



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΧΕΡΣΑΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ ΠΩΠΟΤΑ

ΧΑΝΙΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2025



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΧΕΡΣΑΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ ΠΩΠΟΤΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Ιωάννης Τσομπανάκης (Επιβλέπων), Π.Κ.

Καθηγητής Κωνσταντίνος Προβιδάκης, Π.Κ.

Δρ. Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, Ε.Μ.Π.

Η παρούσα διπλωματική εργασία συντάχθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εργασία αυτή αποτελεί το επιστέγασμα των γνώσεων και των δεξιοτήτων που απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και της έρευνας που πραγματοποίησα στον τομέα της μεταφοράς υδρογόνου μέσω χερσαίων αγωγών, με έμφαση στη διακινδύνευση τέτοιων δικτύων εξαιτίας της σεισμικής δραστηριότητας.

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος δεν ήταν τυχαία. Η ενεργειακή μετάβαση προς πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας και η ανάγκη για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν σημαντικές προκλήσεις της εποχής μας. Το υδρογόνο αναδύεται ως ένας από τους πιο ελπιδοφόρους ενεργειακούς φορείς, με τη δυνατότητα να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο σε αυτό το νέο ενεργειακό τοπίο. Ωστόσο, η ασφαλής και αποδοτική μεταφορά του υδρογόνου από τα σημεία παραγωγής στις περιοχές κατανάλωσης απαιτεί την αντιμετώπιση σημαντικών τεχνικών και γεωπεριβαλλοντικών προκλήσεων, με κυρίαρχη την επίδραση των σεισμικών γεωκινδύνων με έμφαση στη διάσχιση περιοχών ενεργών ρηγμάτων.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές και τους συμβούλους μου, οι οποίοι με καθοδήγησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές του καθώς και τον κ. Νικόλαο Μακράκη που βρέθηκε δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, για την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Ελπίζω ότι η εργασία αυτή θα συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση και επίλυση των προκλήσεων που συνδέονται με τη μεταφορά υδρογόνου και θα αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για όσους ενδιαφέρονται να ασχοληθούν με το συγκεκριμένο αντικείμενο στο μέλλον.

Η μετάβαση σε «πράσινες» πηγές ενέργειας αποτελεί ένα κομβικό ζήτημα για ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον μέλλον. Με την ευρεία αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την ανάπτυξη τεχνολογιών ενεργειακής αποδοτικότητας και την εφαρμογή «πράσινων» πολιτικών, η ανθρωπότητα κινείται προς ένα πλαίσιο όπου η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας θα συμβαδίζουν με τους πόρους του πλανήτη. Αυτή η μετάβαση δεν αφορά μόνο την αντικατάσταση των πηγών ενέργειας, αλλά και τη δημιουργία μίας ολοκληρωμένης και βιώσιμης ενεργειακής υποδομής που θα υποστηρίξει μία πιο «πράσινη» οικονομία. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αφενός προστατεύεται το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, αφετέρου ενισχύεται η καινοτομία και η αειφορία. Σε αυτό το πλαίσιο, το υδρογόνο θεωρείται το πλέον καθαρό καύσιμο του μέλλοντος και η χρήση του είναι η κατάλληλη επιλογή για την επίτευξη του στόχου της ενεργειακής μετάβασης. Οι νέες τεχνολογίες βοηθούν στην ενεργειακή ανεξαρτησία και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της υδρογονοκίνησης.

Η μεταφορά μίγματος φυσικού αερίου και υδρογόνου, ή ακόμα και αποκλειστικά υδρογόνου, μέσω αγωγών αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της «πράσινης» ενέργειας. Γενικά, η ενσωμάτωση του υδρογόνου στην οικονομία αποτελεί σημαντική πρόκληση, καθώς υπάρχουν διάφορα τεχνικά θέματα και κίνδυνοι που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ένα καίριο ζήτημα είναι η ασφαλής μεταφορά από τα σημεία παραγωγής και αποθήκευσης προς τις περιοχές κατανάλωσης. Η ανάπτυξη του κατάλληλου συστήματος μεταφοράς είναι μια βασική παράμετρος κι αυτό έχει ήδη ξεκινήσει να γίνεται και προβλέπεται να επεκταθεί περαιτέρω στο άμεσο μέλλον αξιοποιώντας τα υφιστάμενα δίκτυα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων.

Βέβαια, οι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων εκτείνονται σε μεγάλα μήκη και πολύ συχνά έρχονται αντιμέτωποι με τους σεισμικούς και άλλους γεωκινδύνους των περιοχών που διασχίζουν. Τα ενεργά σεισμικά ρήγματα αποτελούν μια σημαντική απειλή για τη μεταφορά του πετρελαίου και του φυσικού αερίου επί του παρόντος και του υδρογόνου στο κοντινό μέλλον. Πολλά περιστατικά βλαβών αγωγών συνδέονται με τη διάρρηξη σεισμικών ρηγμάτων. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντική η κατανόηση των χαρακτηριστικών της κινηματικής καταπόνησης των αγωγών λόγω σεισμικών ρηγμάτων για την ελαχιστοποίηση της σεισμικής διακινδύνευσής τους. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας μετατροπής των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου σε σύστημα μεταφοράς μίγματος φυσικού αερίου -

υδρογόνου ή και αποκλειστικά υδρογόνου, ενώ έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της απόκρισης τέτοιων αγωγών σε συνθήκες διάρρηξης ενεργού σεισμικού ρήγματος.

ABSTRACT

The transition to «green» energy resources constitutes a major issue to a more sustainable and environment-friendly future. With the widespread use of renewable energy sources, the development of energy-efficient technologies, and the implementation of «green» policies, humanity is moving towards a framework where energy production and consumption will comply with planet's resources. This transition does not only refer to the replacement of energy resources, but also the construction of an efficient energy infrastructure which will support a more «green» economy. In this manner, on the one hand, the natural and human-made environment is protected, while on the other hand, innovation and sustainability are encouraged. In this context, hydrogen is considered the purest fuel of the future and its use is the most suitable choice for a successful energy transition. New technologies, assist in achieving energy independence and reducing carbon dioxide emissions, while they also play a crucial part in promoting hydrogen as main fuel in transportations.

The transfer of natural gas and hydrogen mixture, or even solely hydrogen, through pipelines constitutes an important step towards «green» energy. Generally, the adoption of hydrogen in the economy, represents a significant challenge, since there are many technical issues and hazards that must be resolved. An important issue is the safe transfer from the production and storage sites to urban areas. The development of the appropriate transportation system is a key parameter, and has already started and is expected to be further developed in the near future, by utilizing the existing networks of natural gas pipelines.

Such large-scale pipelines cover long distances and very often face seismic and other geohazards. Active seismic faults constitute a major threat in the transfer of hydrocarbons, and hydrogen in the shortcoming. Many incidents of severe pipeline damages occurred due to the rupture of seismic faults. Consequently, it is of paramount importance to understand the characteristics of the kinematic stress of pipelines due to seismic faulting to minimize their seismic vulnerability. The aim of the present study is to investigate the conversion of natural gas transmission pipelines to transfer a mixture of natural gas and hydrogen, or even exclusively hydrogen. Emphasis is given on examining the response of such pipelines under active seismic fault rupture.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	v
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	- 1 -
Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	- 4 -
2.1 Υδρογόνο	- 4 -
2.1.1 Φυσικές και χημικές ιδιότητες υδρογόνου.....	- 5 -
2.1.2 Βασικές Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου	- 6 -
2.1.3 Το υδρογόνο ως εναλλακτικό καύσιμο.....	- 7 -
2.1.4 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου.....	- 9 -
2.2 Αγωγοί Υδρογόνου	- 10 -
2.2.1 Αγωγοί με μείγμα φυσικού αερίου – υδρογόνου.....	- 12 -
2.2.2 Αγωγοί υδρογόνου	- 13 -
2.2.3 Ψαθυροποίηση αγωγών χάλυβα λόγω του υδρογόνου	- 15 -
2.2.3.1 Μηχανισμός ψαθυροποίησης υλικού λόγω υδρογόνου	- 16 -
2.2.3.2 Πρόληψη ψαθυροποίησης αγωγών λόγω του υδρογόνου..	- 18 -
2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου	- 19 -
2.3 Αγωγοί Υδρογόνου στον παγκόσμιο χάρτη	- 20 -
2.4 Σεισμικοί γεωκίνδυνοι	- 23 -
2.4.1 Είδη γεωκινδύνων	- 24 -
2.4.1.1 Ρήγματα	- 25 -
2.4.1.2 Κατολισθήσεις.....	- 29 -
2.4.1.3 Ρευστοποίηση εδάφους	- 30 -
2.4.2 Παραδείγματα αστοχιών σε αγωγούς υδρογόνου	- 32 -
2.2. Κανονιστικά πλαίσια σε αγωγούς υδρογόνου.....	- 37 -
Κεφάλαιο 3 - Κανονισμοί αγωγών υδρογόνου	- 39 -

3.1	Κανονισμός ASME	- 39 -
3.1.1	Ποσοστό ανάμειξης υδρογόνου με το φυσικό αέριο	- 39 -
3.1.2	Εσωτερική πίεση αγωγού	- 39 -
3.1.3	Ποιότητα χάλυβα αγωγού	- 40 -
3.1.4	Αντοχή και ολκιμότητα αγωγού	- 41 -
3.1.5	Επικάλυψη αγωγού	- 41 -
3.1.6	Συγκολλήσεις	- 42 -
3.1.7	Έλεγχος διαρροών - Συστήματα ασφαλείας και έλεγχοι πίεσης	- 42 -
3.2	Κανονισμός ALA.....	- 43 -
3.2.1	Αξονικά εδαφικά ελατήρια	- 44 -
3.2.2	Πλευρικά εδαφικά ελατήρια	- 45 -
3.2.3	Κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα άνω.....	- 46 -
3.2.4	Κατακόρυφα προς τα κάτω εδαφικά ελατήρια	- 47 -
Κεφάλαιο 4 – Κινηματική καταπόνηση αγωγών μεταφοράς υδρογόνου λόγω σεισμικών ρηγμάτων		- 48 -
4.1	Εισαγωγή.....	- 48 -
4.2	Περιγραφή μεθοδολογίας	- 48 -
4.2.1	Περιγραφή του προβλήματος	- 48 -
4.2.2	Αριθμητικό Προσομοίωμα Αγωγού	- 49 -
4.3	Παραμετρική διερεύνηση	- 51 -
4.3.1	Επίδραση γωνίας εσωτερικής τριβής εδάφους.....	- 52 -
4.3.2	Επίδραση γωνίας διάρρηξης ρήγματος	- 54 -
4.3.3	Επίδραση επικάλυψης αγωγού	- 56 -
4.3.4	Επίδραση ποιότητας χάλυβα	- 58 -
4.3.5	Επίδραση εσωτερικής πίεσης αγωγού	- 59 -
4.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	- 61 -
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα / Μελλοντικές προεκτάσεις		- 66 -
Βιβλιογραφία.....		- 69 -

