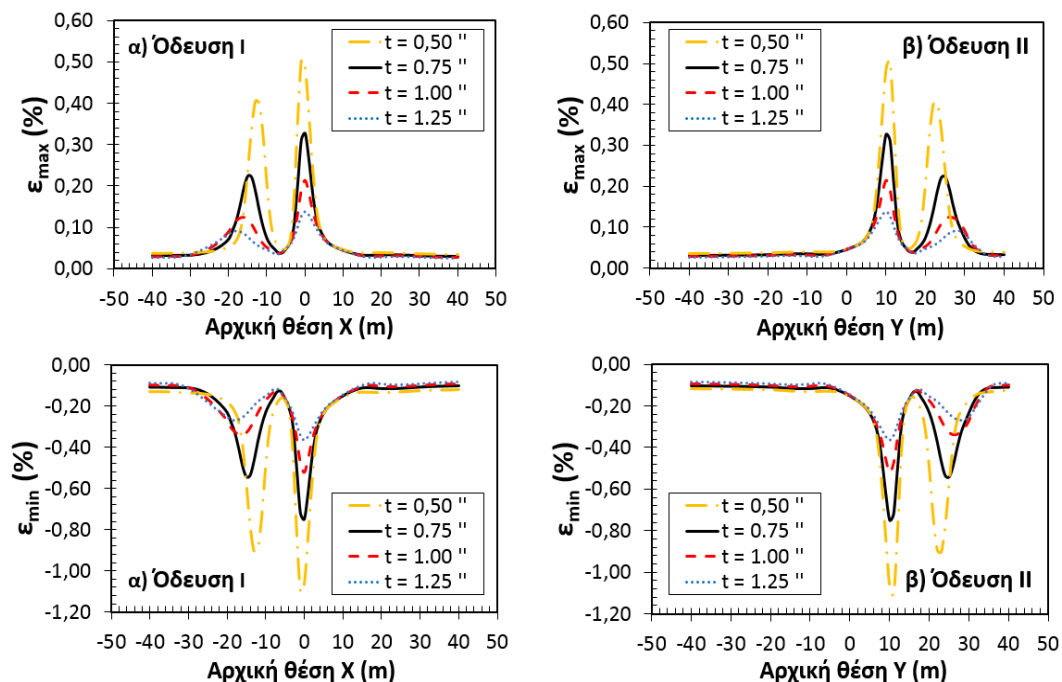


**Σχήμα 6.29:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $t$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

- Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα



**Σχήμα 6.30:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές του  $t$  και για δύο διαφορετικές οδεύσεις



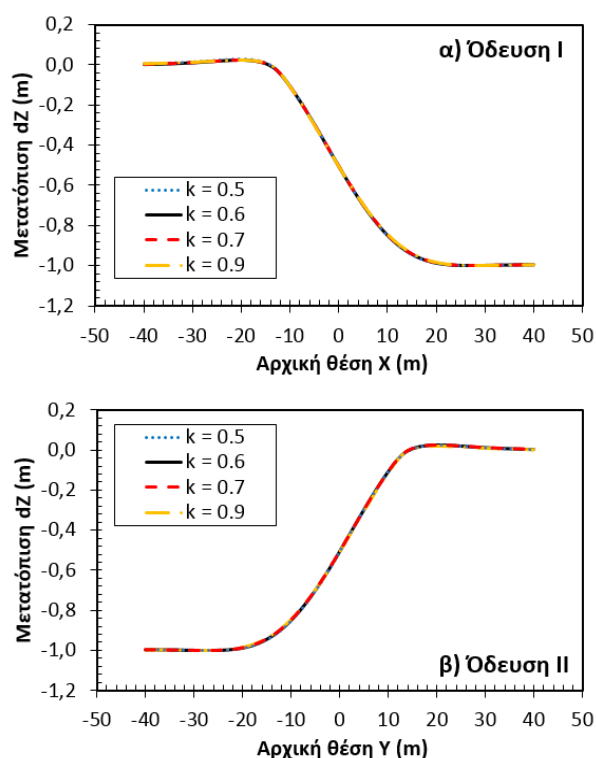
**Σχήμα 6.31:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $t$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

Στα Σχήματα 6.30 και 6.31 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις και οι μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις αντίστοιχα. Όπως συνέβη και στην περίπτωση του Αριστερόστροφου Πλαγιοκανονικού, έτσι και σε αυτή του Δεξιόστροφου Πλαγιοανάστροφου, οι διαφορές μεταξύ των μετακινήσεων και παραμορφώσεων που προκύπτουν από τις δύο διαφορετικές Οδεύσεις είναι αρκετά μικρές.

### 6.3.2 Επικάλυψη Αγωγού

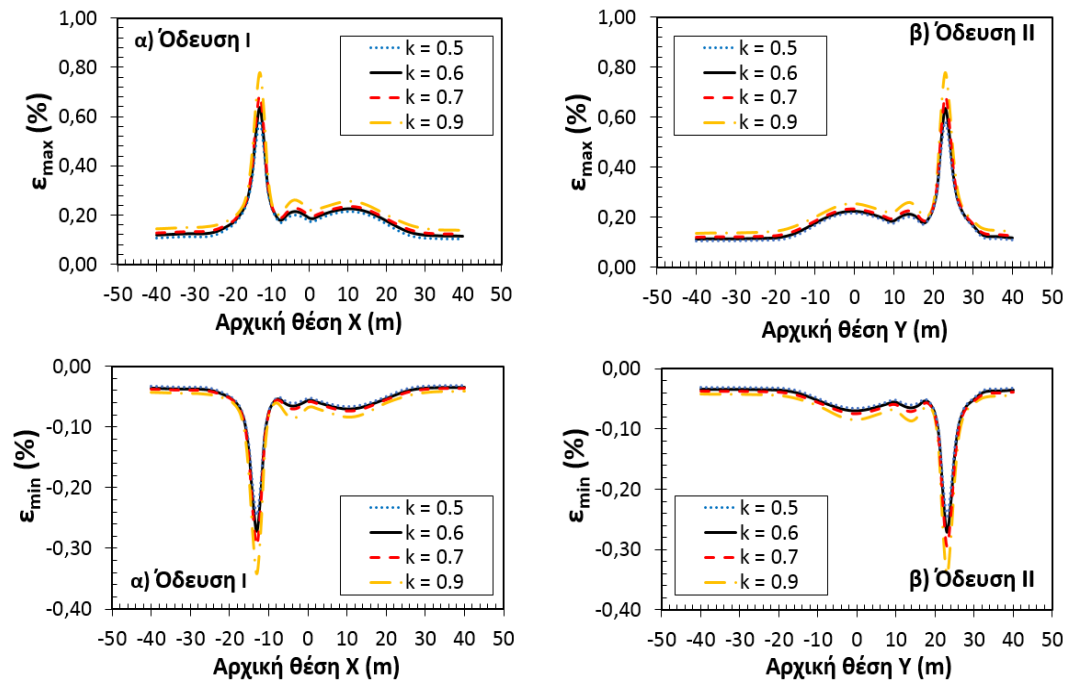
Έπειτα από την ολοκλήρωση των δοκιμών για το πάχος  $t$ , πραγματοποιούνται αναλύσεις και για τις 3 τιμές του συντελεστή απομείωσης τριβής  $k$  όπως έγινε και στη περίπτωση του Κανονικού και του Ανάστροφου κύριου ρήγματος. Ο συντελεστής  $k$  έλαβε τις ακόλουθες τιμές : i)  $k=0.5$ , ii)  $k=0.7$  και iii)  $k=0.9$ , για κάθε μια από τις οποίες κατασκευάστηκαν γραφήματα με βάση τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για τις τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων και των παραμορφώσεων των σημείων του αγωγού.

- Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό κύριο Ρήγμα



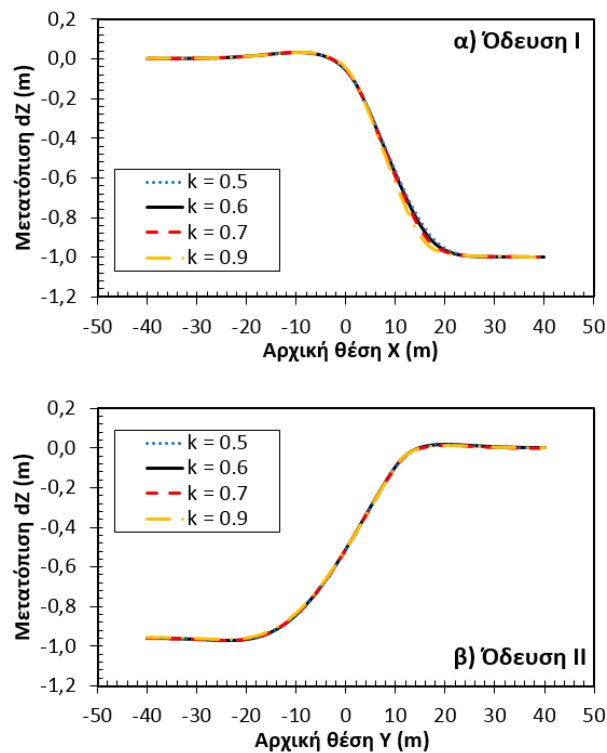
**Σχήμα 6.32:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.

Όπως ήταν αναμενόμενο, ύστερα κι από προηγούμενες αναλύσεις, οι καμπύλες για διαφορετική τιμή του  $k$  δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές. Στο Σχήμα 6.32, οι αποκλίσεις είναι τόσο μικρές ώστε σαν αποτέλεσμα οι καμπύλες να φαίνεται οριακά πως συμπίπτουν. Στο Σχήμα 6.33, παρατηρείται ελάχιστα διαφορετική εικόνα. οι γραμμές φαίνεται να αποκλίνουν ελαφρώς σε ορισμένα σημεία δείχνοντας ότι η αύξηση του συντελεστή  $k$  οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων.



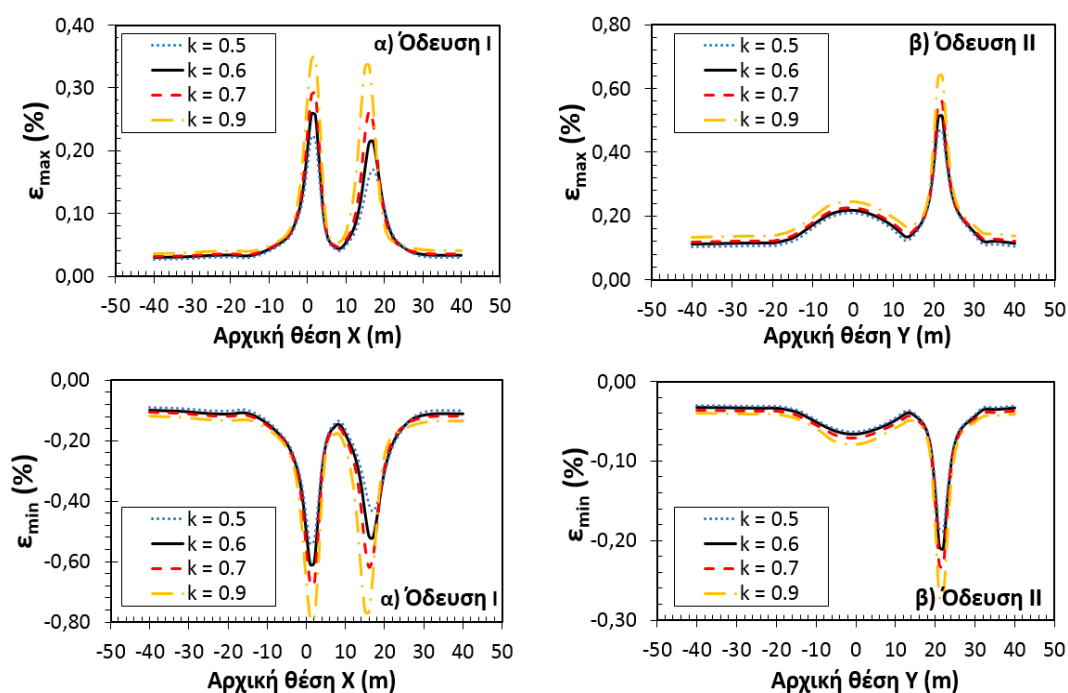
**Σχήμα 6.33:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις

- Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα



**Σχήμα 6.34:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις

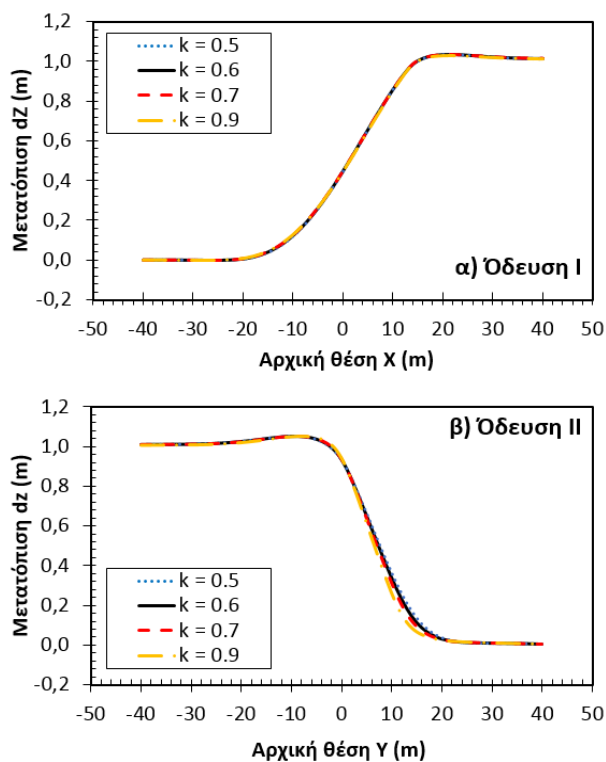
Όσον αφορά το Σχήμα 6.34 στο οποίο εμφανίζονται τα διαγράμματα των μετατοπίσεων, οι καμπύλες φαίνεται να συμπίπτουν. Στην περίπτωση των παραμορφώσεων οι καμπύλες αποκλίνουν, εμφανίζοντας ορισμένες διαφορές για τη διαδοχική αλλαγή του συντελεστή  $k$ . Ακόμη, όπως ακριβώς και στη περίπτωση του πάχους, για Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα, οι τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων εμφανίζονται μεγαλύτερες για τη διασταύρωση με το Κύριο Ρήγμα, ενώ στη περίπτωση των θλιπτικών συμβαίνει το ανάποδο.



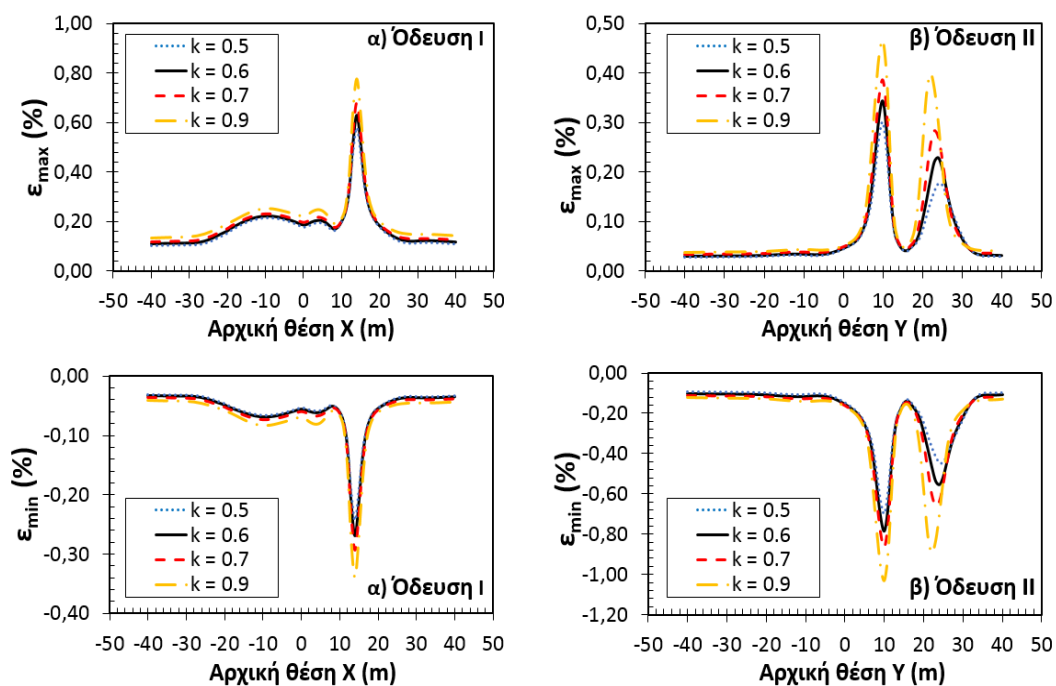
**Σχήμα 6.35:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις

- Αριστερόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα

Σχετικά με τα διαγράμματα των μετατοπίσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.36 οι διαφορές είναι πολύ μικρές, με εξαίρεση ίσως κάποιες μικρές αποκλίσεις για τα σημεία με αρχικές θέσεις από +10m έως +20 m στη περίπτωση της Όδευσης II για διασταύρωση με Κύριο Ρήγμα. Σε αντίθεση με τη περίπτωση του Δεξιόστροφου Πλαγιοκανονικού (β), σε αυτή, παρατηρείται η ανάποδη εικόνα όσον αφορά τις τιμές των μέγιστων κι ελάχιστων παραμορφώσεων. Για την περίπτωση της διασταύρωσης με το κύριο ρήγμα παρατηρούνται μικρότερες τιμές θλιπτικών παραμορφώσεων και μεγαλύτερες εφελκυστικών από τις αντίστοιχες που θα προέκυπταν έπειτα από διασταύρωση με το δευτερεύον, όπως ακριβώς φαίνεται και στο Σχήμα 6.37.

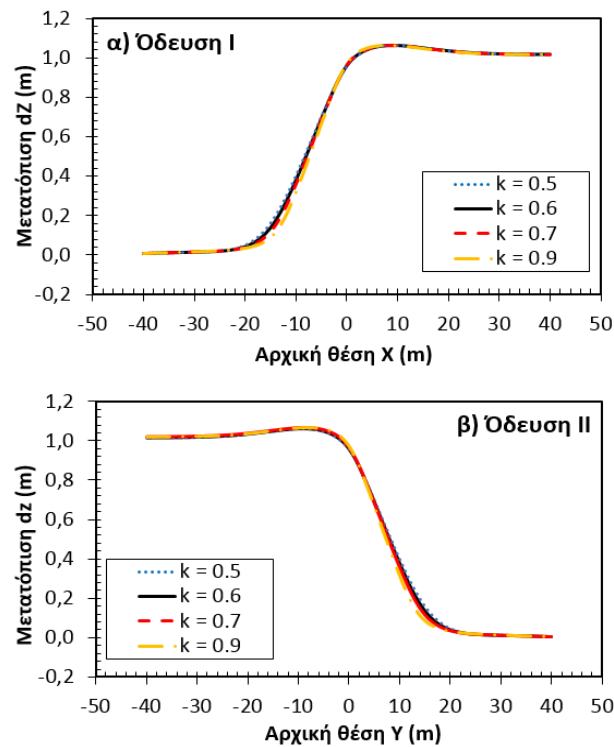


**Σχήμα 6.36:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις

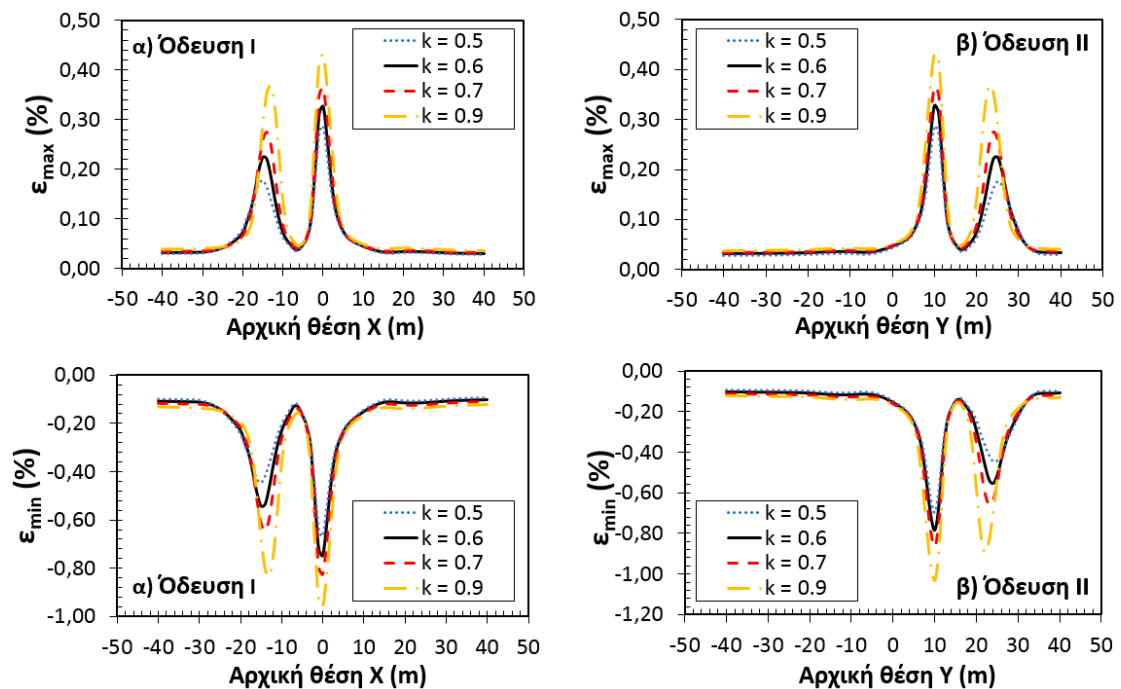


**Σχήμα 6.37:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις

- Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα



**Σχήμα 6.38:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις



**Σχήμα 6.39:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών για 4 διαφορετικές τιμές  $k$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις