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα από τη χρήση του υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου.	- 19 -
Πίνακας 3.1: Ελάχιστη τάση διαρροής για χαλύβδινους αγωγούς	- 41 -
Πίνακας 3.2: Συντελεστής απόδοσης υλικού αγωγού Hf.	- 41 -
Πίνακας 3.3: Τιμές συντελεστή τριβής για διάφορα είδη επικάλυψης.	- 45 -
Πίνακας 4.1: Υπολογισμός δυνάμεων και μετατοπίσεων εδαφικών ελατηρίων ανά σενάριο μοντελοποίησης.....	- 51 -
Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες του εδάφους.	- 52 -
Εικόνα 2.1: Κυκλική οικονομία υδρογόνου, (Kish, 2022).	- 7 -
Εικόνα 2.2: Ρωγμή αγωγού λόγω ψαθυροποίησης, (Demaco Cryogenics, 2021).	- 16 -
Εικόνα 2.3: Προσρόφηση ατομικού υδρογόνου στο μέταλλο, (H2Tools, 2024). ...	- 16 -
Εικόνα 2.5: Διάχυση υδρογόνου στο μέταλλο και δημιουργία ρωγμής, (H2Tools, 2024).	- 17 -
Εικόνα 2.4: Ψαθυροποίηση χάλυβα, (H2Tools, 2024).	- 17 -
Εικόνα 2.6: Προβλεπόμενο δίκτυο αγωγών υδρογόνου στην Ευρώπη μέχρι το 2030, (S&P Global Commodity Insights, 2024).	- 22 -
Εικόνα 2.7: Αναπτυσσόμενο δίκτυο υδρογόνου στην Ευρώπη, (Onyango, D., 2024).	- 23 -
Εικόνα 2.8: Τύποι Σεισμικών Ρηγμάτων, (Philippine Institute of Volcanology and Seismology, 2024).	- 26 -
Εικόνα 2.9: Τυπικές παραμορφώσεις αγωγών στους τρεις τύπους ρηγμάτων (α) ανάστροφο (β) κανονικό (γ) πλάγιας ολίσθησης, (Akram et. al., 2020).	- 27 -
Εικόνα 2.10: Επίδραση εδάφους σε αγωγούς λόγω διαφορετικών κατευθύνσεων της σχετικής κίνησης, (ASCE ,1984); (PRCI 2004, 2009).	- 28 -
Εικόνα 2.11: Σχηματική απεικόνιση της γραμμής του ρήγματος και του άξονα του αγωγού που διασταυρώνεται, με αποτέλεσμα: α) εφελκυστική τάση και β) θλιπτική τάση, (Kaya, 2024).	- 28 -
Εικόνα 2.12: Κατολισθήσεις που προέρχονται από σεισμική δραστηριότητα στον παγκόσμιο χάρτη, (Li, McGuire, & Erpess, 2018).	- 30 -
Εικόνα 2.13: Κατάρρευση κτιρίου λόγω ρευστοποίησης του εδάφους, (Southwest Research Institute, 2018).	- 31 -
Εικόνα 2.14: Ανύψωση χερσαίου αγωγού λόγω ρευστοποίησης του εδάφους μετά από σεισμό, (Castiglia, Santucci de Magistris, and Koseki, 2019).	- 32 -

Εικόνα 2.15: Κύριοι μηχανισμοί αστοχίας σε θαμμένους συνεχείς χαλύβδινους αγωγούς (λυγισμός τύπου κελύφους λόγω ομοιόμορφης αξονικής συμπίεσης πάνω και καθαρής κάμψης κάτω (β) λυγισμός τύπου δοκού (γ) θραύση λόγω εφελκυσμού και (δ) ωοειδής παραμόρφωση διατομής. (Psyrras and Sextos ,2018).	- 33 -
Εικόνα 2.16: Αστοχίες αγωγών μετά από σεισμό, (Raveshi and Noorzad (2023).	- 35 -
Εικόνα 2.17: Παραμόρφωση εδάφους - Σεισμός chi-chi Ταιβάν, (Tectonics Observatory (2024)	- 35 -
Εικόνα 2.18: Αγωγοί φυσικού αερίου μετά από διασταύρωση με ρήγμα μετά από τον σεισμό στην Τουρκία το 2023, (Uckan, Aksel, Atas, Toprak, and Kaya, 2024).- -	36
Εικόνα 2.19 Αστοχία αγωγών λόγω ρευστοποίησης του εδάφους στο Γκιούλμπασι, (Uckan, Aksel, Atas, Toprak, and Kaya, 2024).	- 36 -
Εικόνα 3.1: Αναπαράσταση εδαφικών ελατηρίων στον αγωγό.	- 43 -
Εικόνα 3.2: Διγραμμικά ελατήρια εδάφους που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της αξονικής δύναμης του εδάφους στον αγωγό.	- 44 -
Εικόνα 3.3: Διγραμμικά ελατήρια εδάφους που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της κατακόρυφης δύναμης του εδάφους στον αγωγό.....	- 46 -
Εικόνα 4.1: PSI Στοιχεία & PIPE Στοιχεία στον αγωγό.	- 50 -
Εικόνα 4.2: Προσομοίωση αγωγού στο ABAQUS σε διασταύρωση (α) με κανονικό ρήγμα (β) με ανάστροφο ρήγμα.	- 50 -
Σχήμα 4.1: Επίδραση της τιμής της γωνίας φ για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.....	- 53 -
Σχήμα 4.2: Επίδραση της τιμής της γωνίας φ για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.....	- 54 -
Σχήμα 4.3: Επίδραση της τιμής της γωνίας β για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.....	- 55 -
Σχήμα 4.4: Επίδραση της τιμής της γωνίας β για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.....	- 55 -
Σχήμα 4.5: Επίδραση της τιμής του συντελεστή επικάλυψης f για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.	- 57 -

Σχήμα 4.6 Επίδραση της τιμής του συντελεστή επικάλυψης f για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης..... - 57 -

Σχήμα 4.7: Επίδραση της ποιότητας του χάλυβα για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης..... - 59 -

Σχήμα 4.8 Επίδραση της ποιότητας του χάλυβα για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης..... - 59 -

Σχήμα 4.9: Επίδραση της εσωτερικής πίεσης για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης..... - 61 -

Σχήμα 4.10: Επίδραση της εσωτερικής πίεσης για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης..... - 61 -

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της επίδρασης των σεισμικών ρηγμάτων σε χερσαίους αγωγούς που μεταφέρουν μίγμα φυσικού αερίου και υδρογόνου ή και αποκλειστικά υδρογόνου.

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας του υδρογόνου έχει ήδη αρχίσει να αναπτύσσεται ως μέρος της προσπάθειας μετάβασης στην κλιματική ουδετερότητα και την απαλλαγή από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, καθώς το υδρογόνο θεωρείται από τους πλέον καθαρούς ενεργειακούς φορείς με μοναδικό υποπροϊόν την παραγωγή νερού κατά την καύση του. Η ενσωμάτωση του υδρογόνου ως καθαρό ενεργειακό φορέα στο υπάρχον δίκτυο, αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προς την κατεύθυνση της «πράσινης ενέργειας». Ωστόσο, δεν παύει να αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία η οποία χρειάζεται εκτενή μελέτη προτού υλοποιηθεί.

Η μελέτη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, λόγω του ότι, η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών είτε υφιστάμενων είτε νέων, εγκυμονεί διάφορους τεχνικούς κινδύνους, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα και η αξιοπιστία των αγωγών που μεταφέρουν υδρογόνο είναι απαραίτητο να τηρούνται οι σχετικές κανονιστικές οδηγίες δεδομένου ότι το υδρογόνο έχει συγκεκριμένες φυσικές και χημικές ιδιότητες που επηρεάζουν την ακεραιότητα των αγωγών, ιδιαίτερα υπό συνθήκες καταπόνησης από γεωλογικά φαινόμενα όπως σεισμικά ρήγματα.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση των τεχνικών προκλήσεων που συνδέονται με τη μεταφορά υδρογόνου μέσω χερσαίων αγωγών σε σειсмоγενείς περιοχές και η αξιολόγηση των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν τα ενεργά σεισμικά ρήγματα στην ακεραιότητα των αγωγών αυτών. Τα ενεργά σεισμικά ρήγματα αποτελούν σημαντικό γεωκίνδυνο για τους αγωγούς, ενώ μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις και καταστροφές που θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα των αγωγών και του περιβάλλοντος. Μάλιστα, ακόμα σημαντική παράμετρος είναι και η δυνατότητα ανάμειξης του φυσικού αερίου με το υδρογόνο, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων τους, γεγονός που επιβάλλει διαφορετικές απαιτήσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή των αγωγών.

Η μελέτη εστιάζει ιδιαίτερα στη δυνατότητα μετατροπής των υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου σε αγωγούς που μπορούν να μεταφέρουν είτε μίγμα φυσικού

αερίου και υδρογόνου είτε αποκλειστικά υδρογόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αντοχή τους υπό συνθήκες σεισμικής δραστηριότητας. Η διερεύνηση της δυνατότητας αυτής παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον για τη βιομηχανία ενέργειας παρέχοντας μια οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για την αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών. Οι προτάσεις που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη αποσκοπούν στη βελτίωση της ασφάλειας και της αντοχής των αγωγών, συμβάλλοντας έτσι στη δημιουργία μιας βιώσιμης και αξιόπιστης υποδομής μεταφοράς υδρογόνου.

Η κεντρική ιδέα της έρευνας είναι να προσδιορίσει τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των αγωγών σε σεισμογενείς περιοχές με έμφαση στα ενεργά σεισμικά ρήγματα και να διερευνήσει παραμετρικά κάθε πιθανό σενάριο επίδρασης του αγωγού με τη βοήθεια του λογισμικού ABAQUS. Για την υλοποίηση της εργασίας προηγήθηκε μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις τεχνολογίες μεταφοράς υδρογόνου, τις μεθόδους ενίσχυσης των αγωγών, τα χαρακτηριστικά και της μηχανικές ιδιότητες των αγωγών αλλά και τις επιπτώσεις των διάφορων σεισμικών ρηγμάτων σε υποδομές μεταφοράς ενέργειας. Η ανάλυση βασίζεται σε προσομοιώσεις με τη χρήση του λογισμικού ABAQUS, που επιτρέπει την προσομοίωση της συμπεριφοράς των αγωγών υπό καταπόνηση σεισμικών ρηγμάτων.

Η εργασία είναι δομημένη σε πέντε κεφάλαια, ξεκινώντας από το 1^ο Κεφάλαιο στο οποίο, περιγράφεται το πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και η ανάγκη για ασφαλή μεταφορά υδρογόνου ως εναλλακτικού φορέα ενέργειας. Ιδιαίτερη έμφαση, δίνεται, στους στόχους της εργασίας που περιλαμβάνουν τη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή των αγωγών υπό σεισμική δραστηριότητα και τη δυνατότητα διαμόρφωσης των υφιστάμενων υποδομών για τη μεταφορά υδρογόνου. Το κεφάλαιο κλείνει με τη δομή της εργασίας και μια σύντομη αναφορά στα επιμέρους κεφάλαια.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση. Σε αυτό παρουσιάζονται οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του υδρογόνου, οι μέθοδοι παραγωγής και αποθήκευσης του υδρογόνου αλλά και των διαφόρων υφιστάμενων αγωγών υδρογονανθράκων, με έμφαση σε αυτούς που μεταφέρουν υδρογόνο ενώ αναλύονται και κάποια παραδείγματα αστοχιών σε δίκτυο αγωγών μεταφοράς υδρογόνου. Επιπλέον εξετάζονται τα διάφορα είδη των σεισμικών γεωκινδύνων που ενδεχομένως να επηρεάζουν τη μεταφορά του υδρογόνου μέσω των αγωγών.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των ρυθμιστικών πλαισίων που διέπουν την κατασκευή και λειτουργία αγωγών υδρογόνου. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι κανονισμοί που έχει θεσπίσει ο Αμερικάνικος Οργανισμός Μηχανικών (ASME) και ο κανονισμός ALA για τα εδαφικά ελατήρια, οι οποίοι καθορίζουν τις τεχνικές προδιαγραφές για την επιλογή υλικών, τη συντήρηση των αγωγών και τις

διαδικασίες ασφαλείας. Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας των αγωγών και την προστασία τόσο των ανθρώπων όσο και του περιβάλλοντος.