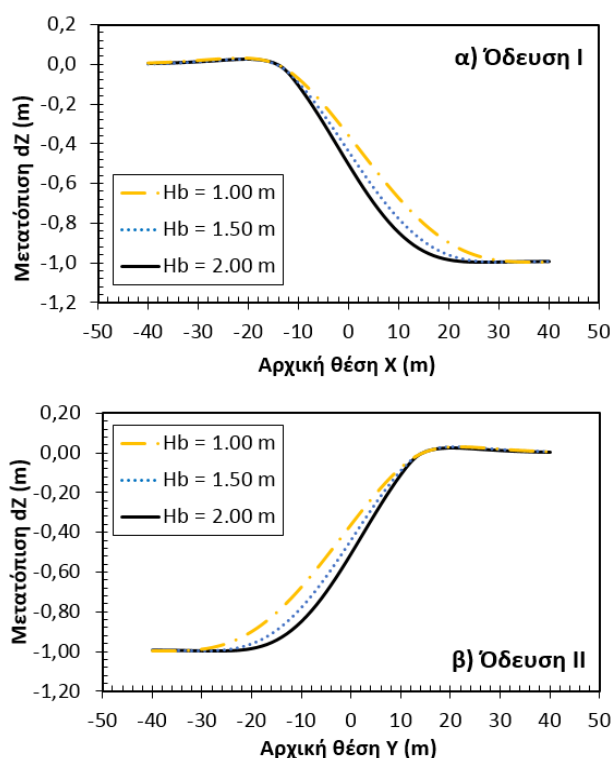
Στο Σχήμα 6.38 παρουσιάζονται οι καμπύλες σχετικά με τις κατακόρυφες μετακινήσεις (άξονας Z) των σημείων του αγωγού για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις Οδεύσεων. Σε πολύ συγκεκριμένα σημεία, παρατηρούνται κάποιες πολύ μικρές αποκλίσεις, ενώ στη πλειοψηφία των σημείων οι γραμμές φαίνεται να συμπίπτουν. Στο Σχήμα 6.39 που ακολουθεί παρουσιάζονται και οι παραμορφώσεις για αυτή τη τελευταία περίπτωση ρήγματος με τις αποκλίσεις να είναι πιο εμφανείς. Διαπιστώνεται ακόμη ότι τα διαγράμματα για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις Οδεύσης μοιάζουν κατοπτρικά.

### 6.3.3 Βάθος Επίχωσης

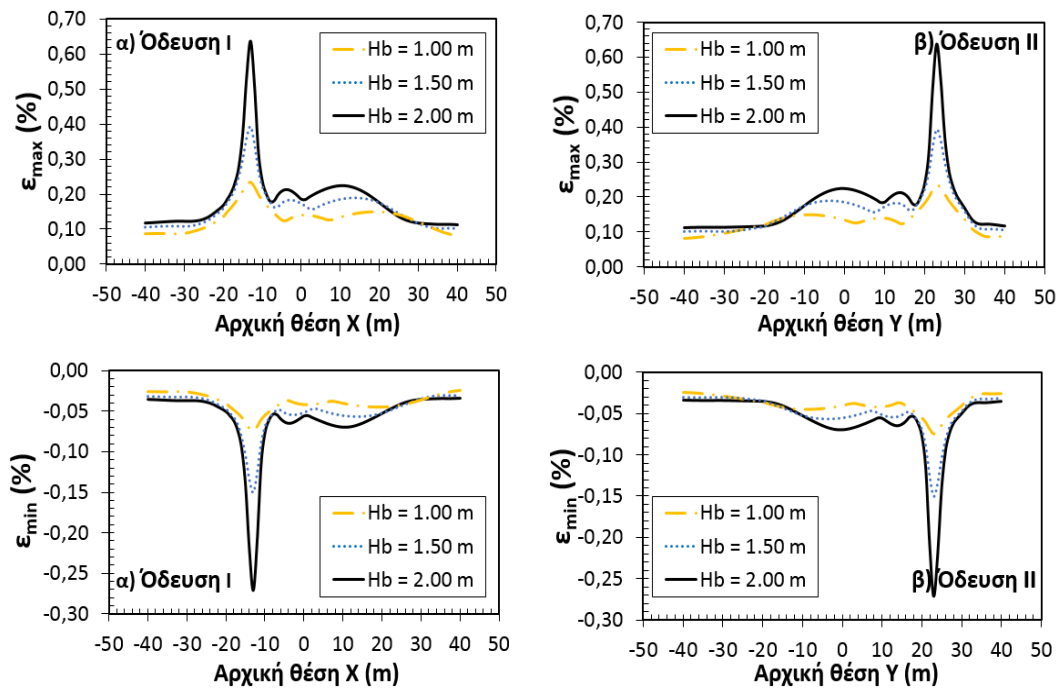
Ύστερα από τις παραμέτρους  $t$  και  $k$ , μελετάται και η επιρροή του βάθους  $H_b$  για τους τύπους αυτών των ρηγμάτων, με εξαγωγή αποτελεσμάτων για διαδοχικές μεταβολές της τιμής του. Πιο συγκεκριμένα επιλέγονται ξανά 2 τιμές πέρα από εκείνη των 2m : i)  $H_b=1.5$  m και ii)  $H_b=1$ m. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται, παρουσιάζονται σε γραφήματα και συγκρίνονται μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις ρηγμάτων και αυτής της ενότητας, οι αποκλίσεις στις καμπύλες είναι ικανοποιητικές και κρίνεται ότι δεν υπάρχει κάποιος λόγος να πραγματοποιηθεί περαιτέρω μελέτη για μικρότερα ή μεγαλύτερα βάθη.

- Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό κύριο Ρήγμα

Στο σχήμα 6.40 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις μετατοπίσεις (άξονας Z) των σημείων του αγωγού, ενώ στο ακόλουθο σχήμα 6.41 εμφανίζονται οι παραμορφώσεις (εφελκυστικές και θλιπτικές) για τα σημεία αυτά.



**Σχήμα 6.40:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές του  $H_b$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις

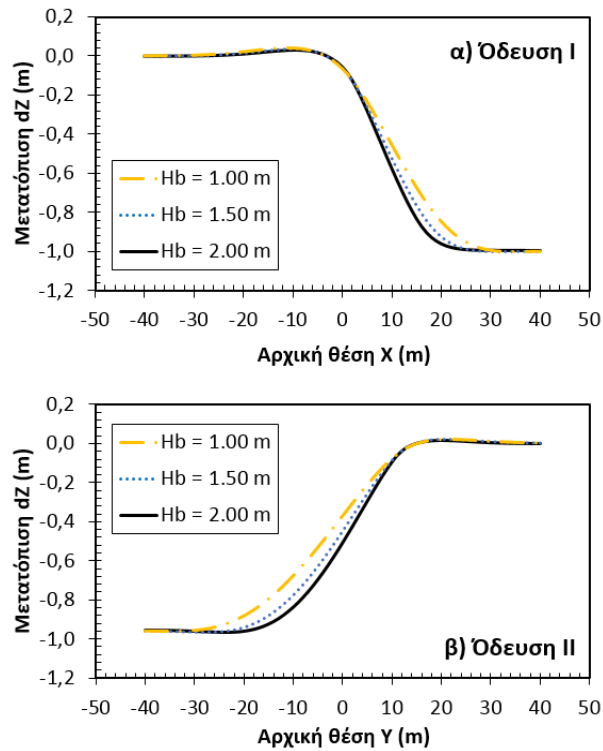


**Σχήμα 6.41:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές  $H_b$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

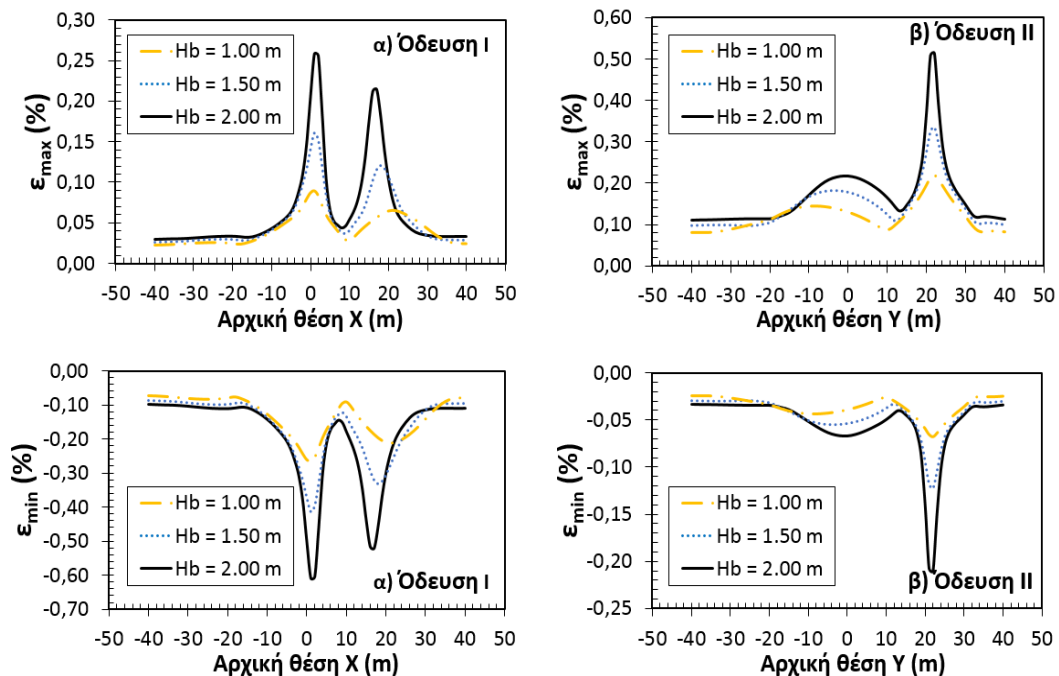
Όπως ήταν αναμενόμενο η σταδιακή μείωση του βάθους οδηγεί σε μεγάλες σχετικά μεταβολές των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων. Στην περίπτωση του Αριστερόστροφου Πλαγιοκανονικού Ρήγματος διαπιστώνεται ότι δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες διαφορές στις τιμές παραμορφώσεων μεταξύ των δύο εναλλακτικών Οδεύσεων όπως συνέβη και στις ενότητες 6.3.1 και 6.3.2 για τον ίδιο τύπο ρήγματος.

- Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα

Στα σχήματα 6.42 και 6.43 φαίνεται ότι κυριαρχεί η ίδια εικόνα με αυτή του Αριστερόστροφου Πλαγιοκανονικού, όσον αφορά τις αποκλίσεις έπειτα από τις διαδοχικές αλλαγές στη τιμή του  $H_b$ . Στη περίπτωση αυτή, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται αρκετά μεγαλύτερες για την περίπτωση της διασταύρωσης με το Κύριο Ρήγμα ενώ στην περίπτωση των θλιπτικών παρατηρείται το ανάποδο.



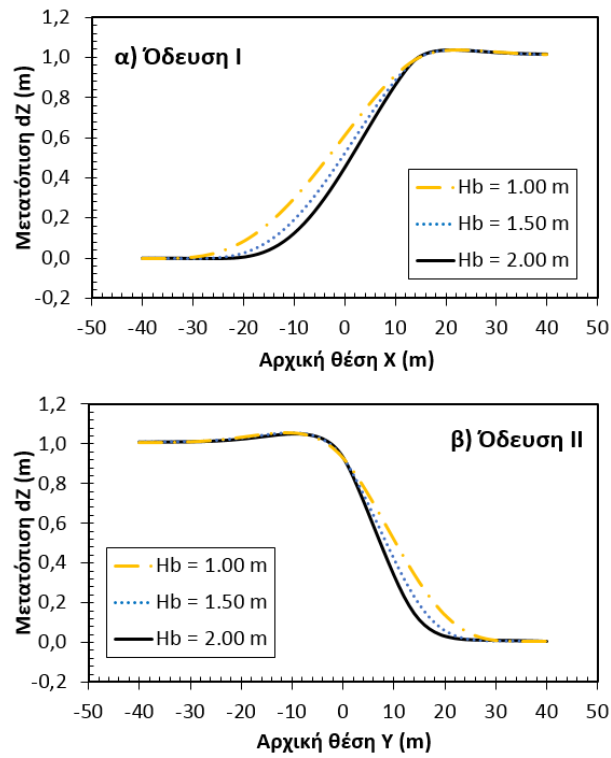
**Σχήμα 6.42:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές του  $H_b$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.



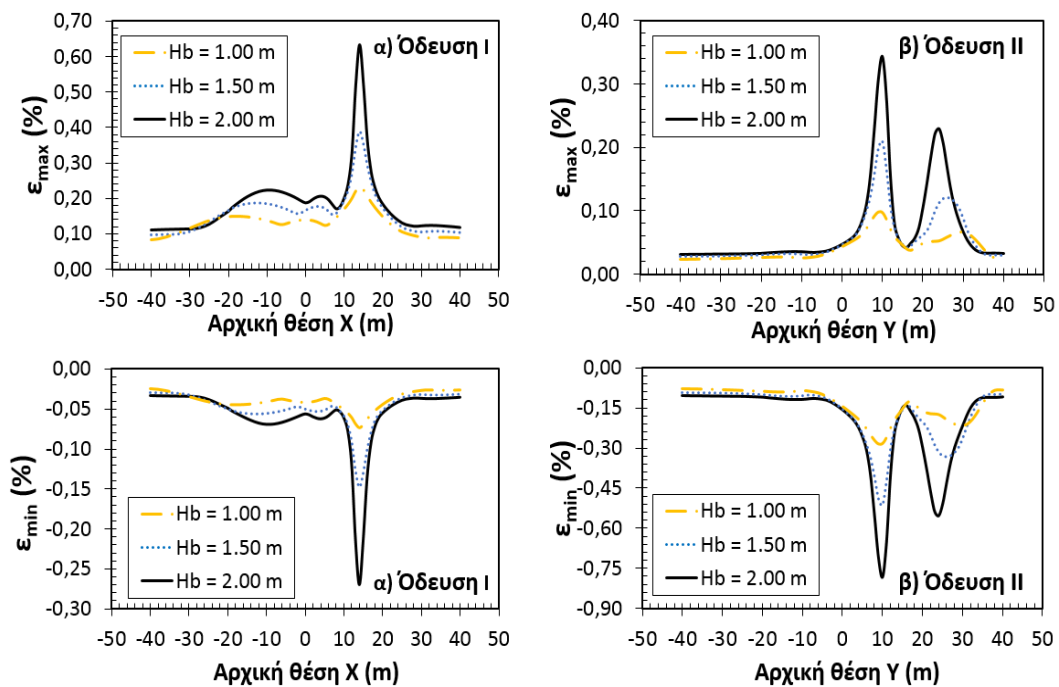
**Σχήμα 6.43:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές  $H_b$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

- Αριστερόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα

Όσον αφορά την επιρροή του  $H_b$ , φαίνεται να είναι μεγάλη καθώς μικρή μείωση του, οδηγεί σε πολύ εμφανείς μεταβολές πάνω στα διαγράμματα.



**Σχήμα 6.44:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές του  $H_b$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις.

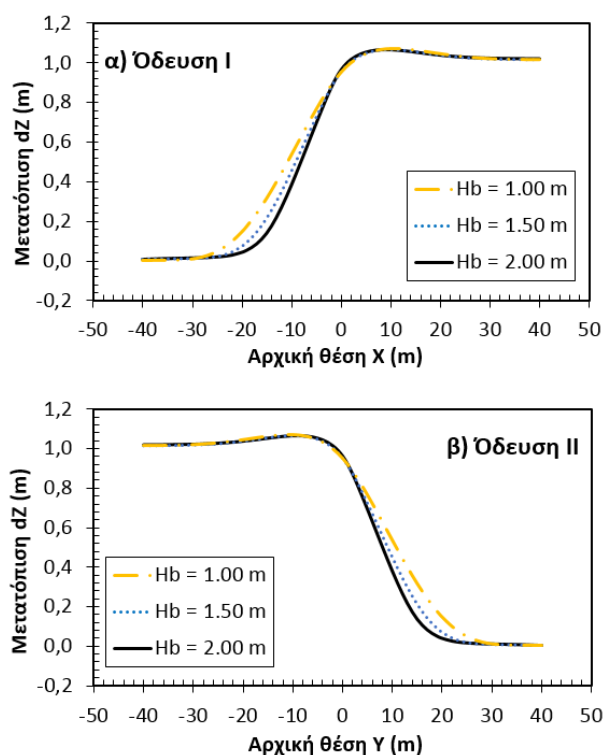


**Σχήμα 6.45:** Μέγιστες ( $\epsilon_{max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές  $H_b$  και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

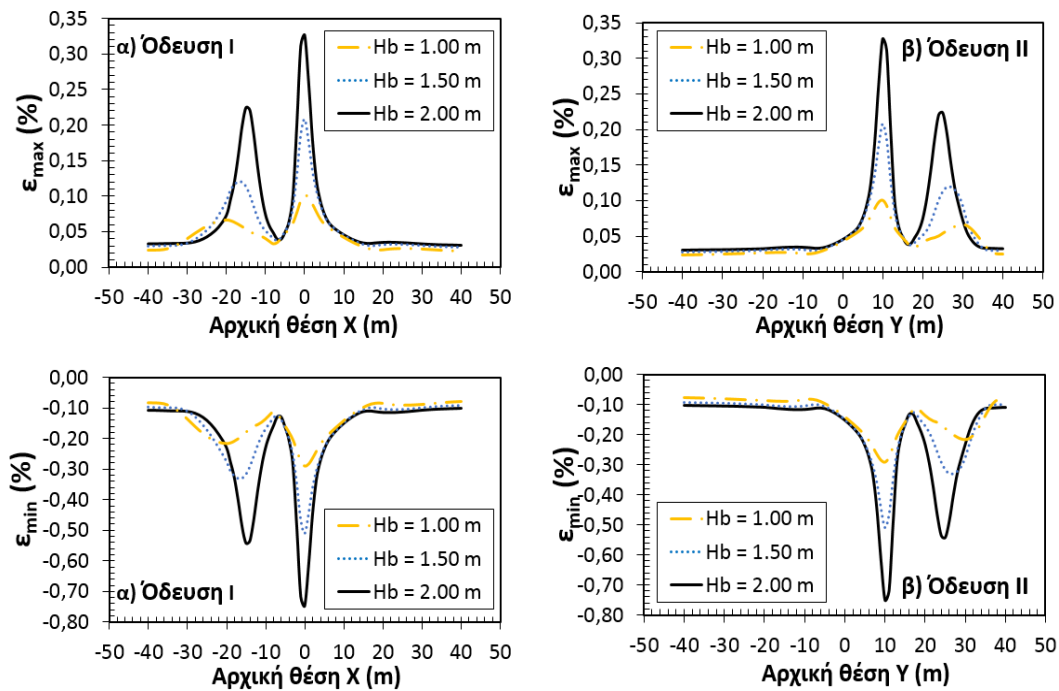
Όπως συνέβη και στη μελέτη για το πάχος  $t$  και το συντελεστή  $k$ , στην περίπτωση του Αριστερόστροφου Πλαγιοανάστροφου παρατηρείται ότι στα διαγράμματα των παραμορφώσεων, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 6.45, οι τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων εμφανίζονται μεγαλύτερες στην περίπτωση της διασταύρωσης με το δευτερογενές ρήγμα.

- Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα

Στα Σχήματα 6.46 και 6.47 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κατακόρυφων μετακινήσεων και των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων αντίστοιχα των σημείων του αγωγού, για δύο διαφορετικές εναλλακτικές επιλογές Όδευσης. Με την ολοκλήρωση της μελέτης για το βάθος επίχωσης παρατηρείται ότι και σε αυτή τη περίπτωση, διαδοχική αλλαγή της τιμής  $H_b$ , οδηγεί σε μεγάλες αποκλίσεις των αντίστοιχων καμπυλών.



**Σχήμα 6.46:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές του  $H_b$  και για 2 διαφορετικές οδεύσεις



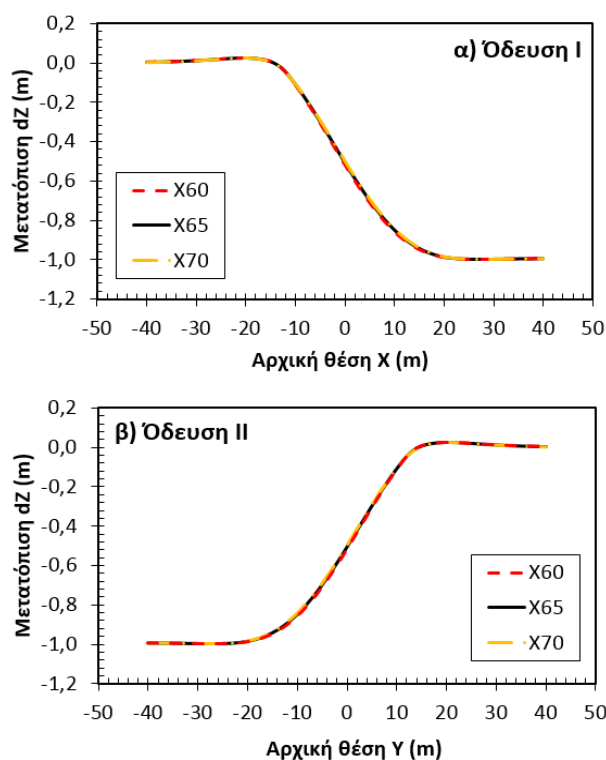
**Σχήμα 6.47:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικές τιμές Hb και 2 διαφορετικές οδεύσεις.