Το 4ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη της κινηματικής καταπόνησης των αγωγών υδρογόνου υπό την επίδραση σεισμικών γεωκινδύνων. Εξετάζονται παράμετροι όπως η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, η γωνία διάρρηξης του ρήγματος, ο συντελεστής επικάλυψης του αγωγού, η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται στους αγωγούς και η εσωτερική πίεση. Αυτές οι παράμετροι προσομοιώνονται με τη βοήθεια λογισμικών ανάλυσης, όπως το ABAQUS, για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των αγωγών σε πραγματικά σενάρια σεισμικής δραστηριότητας και στη συνέχεια αναλύονται τα βασικά ευρήματα σχετικά με την αντοχή των αγωγών. Η ανάλυση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της αντοχής και της ασφάλειας των αγωγών υδρογόνου σε περιοχές με υψηλό σεισμικό κίνδυνο.

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της μελέτης και παρουσιάζει προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Στη συνέχεια, προτείνονται στρατηγικές για την ενίσχυση των αγωγών σε σεισμογενείς περιοχές. Τέλος, γίνεται αναφορά στις μελλοντικές προοπτικές για τη μεταφορά υδρογόνου και τις τεχνολογίες που θα μπορούσαν να αναπτυχθούν για την περαιτέρω βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των υποδομών αυτών.

Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Υδρογόνο

Η σημασία του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα για τη μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό σύστημα αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο. Για την παραγωγή του μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυάριθμες πηγές ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, όπως η βιομάζα, το φυσικό αέριο με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS) και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Tian & Pei, 2023). Το υδρογόνο, ως καθαρό καύσιμο, έχει τη δυνατότητα να μειώσει δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από διάφορες πηγές, όπως οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η θέρμανση και οι μεταφορές. Πιστεύεται ότι η ενσωμάτωση του υδρογόνου στην ήδη υπάρχουσα υποδομή φυσικού αερίου θα συμβάλει θετικά στην προώθηση της ευρείας χρήσης του, μειώνοντας παράλληλα την ανάγκη κατασκευής νέων αγωγών.

Τα διαφορετικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου και του υδρογόνου δημιουργούν ιδιαίτερες δυσκολίες κατά τον συνδυασμό των δύο αερίων. Σε σύγκριση με το φυσικό αέριο, το υδρογόνο διαχέεται ευκολότερα και έχει χαμηλότερη πυκνότητα, γεγονός που εγείρει ζητήματα ασφάλειας, όπως υψηλότερα ποσοστά διαρροής και μεταβαλλόμενες ιδιότητες καύσης (Riis et. al., 2006). Έρευνες δείχνουν ότι η ακεραιότητα των υλικών των αγωγών, ιδίως του χάλυβα, μπορεί να επηρεαστεί ακόμη και από ελάχιστες ποσότητες υδρογόνου που αναμειγνύονται με το φυσικό αέριο, με αποτέλεσμα φαινόμενα όπως η ψαθυροποίηση από υδρογόνο. Η δομική ακεραιότητα των αγωγών διακυβεύεται από αυτή την κατάσταση, αυξάνοντας την πιθανότητα αστοχιών υπό λειτουργική καταπόνηση (Mahajan et al., 2022).

Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές αναλογίες ανάμειξης επηρεάζουν τις λειτουργίες και την ασφάλεια των αγωγών έχει βρεθεί στο επίκεντρο της έρευνας. Για παράδειγμα, έχει γίνει μεγάλη έρευνα για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της ανάμειξης υδρογόνου σε συγκεντρώσεις 20% έως 50% στα υλικά των αγωγών και στα συστήματα ανίχνευσης διαρροών. Έχει προταθεί η δημιουργία ειδικών κανονισμών για την ορθή αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων και τη διασφάλιση της ασφαλούς μεταφοράς του φυσικού αερίου που αναμειγνύεται με υδρογόνο.

Η μεταφορά υδρογόνου μέσω των σημερινών αγωγών φυσικού αερίου έχει σοβαρές συνέπειες για την ασφάλεια. Λόγω της πιθανότητας διαρροών και εκρήξεων, απαιτούνται αυστηρές αξιολογήσεις ασφαλείας και η δημιουργία νέων κανονισμών ειδικά για τη μεταφορά υδρογόνου (Gallon, 2021). Ιδιαίτερη σημασία έχει η ενσωμάτωση συστημάτων παρακολούθησης αιχμής για τον γρήγορο εντοπισμό

διαρροών και τη μείωση των κινδύνων που σχετίζονται με τη συσσώρευση υδρογόνου σε χώρους.

Επιπλέον, οι διαδικασίες τακτικής συντήρησης και επιθεώρησης πρέπει να βελτιωθούν προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των αγωγών, που μεταφέρουν φυσικό αέριο αναμεμειγμένο με υδρογόνο. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση του πόσο καλά προσαρμοσμένα είναι τα διάφορα υλικά κατασκευής αγωγών σε συνθήκες υψηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο. Είναι σημαντικό, να θεσπιστούν ισχυροί έλεγχοι ασφαλείας για την αποφυγή καταστροφικών δυσλειτουργιών που μπορεί να προκύψουν από τις ιδιαίτερες δυσκολίες που παρουσιάζει το υδρογόνο.

2.1.1 Φυσικές και χημικές ιδιότητες υδρογόνου

Με ατομικό βάρος 1,00782519 στην κλίμακα 12 C και ατομικό αριθμό 1, το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο και βασικότερο στοιχείο στο χημικό σύμπαν. Υπό τυπικές συνθήκες, το υδρογόνο υπάρχει ως διατομικό αέριο H_2 και διακρίνεται από τα άλλα στοιχεία από μια σειρά σημαντικών φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών (Center for Hydrogen Safety, 2023).

Το υδρογόνο είναι ένα άγευστο, άοσμο και άχρωμο αέριο από φυσική άποψη. Με περίπου 14 φορές το βάρος του αέρα, είναι το ελαφρύτερο μόριο στο σύμπαν. Με θερμοκρασία βρασμού $-252,88^{\circ}C$ και εξαιρετικά χαμηλό σημείο τήξης $-259,35^{\circ}C$, το υδρογόνο είναι αέριο υπό κανονικές συνθήκες. Επιπλέον, η τάση του να ανεβαίνει γρήγορα στην ατμόσφαιρα επηρεάζεται από την εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητά του, 0,08988 g/L στους $0^{\circ}C$ και 1 atm. Σε $0^{\circ}C$ και 1 atm, μόνο 0,0214 cm³ υδρογόνου διαλύονται ανά γραμμάριο νερού, γεγονός που υποδηλώνει την πολύ περιορισμένη διαλυτότητά του στο νερό (Jolly, 2024).

Από χημική άποψη, το υδρογόνο έχει ευρύ φάσμα εκρηκτικότητας 4-76% στον αέρα, καθιστώντας το εξαιρετικά εύφλεκτο και καύσιμο (Center for Hydrogen Safety, 2024). Μπορεί να αναφλεγεί αυθόρμητα υπό ορισμένες συνθήκες, όπως δείχνει το εύρος θερμοκρασίας αυτανάφλεξης $500-571^{\circ}C$. Ο δεσμός υδρογόνου έχει ενέργεια διάσπασης δεσμού 435,99 kJ/mol, καθιστώντας τον απίστευτα σταθερό. Το υδρογόνο συνδυάζεται εύκολα με ένα ευρύ φάσμα στοιχείων για τη δημιουργία ενώσεων-συνηθέστερα αναμιγνύεται με το οξυγόνο για τη δημιουργία νερού. Μπορεί να αντιδράσει με οξειδωτικά μέσα για να προωθήσει ποικίλες χημικές διεργασίες, επειδή λειτουργεί ως αναγωγικό μέσο (Tian & Pei, 2023).

Το υδρογόνο έχει ορισμένες ιδιότητες που το καθιστούν επιθυμητό φορέα ενέργειας για μια ποικιλία εφαρμογών, όπως η υψηλή περιεκτικότητα σε ενέργεια, η χαμηλή πυκνότητα και η καυσιμότητα του (Libretexts, 2024). Ωστόσο, η χαμηλή

ενέργεια ανάφλεξης και το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητάς του απαιτούν προσεκτικό χειρισμό και διαδικασίες αποθήκευσης και μεταφοράς για την αποφυγή πιθανών εκρήξεων. Επειδή το υδρογόνο και το μεθάνιο έχουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες, η ανάμειξη υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου μπορεί να αλλάξει τον τρόπο καύσης του φυσικού αερίου και να δημιουργήσει κινδύνους για την ασφάλεια.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η ιδιότητα του υδρογόνου να προκαλεί ψαθυροποίηση στα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή. Ο όρος ψαθυροποίηση ή αλλιώς ευθραυστότητα από υδρογόνο αναφέρεται στην απώλεια ολκιμότητάς και αντοχής του χάλυβα, καθώς το υδρογόνο διαχέεται σε αυτόν. Ουσιαστικά το υδρογόνο διαλύεται σε ανθρακούχους και χαμηλού κράματος χάλυβες, ενώ είναι πιθανό να προκαλέσει ρωγμές στο υλικό ή και θραύση. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συνήθως σε θερμοκρασίες μικρότερες των 95°C, με το υδρογόνο να παραμένει διαλυμένο στον χάλυβα (ASME, 2008).

2.1.2 Βασικές Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη δημιουργία υδρογόνου, αλλά οι πιο δημοφιλείς περιλαμβάνουν την ηλεκτρόλυση του νερού, τη μερική οξείδωση και την αναμόρφωση με ατμό. Η αξιοποίηση της αναμόρφωσης με ατμό, δηλαδή η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR), είναι η πλέον καθιερωμένη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου. Προκειμένου να παραχθεί υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα, πρέπει να αντιδράσει, ατμός υψηλής θερμοκρασίας και μεθάνιο φυσικού αερίου, παρουσία καταλύτη (Alternative Fuels Data Center, 2023). Το μονοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται στη συνέχεια σε περισσότερο υδρογόνο χρησιμοποιώντας τη διαδικασία μετατόπισης νερού-αερίου. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί με τη μερική οξείδωση υδρογονανθράκων. Αυτό συνεπάγεται τη μερική καύση καυσίμων όπως ο άνθρακας, το ντίζελ ή το φυσικό αέριο για την παραγωγή αερίου σύνθεσης, το οποίο αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Για άλλη μια φορά, η διαδικασία μετατόπισης νερού-αερίου χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της παραγωγής υδρογόνου (El-Shafie et al., 2019).