### 6.3.4 Τύπος Χάλυβα

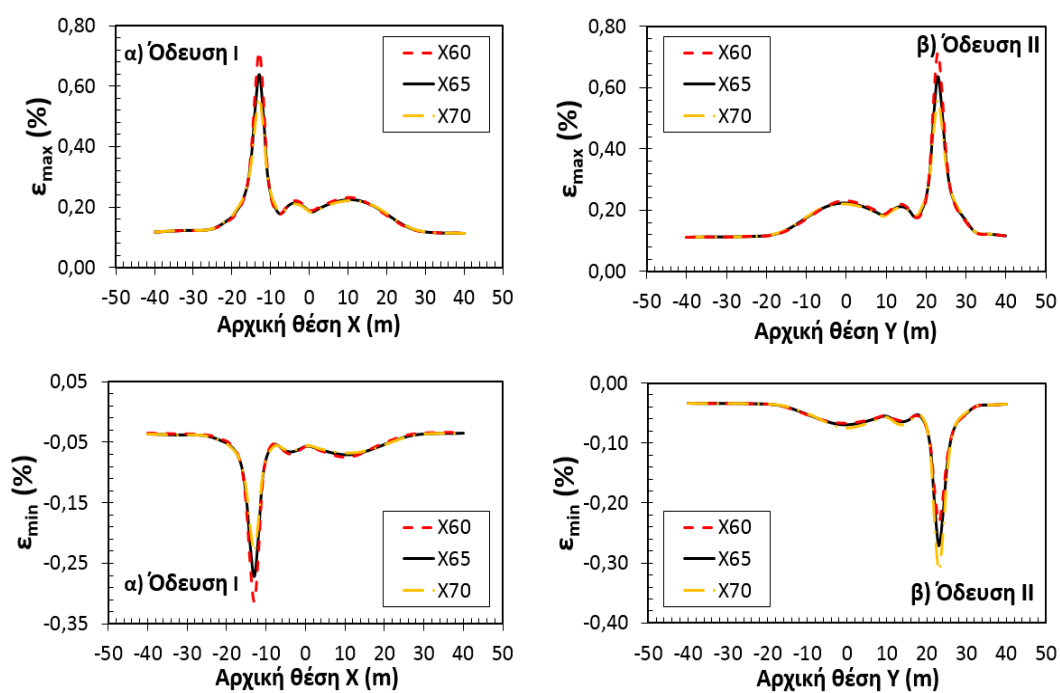
Τέλος, μελετάται και η επιρροή του τύπου του χάλυβα. Εκτός των αναλύσεων για χάλυβα τύπου X65 με τάση διαρροής  $\sigma_y = 490$  MPa, επιλέγονται ξανά 2 επιπλέον τύποι χάλυβα: i) χάλυβας ποιότητας X60 με τάση διαρροής  $\sigma_y = 456$  MPa και ii) χάλυβας ποιότητας X70 με τάση διαρροής  $\sigma_y = 522$  MPa. Τα αποτελέσματα για τους 3 τύπους συγκρίνονται για κάθε μια από τις περιπτώσεις των ρηγμάτων αυτών όπως και οι άλλες παράμετροι προηγουμένως. Όπως ήταν αναμενόμενο οι διαδοχικές αλλαγές δεν οδηγούν σε εμφανή αποτελέσματα μιας και στη πλειοψηφία των διαγραμμάτων των κατακόρυφων μετατοπίσεων φαίνεται να υπάρχει μια σύμπτωση των γραμμών.

- Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα

Στα διαγράμματα των παραμορφώσεων εμφανίζονται ορισμένες αποκλίσεις όμως αυτές σε καμία περίπτωση δεν πλησιάζουν τις αντίστοιχες για το βάθος επίχωσης ή το πάχος του αγωγού. Το Σχήμα 6.48 παρουσιάζει τις καμπύλες για τις διάφορες τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων των σημείων του αγωγού για τις περιπτώσεις διασταύρωσης με δευτερογενές και κύριο Ρήγμα αντιστοίχως. Οι καμπύλες των παραμορφώσεων (εφελκυστικών και θλιπτικών) για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.49 που ακολουθεί.

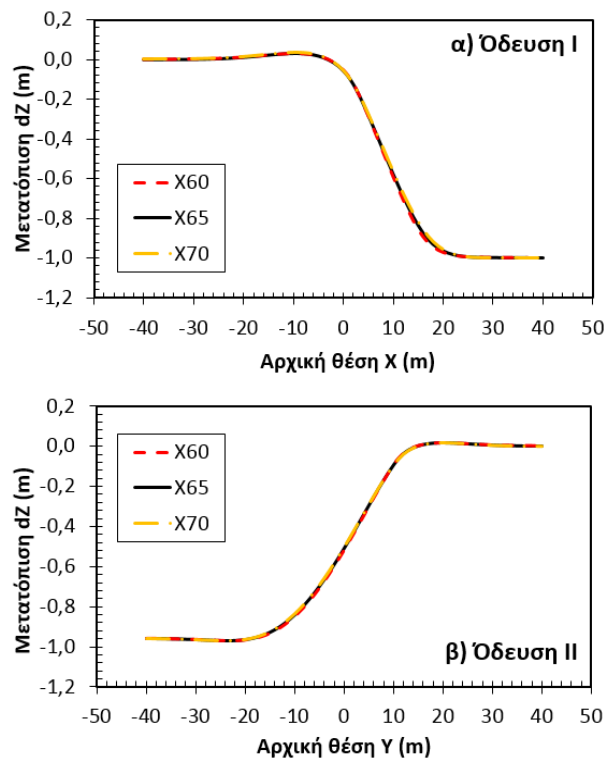


**Σχήμα 6.48:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

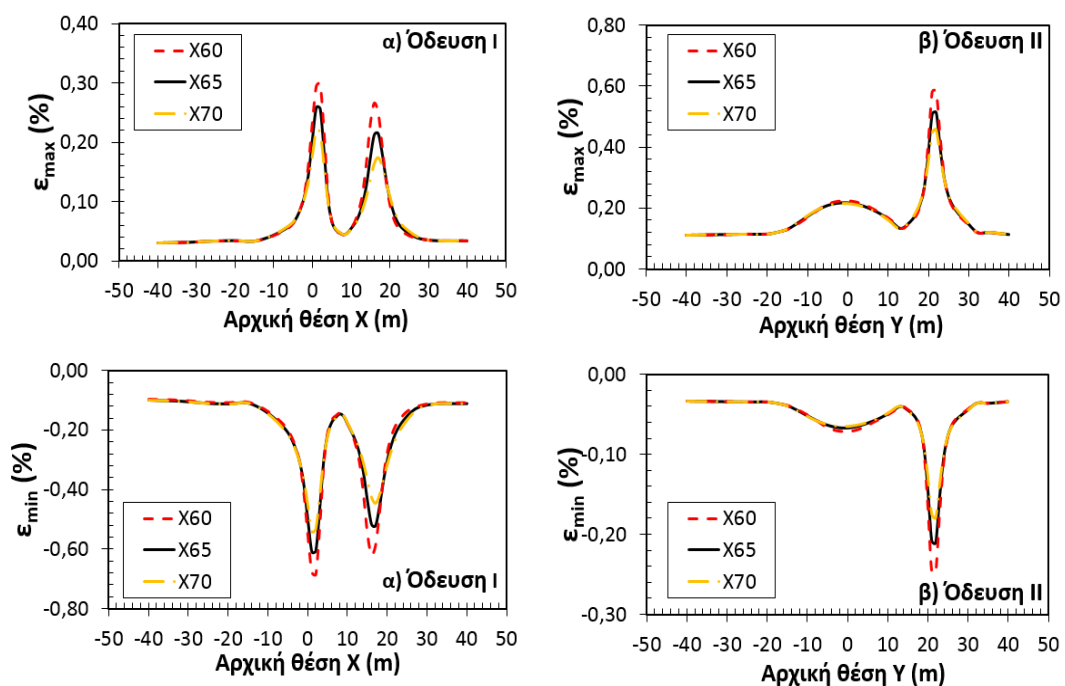


**Σχήμα 6.49:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

- Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα



**Σχήμα 6.50:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις



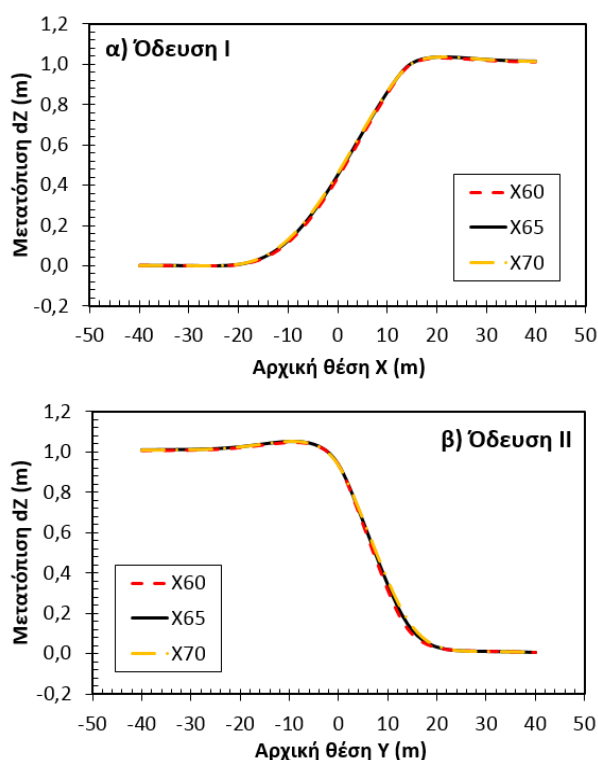
**Σχήμα 6.51:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις



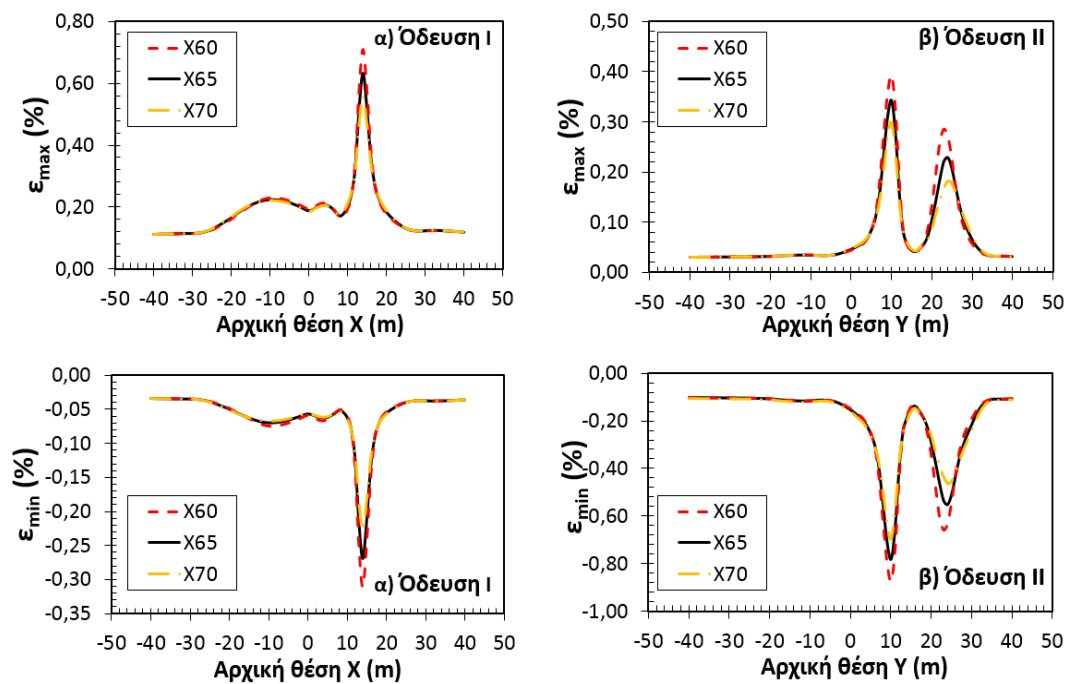
Ακριβώς όπως και στις περιπτώσεις όλων των άλλων παραμέτρων για το Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό Κύριο Ρήγμα διαπιστώνεται ότι στο Σχήμα 6.51 που εμφανίζονται τα διαγράμματα των παραμορφώσεων, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση που ο αγωγός συναντά το κύριο ρήγμα ενώ για τις θλιπτικές παραμορφώσεις ισχύει το αντίθετο. Στο Σχήμα 6.50 εμφανίζονται τα γραφήματα των κατακόρυφων μετατοπίσεων για διαφορετικούς τύπου χάλυβα και όπως διαπιστώνεται οι αποκλίσεις είναι ελάχιστες.

- Αριστερόστροφο Πλαγιονάστροφο Κύριο Ρήγμα

Στο Σχήμα 6.52 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις στον άξονα Z των σημείων του αγωγού. Στα διαγράμματα είναι οπτικά εμφανές ότι οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές κι είναι διακριτές κυρίως λόγω της επιλογής διαφορετικών χρωμάτων για κάθε καμπύλη. Στο Σχήμα 6.53 παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις παραμορφώσεις στα οποία οι αποκλίσεις είναι περισσότερο εμφανείς. Διαπιστώνεται ακόμη, ότι οι τιμές των εφελκυστικών παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερες για τη διασταύρωση του αγωγού με το δευτερογενές ρήγμα σε αντίθεση με την περίπτωση του Δεξιόστροφου Πλαγιοκανονικού (β).

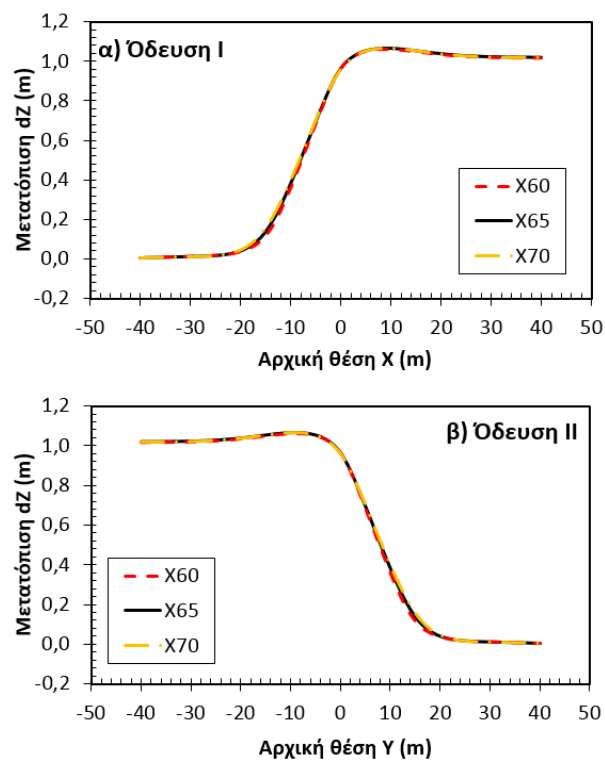


**Σχήμα 6.52:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

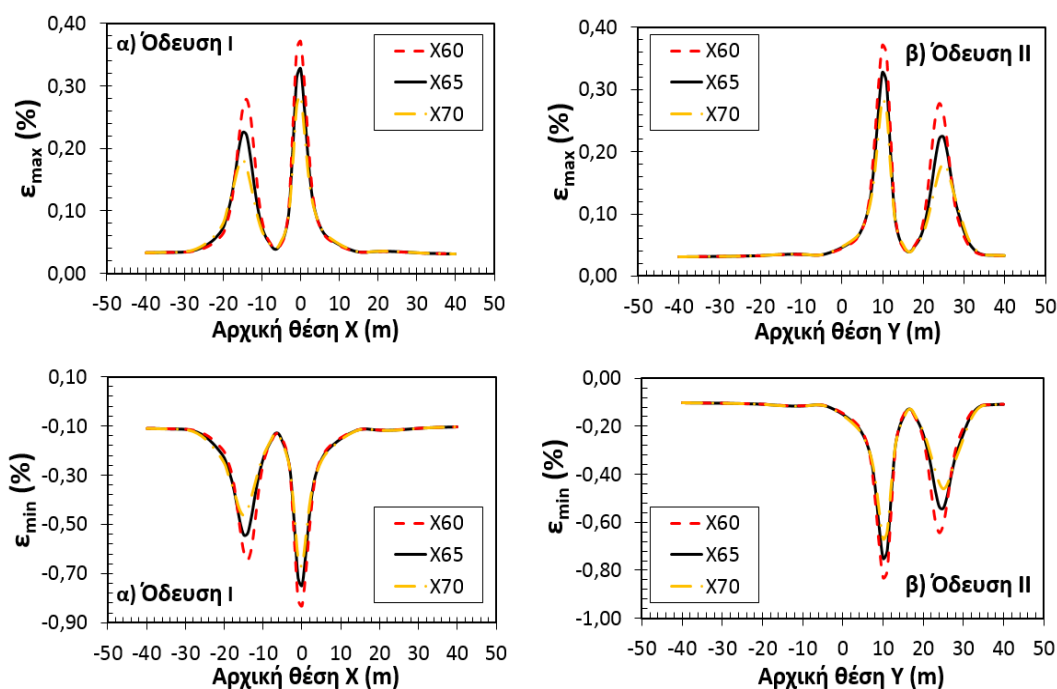


**Σχήμα 6.53:** Μέγιστες ( $\epsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\epsilon_{\min}$  %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

- Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο Κύριο Ρήγμα



**Σχήμα 6.54:** Κατακόρυφες μετακινήσεις ( $dz$ ) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις



**Σχήμα 6.55:** Μέγιστες ( $\varepsilon_{\max}$  %) κι ελάχιστες ( $\varepsilon_{\min}$ %) παραμορφώσεις των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική θέση των σημείων αυτών, για 3 διαφορετικούς τύπους χάλυβα και 2 διαφορετικές οδεύσεις

Τα διαγράμματα των κατακόρυφων μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων (εφελκυστικών και θλιπτικών) των σημείων του αγωγού ως προς την αρχική τους θέση παρουσιάζονται για τη περίπτωση του Δεξιόστροφου Πλαγιοανάστροφου Κύριου Ρήγματος στο Σχήμα 6.54 και στο Σχήμα 6.55, αντίστοιχα. Τα εν λόγω διαγράμματα παρουσιάζουν αναμενόμενη εικόνα, αφού για μια ακόμη φορά αρχικά παρατηρείται μια σύμπτωση των καμπυλών στα διαγράμματα των μετακινήσεων, ενώ στα αντίστοιχα για τις παραμορφώσεις σημειώνεται ότι οι τιμές των μέγιστων κι ελάχιστων παραμορφώσεων είναι κοντά για τις δύο εναλλακτικές Οδεύσεις και τα διαγράμματα φαίνονται κατοπτρικά.

## 6.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου εξετάστηκε η επιρροή του πάχους  $t$ , του συντελεστή  $k$ , του βάθους  $H_b$  και του τύπου του χάλυβα σχετικά με τις κατακόρυφες μετακινήσεις και τις παραμορφώσεις ορισμένων σημείων του αγωγού. Οι διαδοχικές αλλαγές των τιμών αυτών οδηγούν σε διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται με μορφή διαγραμμάτων και συγκρίνονται στις αντίστοιχες υποενότητες.

Διαπιστώθηκε ότι οι μεταβολές των τιμών  $t$  και  $H_b$  οδηγούν σε κατασκευή παρεμφρών γραφημάτων, με τις αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών να είναι ευδιάκριτες. Σε κάθε διαφορετική Όδευση του αγωγού και σε κάθε διαφορετικό τύπο ρήγματος, φαίνεται ότι μικρή αλλαγή της τιμής του πάχους  $t$  ή του βάθους  $H_b$

αντίστοιχα οδηγεί σε μια διαφοροποίηση των διαγραμμάτων τόσο στην περίπτωση των κάθετων μετακινήσεων όσο και στις περιπτώσεις των μεγίστων κι ελαχίστων παραμορφώσεων. Σημαντικό είναι, ότι η διαφοροποίηση αυτή δεν έχει σχέση με το σχήμα των καμπυλών αλλά με τη θέση αυτών. Δηλαδή για ίδιο τύπο ρήγματος και ίδια Όδευση οι καμπύλες είναι παρόμοιες σχηματικά και οι αποκλίσεις έχουν να κάνουν περισσότερο με τη θέση τους πάνω στο διάγραμμα.

Όσον αφορά τις μεταβολές των τιμών  $k$  και  $X$ , παρατηρήθηκαν αποκλίσεις αρκετά μικρότερου βαθμού. Σε αρκετές περιπτώσεις οι διαφορές των καμπυλών κάποιου διαγράμματος είναι τόσο μικρές με αποτέλεσμα οι καμπύλες που εκφράζουν τις διαφορετικές τιμές  $k$  ή τους διαφορετικούς τύπους χάλυβα να εμφανίζονται οριακά ή μια πάνω στην άλλη. Στα διαγράμματα της κάθετης μετακίνησης αυτή η σύμπτωση είναι πιο έντονη ενώ στα αντίστοιχα διαγράμματα των παραμορφώσεων σε αρκετές περιπτώσεις οι καμπύλες εμφανίζουν ορισμένες αποκλίσεις. Οι αποκλίσεις έχουν να κάνουν με τη θέση πάνω στο διάγραμμα κι όχι με το σχήμα της γραμμής. Δηλαδή, για τον ίδιο τύπο ρήγματος και την ίδια Όδευση οι αντίστοιχες καμπύλες είναι ίδιες σχηματικά και οι αλλαγές τους έχουν να κάνουν με τη θέση τους πάνω στο διάγραμμα.