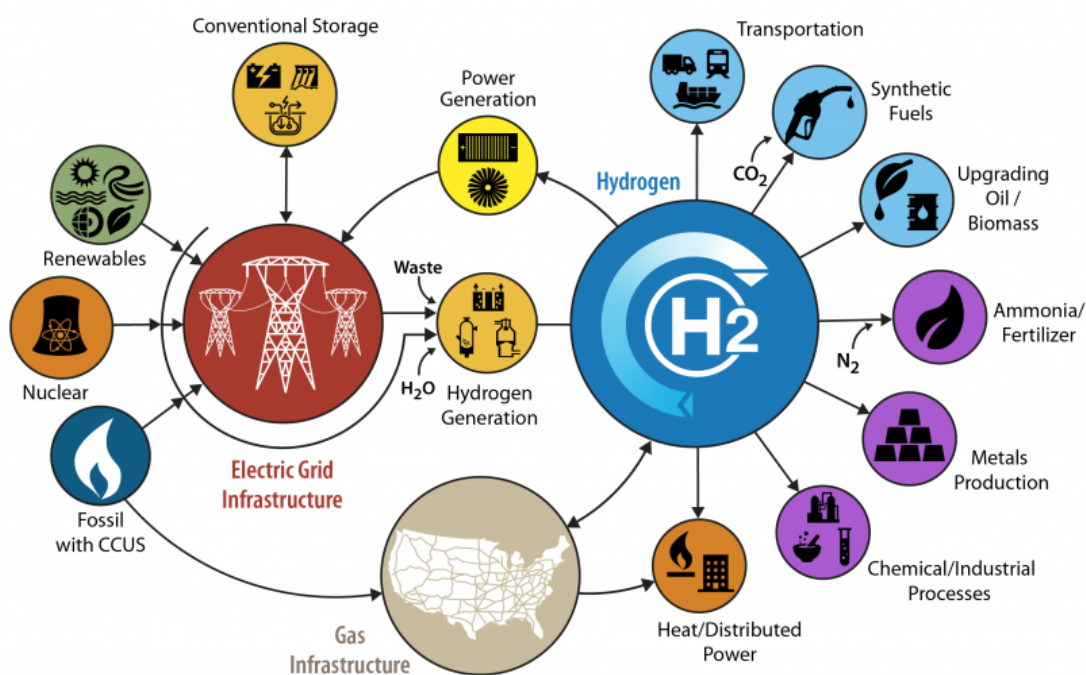
Η ηλεκτρόλυση του νερού είναι μια εννοιολογικά απλή διαδικασία που διαχωρίζει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια. Σε αλκαλικά διαλύματα, οι εμπορικοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούν συνήθως καταλύτες με βάση το νικέλιο. Η ηλεκτρόλυση είναι μια καθαρή τεχνική παραγωγής υδρογόνου, καθώς μπορεί να λειτουργήσει με ανανεώσιμη ενέργεια (Martino et al., 2021). Άλλες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν την πυρόλυση μεθανίου, η οποία μετατρέπει το φυσικό αέριο σε υδρογόνο και στερεό άνθρακα, και τη θερμοχημική διάσπαση νερού, η οποία διασπά το νερό χρησιμοποιώντας θερμότητα και χημικές αντιδράσεις.

Μελετάται επίσης η παραγωγή υδρογόνου μέσω βιολογικών διεργασιών, όπως η ζύμωση και η φωτοσύνθεση από μικροοργανισμούς (Fastech, 2024).

Η διαθεσιμότητα των πόρων, η ενεργειακή απόδοση και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι μερικά από τα στοιχεία που επηρεάζουν την επιλογή της τεχνολογίας παραγωγής υδρογόνου. Οι πιο οικονομικές διεργασίες αυτή τη στιγμή είναι η αναμόρφωση με ατμό και η μερική οξείδωση, αλλά παράγουν επίσης μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η ηλεκτρόλυση νερού και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από την άλλη πλευρά, παράγουν καθαρό υδρογόνο, αλλά είναι πιο δαπανηρές.

2.1.3 Το υδρογόνο ως εναλλακτικό καύσιμο

Η χρήση του υδρογόνου ως υποκατάστατου καυσίμου γίνεται όλο και πιο συνηθισμένη, ιδίως υπό το πρίσμα της παγκόσμιας στροφής προς πιο πράσινες πηγές ενέργειας. Λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του -όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η ικανότητά του να παράγει ενέργεια χωρίς να εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου- αποτελεί επιθυμητή επιλογή για διάφορες χρήσεις, ιδίως στον τομέα των μεταφορών και της βιομηχανίας.



Εικόνα 2.1: Κυκλική οικονομία υδρογόνου, (Kish, 2022).

Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του υδρογόνου ως εναλλακτικού καυσίμου είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά του (Flux Power, 2021). Το μόνο παραπροϊόν της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο στις κυψέλες καυσίμου είναι οι υδρατμοί. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Λόγω της καθαρής

τεχνολογίας καύσης, τα αυτοκίνητα που κινούνται με υδρογόνο δεν απελευθερώνουν επικίνδυνα παραπροϊόντα από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως σωματίδια ή οξείδια του αζώτου. Εξαιτίας αυτού, το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση και να βελτιώσει τα αποτελέσματα για τη δημόσια υγεία, ιδίως στις πόλεις όπου οι εκπομπές των αυτοκινήτων αποτελούν μεγάλο πρόβλημα (Ahad et al., 2023).

Επιπρόσθετα, το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα του υδρογόνου μπορεί να μειωθεί εάν παράγεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια, δημιουργώντας «πράσινο υδρογόνο». Η χρήση αυτής της τεχνικής παραγωγής ενισχύει τη συμβολή του υδρογόνου στην επίτευξη των στόχων για μηδενικές εκπομπές και την ανάσχεση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Από την άλλη πλευρά, χωρίς τη χρήση συσκευών δέσμευσης άνθρακα, οι παραδοσιακές τεχνικές παραγωγής υδρογόνου, όπως η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό από φυσικό αέριο, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Reda et al., 2024).

Πέρα από τις μεταφορές, το υδρογόνο έχει πολλές άλλες χρήσεις. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μεταξύ άλλων, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στη θέρμανση και σε βιομηχανικές διεργασίες. Σε δραστηριότητες μεταφορών, βαρέως τύπου, όπως φορτηγά, λεωφορεία και τρένα, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούν έναν βιώσιμο τρόπο κάλυψης των ενεργειακών αναγκών χωρίς να εξαρτώνται τόσο πολύ από τα ορυκτά καύσιμα. Επειδή το υδρογόνο έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες, μπορεί να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση με μία μόνο φόρτιση, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων, όπου το βάρος και ο χρόνος ανεφοδιασμού είναι σημαντικοί παράγοντες. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την αποθήκευση επιπλέον ανανεώσιμης ενέργειας. Μπορεί να παραχθεί όταν η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι υψηλή ή η ζήτηση χαμηλή, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί αργότερα όταν οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξηθούν. Αυτή η δεξιότητα αντιμετωπίζει τη διαλείπουσα λειτουργία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία αποτελεί σημαντικό ζήτημα (Fastech, 2024).

Παρά τα πλεονεκτήματά του, ορισμένα εμπόδια εμποδίζουν την ευρεία χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτικού καυσίμου. Συγκρίνοντας το κόστος παραγωγής με άλλες πηγές ενέργειας, είναι ακόμη αρκετά υψηλό. Η ενεργοβόρα και δαπανηρή μέθοδος της ηλεκτρόλυσης, η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για την παραγωγή υδρογόνου από το νερό, εξακολουθεί να υφίσταται. Επιπλέον, η πλειονότητα του υδρογόνου που παράγεται σήμερα προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που, αν δεν συνδυαστεί με τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα, αναιρεί τα περιβαλλοντικά του οφέλη. Σημαντικές

προκλήσεις προκύπτουν επίσης με την αποθήκευση και τη μεταφορά. Σε σύγκριση με το φυσικό αέριο ή τη βενζίνη, το υδρογόνο έχει χαμηλότερη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, καθιστώντας αναγκαία την κρυογενική αποθήκευση ή τις δεξαμενές υψηλής πίεσης, γεγονός που περιπλέκει την ανάπτυξη υποδομών και την εφοδιαστική. Αν και θα έχει υψηλό κόστος η δημιουργία μιας ισχυρής υποδομής ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι απαραίτητη για να εξυπηρετηθεί ο αυξανόμενος αριθμός οχημάτων που κινούνται με υδρογόνο (Alternative Fuels Data Center, 2024).

Εν κατακλείδι, παρόλο που το υδρογόνο προσφέρει ένα βιώσιμο υποκατάστατο καύσιμο με σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και δυνατότητα προσαρμογής για ποικίλες χρήσεις, η αποτελεσματική ενσωμάτωσή του στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα θα εξαρτηθεί από την επίλυση των προβλημάτων υποδομής και του σχετικού κόστους παραγωγής. Το υδρογόνο μπορεί να είναι απαραίτητο για την οικοδόμηση ενός βιώσιμου μέλλοντος με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, καθώς η επιστήμη και η τεχνολογία αναπτύσσονται.

2.1.4 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την αποθήκευση υδρογόνου, καθεμία από τις οποίες έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι τέσσερις μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι η χημική αποθήκευση, η αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων, η αποθήκευση σε υγρή μορφή και η αποθήκευση σε συμπιεσμένο αέριο. Το αέριο υδρογόνο αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση στην αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου, συνήθως μεταξύ 350 και 700 bar (5.000 και 10.000 psi). Αν και η προσέγγιση αυτή είναι πολύ απλή και ενεργειακά αποδοτική, απαιτεί μεγάλες, στιβαρές δεξαμενές και σημαντική ποσότητα ενέργειας για τη συμπίεση. Επί του παρόντος, η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος μεταφοράς και αποθήκευσης υδρογόνου είναι η αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου (LaoRen & Günther, 2024).

Για να μετατραπεί το αέριο υδρογόνο σε υγρό, πρέπει να ψυχθεί σε εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία - περίπου στους -253°C . Η συμπαγής αποθήκευση είναι δυνατή επειδή το υγρό υδρογόνο έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από το αέριο υδρογόνο. Ωστόσο, προκειμένου να διατηρηθούν οι χαμηλές θερμοκρασίες, η τεχνολογία αυτή απαιτεί εξελιγμένα συστήματα μόνωσης και σημαντική ποσότητα ενέργειας για ψύξη. Επειδή η αποθήκευση υγρού υδρογόνου έχει υψηλή ογκομετρική και βαρυμετρική απόδοση, χρησιμοποιείται κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές (Ahad et al., 2023b).

Οι ενώσεις που είναι γνωστές ως μεταλλικά υδρίδια δημιουργούνται όταν το υδρογόνο αντιδρά με διάφορα μέταλλα ή κράματα μετάλλων. Σε σύγκριση με το

συμπιεσμένο υδρογόνο, τα υλικά αυτά μπορούν να αποθηκεύουν υδρογόνο σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες επειδή μπορούν να απορροφούν και να απελευθερώνουν υδρογόνο μέσω μιας αντιστρεπτής χημικής αντίδρασης. Λόγω του μέσου αποθήκευσης στερεάς κατάστασης και των χαμηλότερων πιέσεων λειτουργίας τους, οι συσκευές αποθήκευσης υδριδίων μετάλλων παρέχουν αυξημένη ασφάλεια. Επιπλέον, έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το συμπιεσμένο αέριο, γεγονός που καθιστά τα συστήματα αποθήκευσης ελαφρύτερα και πιο συμπαγή. Η συγκριτικά βραδεία κινητική, της απορρόφησης και της απελευθέρωσης υδρογόνου, καθώς και η απαίτηση για θέρμανση ή ψύξη κατά τη διάρκεια των λειτουργιών φόρτισης και αποφόρτισης, δημιουργούν δυσκολίες για τα μεταλλικά υδρίδια (Züttel, 2003).