Τέλος, παρατηρείται ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο που θεωρητικά επαληθεύει ότι οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με πανομοιότυπο τρόπο. Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις των Κανονικών κύριων ρηγμάτων οι μετατοπίσεις εμφανίζονται με αρνητικές τιμές ενώ το ακριβώς αντίθετο φαίνεται να συμβαίνει στις περιπτώσεις των Ανάστροφων κύριων ρηγμάτων. Στην ενότητα 6.3 για κάθε παράμετρο διαπιστώνεται ότι στο Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό και στο Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο ρήγμα οι τιμές των παραμορφώσεων δεν έχουν μεγάλες διαφορές για τις δύο Οδεύσεις και τα διαγράμματα φαίνεται σαν να καθρεφτίζονται. Στην περίπτωση του Δεξιόστροφου Πλαγιοκανονικού παρατηρούνται αρκετά μεγαλύτερες τιμές για μέγιστες και αρκετά μικρότερες τιμές για ελάχιστες παραμορφώσεις στην Όδευση II, ενώ η ακριβώς αντίστροφη εικόνα εμφανίζεται στο Αριστερόστροφο Πλαγιοανάστροφο όπου οι μέγιστες τιμές λαμβάνουν μικρότερες τιμές για την Όδευση II και οι ελάχιστες μεγαλύτερες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

---

### 7.1 Συμπεράσματα από την Αριθμητική Διερεύνηση

Από τις τέσσερις διαφορετικές παραμέτρους που εξετάζονται, δύο παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιρροή και δύο μικρότερη. Οι αλλαγές στο πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού φαίνεται να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα, μιας και όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα, σταδιακή αύξηση στη τιμή  $t$  οδηγεί σε μεγάλη μείωση των κατακόρυφων μετατοπίσεων και των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων των σημείων του αγωγού. Η αύξηση της τιμής του πάχους είναι σχετικά μικρή επομένως οι αποκλίσεις που προκύπτουν είναι πολύ σημαντικές. Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και στην παράμετρο του βάθους επίχωσης, όπου για μικρές αυξήσεις του βάθους, σημειώνονται αρκετά μεγαλύτερες τιμές εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων των σημείων. Έτσι ο αγωγός φαίνεται να είναι πιο ευάλωτος στην περίπτωση της διασταύρωσης με σεισμικό ρήγμα όσο αυξάνει το βάθος επίχωσης.

Στη μελέτη των άλλων δύο παραμέτρων η εικόνα είναι διαφορετική. Η αύξηση του συντελεστή απομείωσης τριβής  $k$  δεν εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις σχεδόν πουθενά όσον αφορά τη μετατόπιση των σημείων. Σχετικά με τις παραμορφώσεις, παρατηρούνται ορισμένες διαφοροποιήσεις των καμπυλών, οι οποίες είναι περισσότερο εμφανείς στην περίπτωση του ρήγματος λοξής μετατόπισης. Τέλος για τη μελέτη του τύπου του χάλυβα, όπως και στην περίπτωση του συντελεστή  $k$ , τα διαγράμματα εμφανίζουν σύμπτωση των καμπυλών κατακόρυφης μετατόπισης και μικρές αποκλίσεις στις καμπύλες παραμορφώσεων (κυρίως στην περίπτωση του λοξού κυρίου ρήγματος). Οι παραμορφώσεις (και οι τάσεις) του χάλυβα δεν φτάνουν σε πολύ μεγάλες τιμές, οπότε έτσι εξηγείται το γεγονός ότι το υλικό του αγωγού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Όσον αφορά επομένως αυτές τις δύο παραμέτρους φαίνεται ότι η αλλαγή των τιμών τους δεν οδηγεί σε ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις, επομένως η επιρροή τους είναι σχετικά μικρή στην καταπόνηση του αγωγού.

Σαν γενικό συμπέρασμα προκύπτει πως στις περιπτώσεις του Κανονικού και του Ανάστροφου κύριου ρήγματος, η επιλογή της αποφυγής διασταύρωσης αγωγού – κύριου ρήγματος είναι σωστή. Ο αγωγός συναντά το δευτερογενές ρήγμα και στα σημεία του παρατηρούνται μεν μετατοπίσεις και παραμορφώσεις,

όμως οι τιμές που λαμβάνουν αυτές είναι μικρότερες ανεξαρτήτως των εξεταζόμενων παραμέτρων. Στις περιπτώσεις του ρήγματος λοξής μετατόπισης, η επιλογή ο αγωγός να αποφύγει το κύριο ρήγμα ουσιαστικά είναι ανούσια.

Καθώς σε δύο περιπτώσεις (Αριστερόστροφο Πλαγιοκανονικό και Δεξιόστροφο Πλαγιοανάστροφο) οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων που μετρούνται είναι ίδιες στις δύο Οδεύσεις (απλώς τις παρουσιάζουν διαφορετικά σημεία του αγωγού) και σε δύο άλλες (Δεξιόστροφο Πλαγιοκανονικό και Αριστερόστροφο Πλαγιοανάστροφο) η διασταύρωση του αγωγού με το δευτερογενές ρήγμα παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές θλιπτικών και εφελκυστικών αντίστοιχα παραμορφώσεων από ότι η Όδευση II.

Γίνεται σαφές πως το δευτερογενές ρήγμα μπορεί να αποδειχθεί ιδιαιτέρως επιβαρυντικό για τον αγωγό παρόλο που αυτός απέφυγε τη διασταύρωση του με το κύριο ρήγμα. Παραδείγματα αστοχιών σε δίκτυα αγωγών λόγω δευτερογενών ρηγμάτων έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3. Η σωστή γεωλογική και τοπογραφική έρευνα στο στάδιο της επιλογής της κατάλληλης Όδευσης του αγωγού όπως ακριβώς και η σωστή διαστασιολόγηση του αγωγού είναι εξαιρετικής σημασίας διαδικασίες που μπορούν να βοηθήσουν στην αποφυγή βλαβών, καταστροφών ακόμη και απωλειών ανθρώπινης ζωής.

## 7.2 Γενικά Συμπεράσματα

Στην πράξη, το φαινόμενο διασταύρωσης ενός αγωγού με κάποιο σεισμικό ρήγμα συναντάται συχνά. Το ρήγμα μπορεί να είναι άγνωστο ή σε πολλές περιπτώσεις η αποφυγή του να είναι τεχνικά ή οικονομικά ανέφικτη. Έχει μεγάλη σημασία λοιπόν, η έμφαση στην σωστή κατασκευή του αγωγού ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει και να μην παρουσιάσει βλάβες σε ένα τέτοιο σενάριο. Η επιλογή κατάλληλων υλικών είναι υψίστης σημασίας, όπως και η σωστή επιλογή των χαρακτηριστικών του αγωγού αυτού.

Από τη σχετική μελέτη, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρείται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ρηγμάτων, η αποφυγή της διασταύρωσης με το κύριο ρήγμα μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας για τον αγωγό. Ακόμη και στο ενδεχόμενο διασταύρωσης του με κάποιο δευτερογενές ρήγμα, τα σημεία του θα δεχτούν μικρότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Αυτό μπορεί να είναι σωτήριο, καθώς η διαφορά ανάμεσα στις εκτεταμένες βλάβες και την ολική αστοχία είναι τεράστια. Με την αλλαγή διέλευσης μπορεί να επιτευχθεί η διασφάλιση της προστασίας της πανίδας και της χλωρίδας της ευρύτερης περιοχής, να περιοριστούν σημαντικά οι οικονομικές απώλειες και να εκμηδενιστεί ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία.

Βέβαια, παρατηρείται ότι στην συνδυαστική περίπτωση του ρήγματος λοξής μετατόπισης, τα εξεταζόμενα σημεία του αγωγού παρουσιάζουν ορισμένες φορές παρόμοιες ή ακόμη και μεγαλύτερες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Έτσι ενώ έχουν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητες διαδικασίες για την αποφυγή του κύριου ρήγματος, ενδέχεται ο αγωγός να βρεθεί σε μια χειρότερη κατάσταση. Αυτός είναι και ο λόγος που έχει τονιστεί ιδιαιτέρως η σημασία της προκαταρκτικής γεωλογικής και τοπογραφικής μελέτης της ευρύτερης περιοχής από την οποία περνά το δίκτυο.

Η κατασκευή ενός δικτύου αγωγών είναι ένα σύνθετο έργο. Αρκετές φορές μπορεί η αλλαγή πορείας με σκοπό την αποφυγή κάποιου εμποδίου, να είναι από δύσκολη έως ανέφικτη από οικονομικής ή τεχνικής πλευράς. Έτσι μετά τις αρχικές μελέτες για το έδαφος και την ευρύτερη περιοχή, πραγματοποιούνται και μελέτες για τα χαρακτηριστικά του αγωγού.

Η κατάλληλη επιλογή των τιμών διάφορων παραμέτρων σε πολλές περιπτώσεις έχει δώσει τη δυνατότητα να μπορεί ο αγωγός να ανταπεξέλθει διατηρώντας την ακεραιότητα του χωρίς να χρειαστεί να αλλάξει διαδρομή. Τονίζεται σε αυτό το σημείο πως οι τιμές που επιλέγονται για τα χαρακτηριστικά του αγωγού πρέπει να είναι ρεαλιστικές. Δηλαδή πρέπει να είναι εφικτό να παρουσιαστούν και στην πράξη τόσο σε οικονομικό όσο και σε τεχνικό επίπεδο.

Σχετικά με τις τιμές και τις παραμέτρους που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, προκύπτει πως το πάχος του τοιχώματος του αγωγού ( $t$ ) είναι μια μεταβλητή που μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη τελική αντοχή του έργου, μιας και με μικρή αύξηση της ο αγωγός φαίνεται να έχει μια αρκετά καλύτερη συμπεριφορά. Η αύξηση αυτή, ακόμη και να είναι της τάξης της μισής ίντσας ( $0,5'' = 1.27\text{cm}$ ) έχει ως αποτέλεσμα ικανοποιητική μείωση στις τιμές μετατοπίσεων και παραμορφώσεων. Η μικρή αύξηση του πάχους είναι μια διαδικασία που οικονομικά δεν είναι αποτρεπτική σε καμία περίπτωση και τεχνικά είναι απολύτως δυνατή. Όσον αφορά το βάθος επίχωσης, ο αγωγός εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά για μικρότερα βάθη. Φυσικά το μικρό βάθος δεν είναι πάντοτε η καλύτερη επιλογή, καθώς ο αγωγός έτσι ενδέχεται να κινδυνέψει από άλλους παράγοντες κυρίως εξωτερικούς όπως βανδαλισμούς, κατολισθήσεις ή απρόβλεπτες καταστροφές. Τέλος, ο συντελεστής απομείωσης τριβής και ο τύπος του χάλυβα φαίνεται να μην επηρεάζουν τόσο το τελικό αποτέλεσμα. Προφανώς είναι τεχνικά δυνατή η αλλαγή του συντελεστή  $k$  καθώς και η χρήση άλλου τύπου χάλυβα. Από οικονομικής σκοπιάς όμως, σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα, οι αλλαγές αυτές δεν συμφέρουν, μιας και η οικονομική επιβάρυνση θα είναι μεγάλη ενώ συγχρόνως η συμπεριφορά του αγωγού αναμένεται να είναι παρόμοια.