Η διατήρηση του υδρογόνου σε χημικές ενώσεις που μπορούν να το απελευθερώσουν όταν χρειαστεί είναι γνωστή ως χημική αποθήκευση υδρογόνου. Αυτό καλύπτει τεχνικές όπως η αμμωνία, διάφοροι φορείς υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων των υγρών οργανικών φορέων υδρογόνου (LOHC). Επειδή οι LOHC μπορούν να αποθηκεύουν υδρογόνο σε θερμοκρασίες σχεδόν περιβάλλοντος, η μεταφορά και η αποθήκευση του αερίου είναι ασφαλέστερες και αποτελεσματικότερες. Για την απελευθέρωση υδρογόνου, η διαδικασία αυτή χρειάζεται συχνά καταλύτες και εξωτερικές πηγές ενέργειας. Οι χημικοί δεσμοί επιτρέπουν στην αμμωνία και σε άλλους φορείς υδρογόνου να αποθηκεύουν επίσης υδρογόνο, αλλά ο καθένας έχει τα δικά του μειονεκτήματα, όπως η αποτελεσματικότητα και η απαίτηση για καταλύτες (Le et al., 2024).

Για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των συμβατικών τεχνολογιών, οι ερευνητές διερευνούν εναλλακτικές προσεγγίσεις για την αποθήκευση υδρογόνου, όπως η αποθήκευση υδρογόνου σε στερεά κατάσταση, τα πορώδη υλικά και τα νανοϋλικά. Αυτές οι τεχνολογίες αιχμής προσδοκούν, να αυξήσουν την προσβασιμότητα, την ασφάλεια και τη χωρητικότητα αποθήκευσης, γεγονός που θα βοηθήσει τελικά το υδρογόνο να γίνει μια πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη καθαρή πηγή ενέργειας.

2.2 Αγωγοί Υδρογόνου

Καθώς ο πλανήτης κινείται προς βιώσιμες ενεργειακές λύσεις, οι αγωγοί υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική μεταφορά του υδρογόνου ως καθαρού ενεργειακού φορέα. Οι αγωγοί αποτελούν το κύριο συστατικό της υποδομής μεταφοράς υδρογόνου ενώ παρέχουν έναν οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο μεταφοράς υδρογόνου από τις θέσεις παραγωγής στους τελικούς χρήστες. Η επαναχρησιμοποίηση του υφιστάμενου δικτύου αγωγών φυσικού αερίου για τη διευκόλυνση της μεταφοράς υδρογόνου είναι μια εφικτή επιλογή που μπορεί να μειώσει δραστικά την απαίτηση για νέα κατασκευή και τις σχετικές δαπάνες (Li et al., 2024).

Η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών έχει διάφορα πλεονεκτήματα. Οι αγωγοί είναι χρήσιμοι για τη σύνδεση των εγκαταστάσεων παραγωγής με βιομηχανικούς πελάτες και πρατήρια καυσίμων, επειδή μπορούν να διευκολύνουν τη διανομή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα και σε μεγάλες αποστάσεις. Σε γενικές γραμμές, η προσέγγιση αυτή είναι πιο αποδοτική από άλλους τρόπους μεταφοράς, όπως η ναυτιλία ή τα φορτηγά, ιδίως όταν διανύονται μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, οι αγωγοί μπορούν να λειτουργούν ασταμάτητα, καλύπτοντας τη ζήτηση για υδρογόνο και αποφεύγοντας τις καθυστερήσεις που προκαλούν άλλοι τρόποι μεταφοράς (Ahad et al., 2023c).

Η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις για την ασφάλεια, παρά τα πλεονεκτήματά της. Λόγω του μικρού μοριακού μεγέθους του, το υδρογόνο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και επιρρεπές σε διαρροές, οι οποίες μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο έκρηξης και ανάφλεξης. Μελέτες δείχνουν ότι τα υλικά των αγωγών, ιδίως αυτά που κατασκευάζονται από συγκεκριμένους χάλυβες, μπορεί να είναι ευάλωτα στην ψαθυροποίηση του υδρογόνου, όπως αναλύεται παρακάτω. Για να επιτευχθεί με ασφάλεια η μεταφορά υδρογόνου, το φαινόμενο, απαιτεί προσεκτική εξέταση της επιλογής υλικών και του σχεδιασμού του αγωγού (Calabrese et al., 2024).

Μελέτες έχουν δείξει ότι αν και η ανάμιξη φυσικού αερίου και υδρογόνου μπορεί να μειώσει ορισμένους κινδύνους, προσθέτει επίσης επιπλοκές όσον αφορά τη συμβατότητα των υλικών και τα ποσοστά διαρροής. Για παράδειγμα, η προσθήκη υδρογόνου σε ποσοστό έως 25% στους αγωγούς φυσικού αερίου δεν αυξάνει δραματικά τον κίνδυνο έκρηξης, ωστόσο μεγαλύτερες συγκεντρώσεις θα μπορούσαν να απαιτήσουν αλλαγές στην τρέχουσα υποδομή προκειμένου να τηρηθούν οι κανονισμοί ασφαλείας. Έτσι, η έρευνα επικεντρώνεται επί του παρόντος στη δημιουργία εργαλείων εκτίμησης κινδύνου και προγνωστικών μοντέλων για την αξιολόγηση της ακεραιότητας των αγωγών σε διάφορα σενάρια (Mahajan et al., 2022b).

Τα κανονιστικά πλαίσια που αφορούν τη μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών αλλάζουν, καθώς οι συνέπειες για την ασφάλεια από τη χρήση της σημερινής υποδομής φυσικού αερίου γίνονται όλο και πιο εμφανείς. Συνιστάται στους νομοθέτες να δημιουργήσουν ολοκληρωμένους κανόνες που να ανταποκρίνονται στις ιδιαίτερες δυσκολίες που παρουσιάζει η μεταφορά υδρογόνου. Αυτό περιλαμβάνει τη θέσπιση κατευθυντήριων γραμμών για τις διαδικασίες αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, τις προδιαγραφές υλικών αγωγών και τα συστήματα παρακολούθησης ανίχνευσης διαρροών (Agency for the Cooperation of Energy Regulators, 2022). Οι μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη δημιουργία εξελιγμένων υλικών που είναι ανθεκτικά στην ευθραυστότητα του υλικού λόγω του υδρογόνου και στη διερεύνηση

δημιουργικών σχεδίων αγωγών που αυξάνουν την ασφάλεια. Η ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης μπορεί επίσης να προσφέρει στους φορείς εκμετάλλευσης δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την κατάσταση του αγωγού, επιτρέποντάς τους να ελέγχουν καλύτερα τους κινδύνους.

Συνοψίζοντας, αν και οι αγωγοί υδρογόνου αποτελούν ένα βιώσιμο μέσο μεταφοράς αυτής της καθαρής πηγής ενέργειας, η αποτελεσματική ενσωμάτωση τους στο μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο θα εξαρτηθεί από την επίλυση των προβλημάτων ασφαλείας μέσω ενδελεχούς μελέτης και ρυθμιστικής εποπτείας.

2.2.1 Αγωγοί με μείγμα φυσικού αερίου – υδρογόνου

Η ενσωμάτωση του υδρογόνου με τους υφιστάμενους αγωγούς φυσικού αερίου αποτελεί σημαντική δυνατότητα για τη μετάβαση προς πιο πράσινα ενεργειακά συστήματα, αξιοποιώντας παράλληλα την προϋπάρχουσα υποδομή. Αξιοποιώντας το τεράστιο δίκτυο αγωγών που υπάρχει σήμερα, η ανάμειξη του υδρογόνου με το φυσικό αέριο μπορεί να συμβάλει στην επιτάχυνση της χρήσης του υδρογόνου ως πηγή καυσίμου. Η μεθοδολογία αυτή όχι μόνο μετριάξει το ζήτημα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά και αντιμετωπίζει τις δυσκολίες που σχετίζονται με την παραγωγή και την αποθήκευση του υδρογόνου (Siemens Energy, 2020).

Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά και των δύο αερίων πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη κατά τη μεταφορά ενός μείγματος φυσικού αερίου και υδρογόνου. Επειδή το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο από το μεθάνιο και ρέει διαφορετικά, μπορεί να επηρεάσει τη δυναμική ενός αγωγού. Η προσθήκη υδρογόνου τροποποιεί το ενεργειακό περιεχόμενο και την πυκνότητα του μίγματος αερίου, απαιτώντας τροποποιήσεις στις διαδικασίες λειτουργίας. Μελέτες δείχνουν ότι μέχρι ένα ορισμένο ποσοστό, τα μείγματα υδρογόνου μπορούν να μεταφέρονται μέσω αγωγών φυσικού αερίου χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις. Ωστόσο, για λόγους ασφαλείας και αποδοτικότητας, υψηλότερα ποσοστά μπορεί να απαιτούν ανακαινίσεις ή την προσθήκη νέων υλικών (Darsaliya et al., 2023).

Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του μίγματος αερίου, τα οποία περιλαμβάνουν την πίεση, τη θερμοκρασία και τους ρυθμούς ροής στο εσωτερικό του συστήματος αγωγών, μπορούν επίσης να επηρεαστούν από την ανάμειξη υδρογόνου. Μελέτες έχουν δείξει ότι η σταθερή λειτουργία και η αποφυγή αιχμών πίεσης σε αγωγούς φυσικού αερίου εξαρτώνται από τη συνεπή έγχυση υδρογόνου σε συγκεκριμένους ρυθμούς. Για τη μίμηση αυτής της δυναμικής έχουν κατασκευαστεί μαθηματικά μοντέλα, τα οποία ρίχνουν φως στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η απόδοση του αγωγού από διαφορετικές συγκεντρώσεις υδρογόνου (Kuczyński et al., 2019).

Η ενσωμάτωση υδρογόνου στους αγωγούς φυσικού αερίου παρουσιάζει μια σειρά από ζητήματα ασφάλειας, παρά τα όποια πιθανά πλεονεκτήματα. Επειδή το υδρογόνο είναι πιο εύφλεκτο από το μεθάνιο, ο ακατάλληλος χειρισμός μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κίνδυνο εκρήξεων. Επιπλέον, πολλά υλικά αγωγών -ιδιαίτερα χάλυβες υψηλής αντοχής- που χρησιμοποιούνται συχνά στις υποδομές φυσικού αερίου μπορεί να ψαθυροποιηθούν όταν εκτεθούν σε υδρογόνο. Για να μειωθούν αυτοί οι κίνδυνοι είναι απαραίτητες οι ολοκληρωμένες εκτιμήσεις ασφαλείας. Τα ρυθμιστικά πλαίσια που αφορούν τη μεταφορά υδρογόνου παρουσιάζουν ξεχωριστά ζητήματα που απαιτούν προσαρμογή. Οι προκλήσεις αυτές περιλαμβάνουν την ανάγκη συστημάτων παρακολούθησης για τον εντοπισμό διαρροών και διαδικασιών αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης. Η ανάπτυξη κατευθυντήριων γραμμών για ασφαλείς διαδικασίες ανάμειξης και ο προσδιορισμός των κατάλληλων υλικών για τη μεταφορά υδρογόνου παραμένουν οι κύριοι τομείς έρευνας (Calabrese et al., 2024b).

Σε όλο τον κόσμο, διάφορα πιλοτικά προγράμματα διερευνούν κατά πόσον η ανάμειξη υδρογόνου σε αγωγούς φυσικού αερίου είναι εφικτή. Πρωτοβουλίες, για παράδειγμα, δοκιμάζουν διαφορετικές αναλογίες ανάμειξης στην Καλιφόρνια και την Ευρώπη για την αξιολόγηση των λειτουργικών επιπτώσεων και των προφυλάξεων ασφαλείας. Σκοπός αυτών των επιδείξεων είναι η συλλογή δεδομένων σχετικά με τις αντιδράσεις των διαφόρων υλικών των αγωγών στην έκθεση στο υδρογόνο και τις επιπτώσεις της ανάμειξης στη συνολική απόδοση του συστήματος (California Public Utilities Commission, 2022). Απαιτείται περισσότερη έρευνα για τη βελτίωση της ασφαλείας των αγωγών και των διαδικασιών ανάμειξης, καθώς αυξάνεται η ζήτηση για εναλλακτικές λύσεις ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει την εξέταση υλικών αιχμής που μπορούν να αντισταθούν στην ψαθυροποίηση των υλικών λόγω του υδρογόνου, και τη δημιουργία λεπτομερών μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των μειγμάτων φυσικού αερίου-υδρογόνου σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Συμπερασματικά, μια βιώσιμη προσέγγιση για την ενσωμάτωση του υδρογόνου στο ενεργειακό τοπίο είναι η χρήση των αγωγών φυσικού αερίου που ήδη υπάρχουν για τη μεταφορά των μειγμάτων υδρογόνου. Για να διασφαλιστεί η ομαλή μετάβαση σε αυτή την καθαρότερη πηγή ενέργειας, θα είναι επιτακτική ανάγκη να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες για την ασφάλεια μέσω ενδελεχούς έρευνας και ρυθμιστικού ελέγχου.

2.2.2 Αγωγοί υδρογόνου

Προκειμένου να κατοχυρωθεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος, πρέπει να αντιμετωπιστούν οι ειδικοί κίνδυνοι και οι προκλήσεις που σχετίζονται με τους αγωγούς υδρογόνου, ιδίως εκείνους που προορίζονται για τη μεταφορά υδρογόνου ή μειγμάτων

υδρογόνου-φυσικού αερίου. Η δυνατότητα χρήσης της υφιστάμενης υποδομής φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου έχει κερδίσει την προσοχή των ερευνητικών και πολιτικών συζητήσεων, καθώς το υδρογόνο γίνεται όλο και πιο δημοφιλές ως καθαρή πηγή ενέργειας. Όταν όμως αναμειγνύονται οι ιδιότητες των συμβατικών υλικών των αγωγών με τις εγγενείς ιδιότητες του υδρογόνου, προκύπτουν σοβαρές ανησυχίες για την ασφάλεια τους (Bauer, 2023).

Η πιθανότητα ευθραυστότητας των υλικών λόγω της παρουσίας του υδρογόνου είναι ένας από τους κυριότερους κινδύνους που συνδέονται με τους αγωγούς υδρογόνου. Αυτό συμβαίνει όταν τα άτομα υδρογόνου διαπερνούν τον χάλυβα των αγωγών, μειώνοντας την ολκιμότητά τους και αυξάνοντας τον κίνδυνο θραύσης. Όταν το υδρογόνο παρέχεται υπό συνθήκες υψηλής πίεσης, το φαινόμενο της ψαθυροποίησης του χάλυβα εξ' αιτίας του υδρογόνου ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα των αγωγών. Οι έρευνες υποδηλώνουν ότι, αν δεν γίνουν ουσιαστικές αλλαγές για τη μείωση αυτών των κινδύνων, τεράστιες ποσότητες υδρογόνου ενδέχεται να μην μπορούν να μεταφερθούν από τους σημερινούς αγωγούς φυσικού αερίου (Guy & Julien, 2022).

Επειδή το υδρογόνο περιέχει μικρότερα μόρια από το μεθάνιο, είναι πιο πιθανό να διαρρεύσει. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την καύση και τις εκρήξεις πιο πιθανές, ιδίως σε μικρές περιοχές όπως τα κτίρια, όπου οι διαρροές αερίου μπορούν να συσσωρευτούν. Το υδρογόνο είναι πτητικό και μπορεί να αλληλεπιδράσει με τον αέρα δημιουργώντας εκρηκτικά μείγματα και ως εκ τούτου πρέπει να γίνεται προσεκτικός χειρισμός του. Πρέπει να υπάρχουν συστήματα παρακολούθησης για τον γρήγορο εντοπισμό τυχόν διαρροών (Ahad et al., 2023d).

Οι νόμοι που διέπουν τη μεταφορά υδρογόνου αλλάζουν συνεχώς. Οι ειδικές δυσκολίες που παρουσιάζει το υδρογόνο ενδέχεται να μην αντιμετωπίζονται επαρκώς από τους κανονισμούς ασφαλείας που ισχύουν σήμερα για τους αγωγούς φυσικού αερίου. Ισχυρή είναι η σύσταση για τη δημιουργία κανονισμών, με σκοπό να λογιστούν οι κίνδυνοι που συνεπάγεται η ανάμειξη υδρογόνου στα σημερινά συστήματα αγωγών. Λόγω των ανησυχιών για τη δημόσια ασφάλεια, εκθέσεις έχουν προτείνει την απαγόρευση της ανάμειξης υδρογόνου στα δίκτυα διανομής φυσικού αερίου, αλλά την έγκριση περιορισμένης χρήσης σε ειδικές γραμμές μεταφοράς για βιομηχανικούς πελάτες (Reed Smith LLP, 2022).

Η ασφάλεια, πρέπει να θεωρείται βασικός παράγοντας κατά το σχεδιασμό του συστήματος μεταφοράς υδρογόνου. Αυτό συνεπάγεται τον προσδιορισμό του κατά πόσον τα υλικά του αγωγού είναι συμβατά με το υδρογόνο και την τοποθέτηση συστημάτων παρακολούθησης αιχμής για τον συνεχή έλεγχο της ακεραιότητας του αγωγού και την ανεύρεση διαρροών. Για να βρεθούν τα κατάλληλα υλικά που μπορούν

να αντέξουν τις επιπτώσεις του υδρογόνου χωρίς να θυσιάσουν την ασφάλεια, η έρευνα συνεχίζεται (Lamari et al., 2024).

Καθώς αυξάνεται το ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως εναλλακτική πηγή καυσίμου, απαιτείται περισσότερη έρευνα για να καλυφθούν τα κενά γνώσης σχετικά με τον τρόπο μεταφοράς του μέσω αγωγών. Η έρευνα αυτή θα πρέπει να επικεντρωθεί σε τρεις κύριους τομείς: τεχνολογίες ανίχνευσης διαρροών, οι οποίες αποσκοπούν στην ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων που μπορούν να ανιχνεύουν ακόμη και μικρές διαρροές σε πραγματικό χρόνο για τη βελτίωση των μέτρων ασφαλείας- συμβατότητα υλικών, η οποία διερευνά τις επιπτώσεις του υδρογόνου στα διάφορα υλικά των αγωγών για τον προσδιορισμό της καταλληλότητάς τους για μακροχρόνια χρήση- και προγνωστική συντήρηση, η οποία κάνει χρήση της μηχανικής μάθησης και άλλων αναλυτικών εργαλείων για την πρόβλεψη πιθανών αστοχιών στις υποδομές των αγωγών λόγω της έκθεσης στο υδρογόνο (Corner, 2022).

Συνοψίζοντας, ενώ η χρήση αγωγών για τη μεταφορά υδρογόνου προσφέρει ένα πολλά υποσχόμενο μέσο για την ενσωμάτωση αυτής της καθαρής πηγής ενέργειας στα σημερινά ενεργειακά συστήματα, η ασφαλής μετάβαση σε μια οικονομία υδρογόνου θα εξαρτηθεί από την αντιμετώπιση των προβλημάτων ασφαλείας μέσω αυστηρής έρευνας και ρυθμιστικής εποπτείας.

2.2.3 Ψαθυροποίηση αγωγών χάλυβα λόγω του υδρογόνου

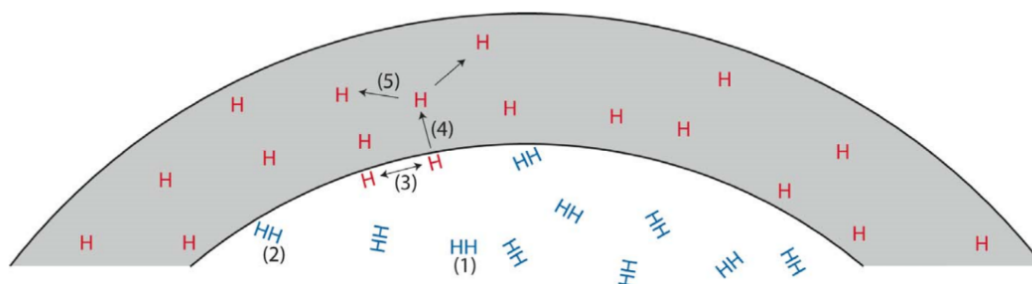
Οι μηχανικές ιδιότητες όλων των μετάλλων επηρεάζονται αρνητικά από το υδρογόνο. Το μέγεθος της επιδείνωσης εξαρτάται από τον τύπο, τις ιδιότητες (π.χ., μηχανική αντοχή), το περιβάλλον (π.χ., πίεση και θερμοκρασία υδρογόνου) και το μηχανικό φορτίο. Η έκθεση των μετάλλων στο υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυροποίηση του υλικού, η οποία εκδηλώνεται με σημαντικές απώλειες στην αντοχή σε εφελκυσμό, την ελαστικότητα και την ανθεκτικότητα σε ρωγμές και την επιτάχυνση της αστοχίας του υλικού (Gangloff & Somerday, 2012).



Εικόνα 2.2: Ρωγμή αγωγού λόγω ψαθυροποίησης, (Demaco Cryogenics, 2021).

2.2.3.1 Μηχανισμός ψαθυροποίησης υλικού λόγω υδρογόνου

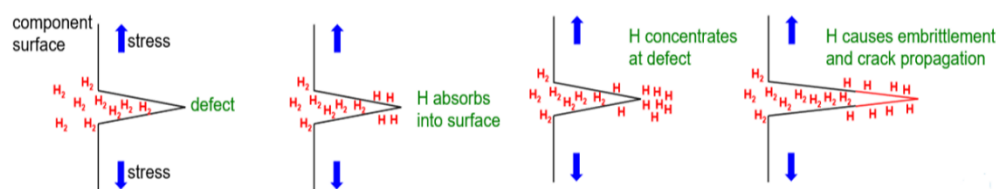
Το αέριο υδρογόνο αποτελείται από δισθενή μόρια υδρογόνου που κινούνται συνεχώς. Το δισθενές υδρογόνο (H_2) προσροφάται στην επιφάνεια του μετάλλου και διασπάται σε μονοατομικό υδρογόνο (H), το οποίο απορροφάται μέσα στο μέταλλο και τέλος διαχέεται μέσω των πόρων του μετάλλου. Το υδρογόνο μπορεί να αντιδράσει με το μέταλλο ή να το διαπεράσει μέχρι την εξωτερική του επιφάνεια προκαλώντας μια πολύ μικρή διαρροή υδρογόνου. Το πλέγμα του μετάλλου γίνεται λιγότερο ανθεκτικό και οι μηχανικές του ιδιότητες υποβαθμίζονται. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement – HE) (Gangloff & Somerday, 2012).



Εικόνα 2.3: Προσρόφηση ατομικού υδρογόνου στο μέταλλο, (H2Tools, 2024).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και πολύ μικρές ποσότητες υδρογόνου, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικό βαθμό αστοχίας. Το υδρογόνο (H) που διαχέεται στο μέταλλο συγκεντρώνεται σε ατέλειες (π.χ., ελαττώματα κατασκευής στις επιφάνειες των εξαρτημάτων). Το φαινόμενο της ψαθυροποίησης πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες κάτω των $200^{\circ}C$. Οι μηχανισμοί της ψαθυροποίησης δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητοί και συνεχίζουν να μελετώνται. Ένας ευρέως αποδεκτός μηχανισμός HE

είναι η Θεωρία της Ενισχυμένης Αποκόλλησης λόγω Υδρογόνου (Hydrogen Enhanced Decohesion - H.E.D.E). Αυτή η θεωρία υποστηρίζει ότι τα άτομα υδρογόνου που συγκεντρώνονται σε περιοχές με υψηλή τριαξονική πίεση οδηγούν σε αδυναμία των δεσμών μεταξύ των ατόμων του μετάλλου και προκαλούν θραύση. (Gangloff & Somerday, 2012).