Προκύπτει έτσι ότι με την αλλαγή τιμών διάφορων παραμέτρων δύναται η εικόνα του αγωγού να αλλάξει σημαντικά. Ορισμένες από αυτές τις αλλαγές θα είναι αδύνατες, κάποιες άλλες εφικτές, ενώ μεγάλη σημασία θα έχει και το πόσο βελτιώνουν την συμπεριφορά του αγωγού. Φυσικά το κάθε έργο είναι διαφορετικό. Υπάρχουν διαφορετικές εγχώριες νομοθεσίες, θέτονται διαφορετικές προτεραιότητες, ακολουθούνται διαφορετικές μέθοδοι, κ.α. Κοινός παράγοντας θα πρέπει πάντα να είναι η διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής, του περιβάλλοντος και ο περιορισμός των οικονομικών απωλειών – καταστροφών.

### 7.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Η απόκριση μεταλλικών αγωγών υδρογονανθράκων λόγω διασταύρωσης με σεισμικά ρήγματα δεν θα ήταν δυνατό να μελετηθεί πλήρως στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας. Έτσι, παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, οι οποίες αναμένεται να έχουν αρκετό ενδιαφέρον. Θα μπορούσαν μελλοντικά να πραγματοποιηθούν παρόμοιες διαδικασίες και για μεταβολές των χαρακτηριστικών του εδάφους γύρω από τον αγωγό, τα οποία δεν

μεταβλήθηκαν καθόλου, μιας και δόθηκε περισσότερη έμφαση στις παραμέτρους του ίδιου του αγωγού. Για παράδειγμα να ερευνηθεί η απόκριση του αγωγού για εδαφική στρώση μικρότερη, ή και μεγαλύτερη των 20 m, όπως επίσης και για διαφορετικούς εδαφικούς τύπους. Πέρα από την επιλεγμένη άμμο θα μπορούσαν να συλλεχθούν αποτελέσματα για άμμο διαφορετικής σύστασης (π.χ., πιο μαλακή) ή για κάποιο αργιλώδες έδαφος με μη μηδενική συνοχή (c). Επίσης, θα μπορούσε να μελετηθεί η περίπτωση που ο αγωγός καλύπτεται με ελαφροβαρές υλικό επίχωσης, όπως η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS).

Η γωνία κλίσης α επιλέγεται ίση με  $60^{\circ}$  ενώ συγχρόνως υπάρχει η συνθήκη ότι κύριο και δευτερογενές ρήγμα δημιουργούνται ταυτόχρονα και το ένα είναι κάθετο στο άλλο. Μελλοντικά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί έρευνα είτε για διαφορετικές τιμές των γωνιών αυτών, είτε για διαφορετικούς χρόνους διάρρηξης κύριου και δευτερογενούς ρήγματος. Ακόμη υπάρχει η παραδοχή ότι τόσο στο σενάριο της Όδευσης I όσο και σε αυτό της Όδευσης II, ο αγωγός συναντά το εκάστοτε ρήγμα και το τέμνει κάθετα. Θα πρέπει να μελετηθεί η διαφοροποίηση στις κατακόρυφες μετατοπίσεις και στις παραμορφώσεις των σημείων ύστερα από αλλαγές της γωνίας αυτής. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να μελετηθεί ενδελεχώς η περίπτωση κατά την οποία ο αγωγός θα βρίσκεται κοντά στη συμβολή των δύο ρηγμάτων, όπου η κατανομή των εδαφικών μετατοπίσεων και η συνεπακόλουθη καταπόνηση του αγωγού είναι ακόμα πιο σύνθετη. Αξίζει επίσης να διερευνηθεί η επιρροή των φορτίων λειτουργίας (διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας), καθώς και η διασταύρωση αγωγών με δευτερογενή ρήγματα σε υποθαλάσσιες συνθήκες. Όσον αφορά τη διαδικασία προσομοίωσης, θα μπορούσαν να εξεταστούν πιο σύνθετα προσομοιώματα. Για παράδειγμα, να γίνει τριδιάστατη προσομοίωση του αγωγού με στοιχεία κελύφους.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## Βιβλιογραφία

---

### 8.1 Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γαντές, Χ. Μπουκοβάλας, Γ. Κουρετζής, Γ. Λεμονής, Μ. Πνευματικός, Ν. (2005) Αντισεισμικός έλεγχος του αγωγού υψηλής πίεσης Κήποι–Αλεξανδρούπολη– Κομοτηνή σε περιοχές ενεργών ρηγμάτων
- Εξακουστίδου, Γ. (2019). Ανάπτυξη υπολογιστικού και πολυκριτηριακού εργαλείου για τη βελτιστοποίηση της χάραξης χερσαίων αγωγών μεγάλου μήκους που διέρχονται από δυνητικά ασταθή εδαφικά πρηνή. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
- Ζέρβου, Α. (2008). Σεισμική συμπεριφορά αγωγού εκβολής. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Κουκουβέλας, Ι. (1998) Τεκτονική Γεωλογία
- Μαρίνου, Π.–Διαμαντή, Ι. (1989) Κεφάλαια γεωλογίας μηχανικού, εισαγωγή στη τεχνική γεωλογία
- Μουλοπούλου, Α.Δ. (2017). Υπολογιστική προσομοίωση της απόκρισης υποθαλάσσιων αγωγών υδρογονανθράκων υπο πλευρική εδαφική μετατόπιση λόγω κατολισθήσεως. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Παπαγεωργίου Β.Π. (1986). Εφαρμοσμένη Οργανική Χημεία: Άκυκλες ενώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, τμήμα Γεωλογίας
- Παπαζάχος, Β. Παπαζάχου Α. (1999). Οι σεισμοί της Ελλάδας
- Σώκος, Ε. Σεισμοί – Καταγραφή σεισμικότητας στον Ελλαδικό χώρο- Αντιμετώπιση.
- Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Χατζηδάκης, Δ. (2019) Μελέτη της τρωτότητας αγωγών φυσικού αερίου υπό αξονική εδαφική μετατόπιση λόγω κατολισθήσεων
- Χατζηδάκης, Δ. (2021) Σεισμική Τρωτότητα και βέλτιστη αντιμετώπιση της σεισμικής διακινδύνευσης υποθαλάσσιων και παράκτιων ενεργειακών δικτύων. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Trans Adriatic Pipeline AG. (2018), Ο Διαδριατικός Αγωγός Φυσικού Αερίου: Ερωτήσεις και Απαντήσεις σχετικά με το Έργο.

## 8.2 Διεθνής Βιβλιογραφία

- ABAQUS (2011). Abaqus 6.14 – Users' Manual, Simulia, Providence, RI, USA.
- Agalianos, A., de Caudron De Coquereaumont, O., & Anastasopoulos, I. (2020). Rigid slab foundation subjected to strike–slip faulting: Mechanisms and insights.
- Alireza Bahadori PhD, CEng, MChemE, CPEng, MIEAust, RPEQ, in Oil and Gas Pipelines and Piping Systems, 2017
- American Lifelines Alliance – ALA (2001).A. S. (2001). Guidelines for the Design of Buried Pipe. Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Anastasopoulos, I., & Gazetas, G. (2007a). Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake.
- Anastasopoulos, I., & Gazetas, G. (2007b). Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories.
- Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., & El Nahas, A. (2007). Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments.
- Bamford C., and Robinson H., (1978). Geography of Transport. Plymouth: MacDonald and Evans.
- Charis J. Gantes, Vasileios E. Melissianos ( 2016 ) Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture
- Degg, M. (1989). Earthquake Hazard Assessment after Mexico. Disasters.
- DNV-RP-F105, R. P. (2006). Free Spanning Pipelines. Det Norske Veritas.
- DNV-RP-F107, R. P. (2010). Risk Assessment of Pipeline Protection. Det Norske Veritas.
- EGIG, European Gas Pipeline Incident Data Group
- Jalali, H. H., Rofooei, F. R., Attari, N. K. A., & Samadian, M. (2016). Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines.
- Hernán G. Kunert, ... José L. Otegui, in Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry
- Kirk, R. (2004). Encyclopedia of Chemical Technology vol.23. Fourth Edition, Wiley.
- Lawal, M. (2010). Historical development of the pipelines as a mode of transportation. Department of Geography and Planning, Faculty of Social Sciences, Lagos State University, Lagos, Nigeria.
- Liu X., and O'Rourke M. (1997). Behavior of Continuous Pipeline Subject to Transverse PGD. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Beijing.

- Liu, X., Zhang, H., Han, Y., Xia, M., & Zheng, W. (2016). A semi-empirical model for peak strain prediction of buried X80 steel pipelines under compression and bending at strike-slip fault crossings.
- Liu, X., Zhang, H., Li, M., Xia, M., Zheng, W., Wu, K., & Han, Y. (2016). Effects of steel properties on the local buckling response of high strength pipelines subjected to reverse faulting.
- Moniz, E.J. (2011). The Future of Natural Gas: An Interdisciplinary MIT Study
- Nortcliff, S. (1992). Geohazards. Springer, Netherlands.
- O'Rourke, M. J., & Liu, J. X. (2012). Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines
- Phmsa ( Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration
- Randolph, M. F., & Gourvenec, S. (2011). Offshore geotechnical engineering.
- Rofooei, F. R., Attari, N. K. A., & Hojat Jalali, H. (2018). New Method of Modeling the Behavior of Buried Steel Distribution Pipes Subjected to Reverse Faulting
- Rokonzaman, M., Nahas, A. E., & Sakai, T. (2015). Experimental validation of a numerical model for the interaction of dip-slip normal fault ruptures, sand deposits, and raft foundations
- TAP, (Trans-Adriatic Pipeline), (2013). Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) Albania: Section 4 – Project Description. Tirana, Albania.
- Tsatsis, A., Loli, M., & Gazetas, G. (2019). Pipeline in dense sand subjected to tectonic deformation from normal or reverse faulting.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.
- Zakeri, A. (2007). A literature review on debris flow impact on structures. ICG report 2007-6-1, International Centre for Geohazards, Oslo, Norway.

### 8.3 Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- IGI-Poseidon.com ( 2016 ), Eastmed-A direct link to new sources for Europe [www.gusgas.gr](http://www.gusgas.gr) The Geological Society
- <https://www.geolsoc.org.uk/>)
- <https://www.iploca.com>
- <https://zenith.gr/el/>
- <https://www.desfa.gr/>
- <https://www.tap-ag.gr/>
- <https://www.tap-ag.gr/>

- <https://www.sgc.az/en/project/scp>
- <https://www.oryktosploutos.net/>
- [www.epathessaloniki.gr/to-fysiko-aerio-sthn-ellada/](http://www.epathessaloniki.gr/to-fysiko-aerio-sthn-ellada/)