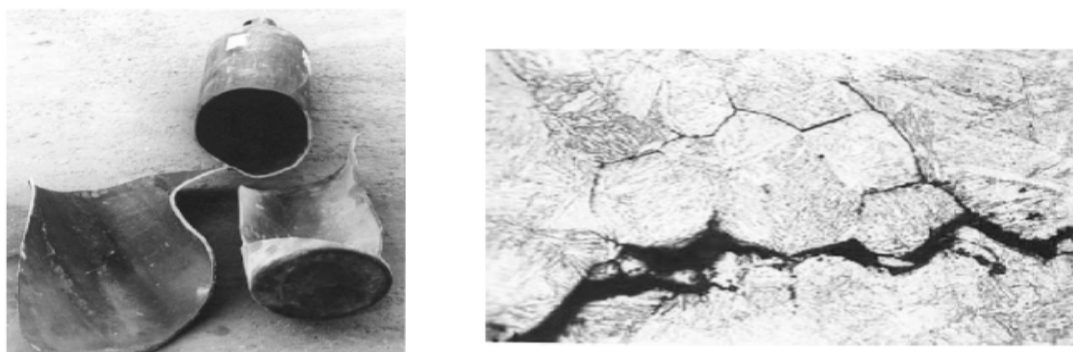


Εικόνα 2.4: Διάχυση υδρογόνου στο μέταλλο και δημιουργία ρωγμής, (H2Tools, 2024).

Ο παραπάνω μηχανισμός εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και όχι μόνο από τις ιδιότητες του υλικού. Στην παρουσίαση του φαινομένου της ψαθυροποίησης, συμβάλλουν και άλλες μεταβλητές όπως:

- Ο τύπος του μετάλλου και η σύσταση του (π.χ., περιεκτικότητα σε νικέλιο, αντοχή υλικού, συγκολλήσεις).
- Το μηχανικό φορτίο που επιβάλλεται στον αγωγό και το είδος του φορτίου (π.χ., σταθερό φορτίο έναντι κυκλικού).
- Περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ., πίεση αερίου υδρογόνου, θερμοκρασία)

Η τομή των παραπάνω μεταβλητών καθορίζει την ενεργοποίηση και τον βαθμό του φαινομένου.



Εικόνα 2.5: Ψαθυροποίηση χάλυβα, (H2Tools, 2024).

2.2.3.2 Πρόληψη ψαθυροποίησης αγωγών λόγω του υδρογόνου

Η πρόληψη του φαινομένου της ψαθυροποίησης απαιτεί λήψη των κατάλληλων μέτρων, για τη μείωση του κινδύνου εμφάνισης και την εξασφάλιση της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας των υποδομών υδρογόνου.

- Η σωστή επιλογή υλικού είναι θεμελιώδης για την πρόληψη της ψαθυροποίησης. Για παράδειγμα, η αύξηση του ποσοστού νικελίου και η μείωση του ποσοστού άνθρακα ($<0.03\%$) στο υλικό μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου. Η προσθήκη τιτανίου επίσης βοηθά. Αυτά τα άτομα καταλαμβάνουν κρίσιμες θέσεις στη κρυσταλλική δομή των ανοξείδωτων χαλύβων. Με άλλα λόγια, τα προστιθέμενα στοιχεία σταθεροποιούν τη επιθυμητή μικροδομή του υλικού (Caskey, 1985).
- Ο έλεγχος της έκθεσης του υλικού στο υδρογόνο κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, της αποθήκευσης και της υπηρεσίας είναι κρίσιμος για την αποφυγή της ψαθυροποίησης του υλικού.
- Η εφαρμογή επικαλύψεων ή επιφανειακών κατεργασιών στο υλικό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της απορρόφησης του υδρογόνου.
- Μια διαδικασία θερμικής επεξεργασίας μετά την παραγωγή μπορεί να βοηθήσει στην αφαίρεση του εγκλωβισμένου υδρογόνου από το υλικό.
- Η τεχνική συγκόλλησης που χρησιμοποιείται επηρεάζει αν θα προκληθεί ή όχι ευθραυστότητα λόγω υδρογόνου. Με την ακατάλληλη επιλογή υλικού και κράματος, μπορεί να συμβεί ευαισθητοποίηση. Η ευαισθητοποίηση είναι ο σχηματισμός καρβιδίων στις κρυσταλλικές περιοχές του υλικού κατά τη συγκόλληση. Η ευαισθητοποίηση, ευτυχώς, μπορεί να προληφθεί χρησιμοποιώντας ανοξείδωτο χάλυβα με χαμηλό ποσοστό άνθρακα ($<0,03\%$), όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας 316L ή 1.4404. Η προσθήκη τιτανίου στο κράμα, όπως στον ανοξείδωτο χάλυβα 316Ti ή 1.4571, είναι επίσης μια εξαιρετική μέθοδος για την πρόληψη αυτού του προβλήματος (Demaco Cryogenics, 2021) .
- Τακτική επιθεώρηση και συντήρηση των αγωγών

Αυτές οι στρατηγικές συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου ευθραυστότητας λόγω υδρογόνου και στην παράταση της διάρκειας ζωής των υλικών και υποδομών που έρχονται σε επαφή με υδρογόνο (Olander, 2024).

2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου

Η χρήση του υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης. Οι υφιστάμενοι αγωγοί προσφέρουν την ευκαιρία να μειωθεί το κόστος και ο χρόνος που απαιτείται για την ανάπτυξη νέων υποδομών αξιοποιώντας τη μεγάλη έκταση των δικτύων που ήδη υπάρχουν (ASME, 2008; European Commission, 2020).

Παρά τα προφανή πλεονεκτήματα, όπως η εξοικονόμηση πόρων και η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή νέων έργων, η προσαρμογή αυτών των δικτύων δεν παύουν να έχουν ορισμένες προκλήσεις (IRENA, 2020). Ζητήματα όπως η θραύση των υλικών λόγω της παρουσίας του υδρογόνου, ο κίνδυνος διαρροών και οι ανάγκες για τεχνικές προσαρμογές σε αντλίες και συνδέσεις αναδεικνύονται ως κρίσιμα θέματα που χρήζουν αντιμετώπιση (NFPA, 2020; DOE 2021). Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα της χρήσης του υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου.

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα από τη χρήση του υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου.

Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα Χρήσης Υφιστάμενου Δικτύου	Μειονεκτήματα Χρήσης Υφιστάμενου Δικτύου
Υποδομή	Η υπάρχουσα υποδομή μειώνει την ανάγκη για νέα έργα και επιταχύνει την μετάβαση από φυσικό αέριο σε υδρογόνο (ASME, 2008; IRENA, 2020).	Οι υπάρχοντες αγωγοί μπορεί να μην είναι κατάλληλοι για πλήρη μεταφορά υδρογόνου λόγω φαινομένων όπως η ψαθυροποίηση του χάλυβα (ASME, 2008; International Journal of Hydrogen Energy, 2020).
Κόστος	Σημαντική εξοικονόμηση κόστους λόγω μηδενικής ή μειωμένης ανάγκης νέας κατασκευής (European Commission, 2020; Hydrogen Europe, 2020).	Ενδέχεται να προκύψουν σημαντικά έξοδα για αναβάθμιση και επισκευή παλαιότερων δικτύων (Hydrogen Europe, 2020; EIGA, 2014).
Τεχνικές Προσαρμογές	Με σχετικά μικρές τροποποιήσεις, οι αγωγοί	Απαιτούνται τροποποιήσεις στις υφιστάμενες συνδέσεις,

	μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά μείγματος υδρογόνου ή και 100% υδρογόνο (ASME, 2008; DOE, 2021).	συγκολλήσεις και αντλίες για την ασφαλή μεταφορά υδρογόνου (DOE, 2021; NFPA, 2020).
Ασφάλεια	Η υπάρχουσα εμπειρία στη λειτουργία δικτύων φυσικού αερίου μπορεί να αξιοποιηθεί για την ασφάλεια και την ακεραιότητα του δικτύου (NFPA, 2020; EIGA, 2014).	Υψηλότερος κίνδυνος διαρροών και ανάφλεξης λόγω της φύσης του υδρογόνου σε σχέση με το φυσικό αέριο (ASME, 2008; NFPA, 2020).
Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	Μείωση περιβαλλοντικής επιβάρυνσης καθώς δεν απαιτείται νέα κατασκευή (IRENA, 2020; European Commission, 2020).	Η ανάμειξη υδρογόνου με φυσικό αέριο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση εκπομπών ή μείωση αποδοτικότητας σε ορισμένες εφαρμογές (European Commission, 2020; IRENA, 2020).
Διαθεσιμότητα	Πολύ μεγάλο και εκτεταμένο δίκτυο ήδη διαθέσιμο στις περισσότερες χώρες (Hydrogen Europe, 2020; DOE, 2021).	Ορισμένα τμήματα του δικτύου ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα για χρήση με υδρογόνο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις (DOE, 2021; ASME, 2008).
Διαχείριση Κινδύνων	Διαχείριση κινδύνων με προσαρμογή υπαρχόντων πρωτοκόλλων λειτουργίας και ασφαλείας (ASME, 2007; NFPA, 2020).	Υψηλός κίνδυνος αστοχίας εάν δεν γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές για την αντοχή του δικτύου σε υψηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου (NFPA, 2020; Hydrogen Europe, 2020).

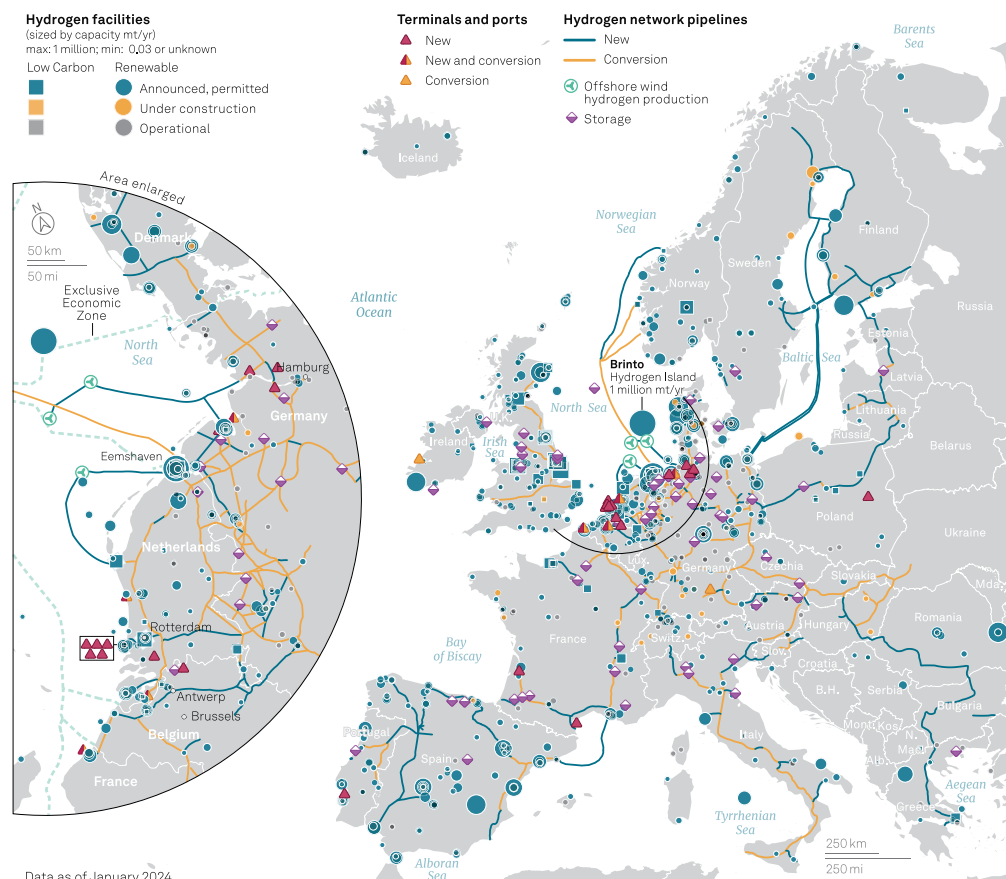
2.3 Αγωγοί Υδρογόνου στον παγκόσμιο χάρτη

Το παγκόσμιο δίκτυο αγωγών υδρογόνου αλλάζει γρήγορα, καθώς τα κράτη και οι περιοχές πραγματοποιούν επενδύσεις σε υποδομές για να διευκολύνουν τη μετάβαση στο υδρογόνο ως βιώσιμη πηγή ενέργειας. Με σχεδόν 1.600 χιλιόμετρα σημερινών αγωγών υδρογόνου και με τολμηρά σχέδια για τη μεγάλη επέκταση του δικτύου αυτού,

η Ευρώπη πρωτοστατεί στην ανάπτυξη αυτή. Στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας European Hydrogen Backbone προγραμματίζονται 11.600 χιλιόμετρα αγωγών υδρογόνου μέχρι το 2030 και περίπου 40.000 χιλιόμετρα μέχρι το 2040. Σημαντικές πρωτοβουλίες περιλαμβάνουν το έργο H2Med, έναν υποθαλάσσιο αγωγό που συνδέει τη Βαρκελώνη με τη Μασσαλία, και τον διάδρομο South2 Corridor, ο οποίος σκοπεύει να συνδέσει την παραγωγή υδρογόνου στη Βόρεια Αφρική με τις ευρωπαϊκές αγορές (Gas Infrastructure Europe, 2024).

Εκτός από την Ευρώπη, και άλλες περιοχές σημειώνουν πρόοδο στην ανάπτυξη αγωγών υδρογόνου. Για παράδειγμα, το Ομάν ετοιμάζεται να κατασκευάσει έναν αγωγό 1.000 χιλιομέτρων που θα μεταφέρει υδρογόνο από τον νότο της χώρας στον βορρά της. Η Δανία αναμένεται να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στο μέλλον του υδρογόνου στην Ευρώπη. Σχεδιάζει να κατασκευάσει πάνω από 800 χιλιόμετρα νέων αγωγών μέχρι το 2026, υποστηριζόμενη από τη σημαντική της ικανότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας. Με νέα έργα που σχεδιάζονται στον Καναδά και υφιστάμενους αγωγούς στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Βόρεια Αμερική διερευνά εν τω μεταξύ επίσης τις υποδομές υδρογόνου (International Renewable Energy Agency, 2024.).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν δημιουργηθεί διαδραστικοί χάρτες για την απεικόνιση αυτών των πρωτοβουλιών υποδομής υδρογόνου. Στους χάρτες αυτούς είναι διαθέσιμα δεδομένα, σε πραγματικό χρόνο, σχετικά με έργα αγωγών, εγκαταστάσεις παραγωγής, θέσεις αποθήκευσης και δίκτυα διανομής. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και στα ενδιαφερόμενα μέρη να παρακολουθούν την πρόοδο και να κάνουν σοφά σχέδια για τα επερχόμενα γεγονότα. Οι χάρτες αυτοί θα είναι απαραίτητοι για τον συντονισμό των προσπαθειών σε διάφορες περιοχές και την εξασφάλιση μιας ισχυρής και ολοκληρωμένης οικονομίας υδρογόνου, καθώς η ζήτηση για υδρογόνο αυξάνεται (Meillaud, 2024).



Εικόνα 2.6: Προβλεπόμενο δίκτυο αγωγών υδρογόνου στην Ευρώπη μέχρι το 2030, (S&P Global Commodity Insights, 2024).

Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 2.7 φαίνεται ο χάρτης με το αναπτυσσόμενο δίκτυο υποδομών υδρογόνου σε όλη την Ευρώπη με εκατοντάδες έργα σε διάφορα στάδια ανάπτυξης. Στον χάρτη αυτόν φαίνεται το ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως καθαρή πηγή ενέργειας, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της απαλλαγής του ενεργειακού συστήματος από τους υδρογονάνθρακες. Το συνεχώς επεκτεινόμενο δίκτυο υποδομών υδρογόνου, στην Ευρώπη, δείχνει μια αισιόδοξη προσέγγιση, στην ανάπτυξη μιας ολόκληρης οικονομίας, βασισμένης σε αυτό (Onyango, 2024).



Εικόνα 2.7: Αναπτυσσόμενο δίκτυο υδρογόνου στην Ευρώπη, (Onyango, 2024).

2.4 Σεισμικοί γεωκίνδυνοι

Οι σεισμικοί γεωκίνδυνοι αναφέρονται στους κινδύνους που σχετίζονται με σεισμικά φαινόμενα και τις επιπτώσεις τους στις ανθρώπινες κοινωνίες, τις υποδομές και το περιβάλλον. Αυτοί οι κίνδυνοι προκύπτουν από τις δονήσεις του φλοιού της γης, που οφείλονται κυρίως σε τεκτονικές διεργασίες (Smith, 2013). Οι σεισμικοί γεωκίνδυνοι είναι σημαντικοί για την έρευνα στις γεωεπιστήμες και τη μηχανική, επειδή μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις υποδομές και την ανθρώπινη ασφάλεια. Η απότομη απελευθέρωση ενέργειας από τον φλοιό της Γης προκαλεί σεισμούς, οι οποίοι προκαλούν δονήσεις στο έδαφος και μπορεί να προκαλέσουν κατολισθήσεις, τσουνάμι και ρήγματα στο έδαφος (Camargo et al., 2019).

Η πιθανότητα δομικών ζημιών είναι ένα από τα κύριες αστοχίες όταν πρόκειται για τους σεισμικούς γεωκινδύνους. Για τους σκοπούς του αστικού σχεδιασμού και της ετοιμότητας για καταστροφές, ο προσδιορισμός των δομών που κινδυνεύουν και των μέτρων μετριασμού που μπορούν να ληφθούν διευκολύνεται με τη χρήση της εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας. Αυτό περιλαμβάνει τη διασφάλιση ότι τα νεόδμητα κτίρια ακολουθούν τους πιο πρόσφατους σεισμικούς κανόνες και την αναβάθμιση των υφιστάμενων κτιρίων για την αύξηση της ανθεκτικότητάς τους (Freddi et al., 2021).

Οι σεισμικοί γεωκίνδυνοι δεν αποτελούν μόνο δομικό πρόβλημα, αλλά μπορούν επίσης να προκαλέσουν δευτερογενή γεγονότα όπως τσουνάμι και κατολισθήσεις. Όταν οι πλαγιές γίνονται ασταθείς λόγω των δονήσεων, οι βράχοι και τα χώματα μπορεί να πέσουν προς τα κάτω, με αποτέλεσμα τις κατολισθήσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό σε ορεινές περιοχές όπου υπάρχει πολύ απότομο έδαφος. Οι παράκτιες περιοχές μπορεί να πλημμυρίσουν από τεράστια κύματα που προκαλούνται από υποθαλάσσιους σεισμούς που μετατοπίζουν τεράστιες ποσότητες νερού, δημιουργώντας έτσι τσουνάμι (European Union Civil Protection Knowledge Network 2024).

Για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση των σεισμικών γεωκινδύνων απαιτείται ένας συνδυασμός ανάλυσης ιστορικών δεδομένων, συσκευών σεισμικής παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και γεωλογικών ερευνών. Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν ενισχύσει την ικανότητά μας να προβλέπουμε και να αντιμετωπίζουμε αυτούς τους κινδύνους. Οι σειсмоγράφοι, για παράδειγμα, προσφέρουν ζωτικής σημασίας πληροφορίες για τη σεισμική δραστηριότητα και η μοντελοποίηση σε υπολογιστές βοηθά στην προσομοίωση πιθανών επιπτώσεων στους ανθρώπους και τις υποδομές (Vargas, 2023).

Συνοπτικά, η μείωση της επιρροής των σεισμικών γεωκινδύνων στην κοινωνία απαιτεί την κατανόησή τους. Είναι αδύνατο να υπερεκτιμηθεί η σημασία των αυστηρών τεχνικών διαδικασιών, του αποτελεσματικού σχεδιασμού χρήσεων γης και των ολοκληρωμένων σχεδίων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, καθώς τα μητροπολιτικά κέντρα επεκτείνονται σε σεισμικά ενεργές περιοχές. Η βελτίωση της ετοιμότητάς μας για σεισμικά γεγονότα στο μέλλον θα χρειαστεί συνεχή μελέτη και επενδύσεις σε τεχνολογίες παρακολούθησης.

2.4.1 Είδη γεωκινδύνων

Γεωκίνδυνος είναι κάθε φυσικό φαινόμενο ή διεργασία που ενδέχεται να προκαλέσει ζημιές ή απώλειες στην ανθρώπινη ζωή, στις υποδομές και στο περιβάλλον. Η κατανόηση και η αξιολόγηση των γεωκινδύνων είναι κρίσιμη για τη μείωση των επιπτώσεων τους (Smith, 2013). Ο μεγαλύτερος αριθμός των γεωκινδύνων που έχουν καταγραφεί στον κόσμο είναι σεισμικοί γεωκίνδυνοι. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν λεπτομερώς τα πιο σημαντικά γεωλογικά φαινόμενα που επηρεάζουν τόσο χερσαίους όσο και υποθαλάσσιους αγωγούς.

2.4.1.1 Ρήγματα

Οι ρωγμές ή οι ασυνέχειες στους γεωλογικούς σχηματισμούς, τα οποία μπορούν να εμφανιστούν σε όλα τα είδη πετρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των πυριγενών, ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, αποτελούν την πρωταρχική μορφή γεωκινδύνου που είναι γνωστά ως ρήγματα. Τα ρήγματα αυτά προκαλούνται από την εύθραυστη παραμόρφωση, η οποία είναι η απώλεια της συνεκτικότητας των πετρωμάτων ως αποτέλεσμα της πίεσης που υπερβαίνει την αντοχή τους. Τα διατμητικά ρήγματα, στα οποία τα πετρώματα εκατέρωθεν έχουν ολισθήσει το ένα δίπλα στο άλλο, ή οι αρμοί, όπου οι μάζες των πετρωμάτων έχουν απομακρυνθεί μεταξύ τους, είναι δύο πιθανοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να εμφανιστούν τα ρήγματα. Δεδομένου ότι τα ρήγματα αυτά είναι σημαντικά σε γεωλογικές διεργασίες όπως η δημιουργία ιζηματογενών λεκανών και ορεινών ζωνών, η κατανόησή τους είναι απαραίτητη για ποικίλες επιστημονικές, τεχνολογικές και εμπορικές εφαρμογές (Haq, 2024).

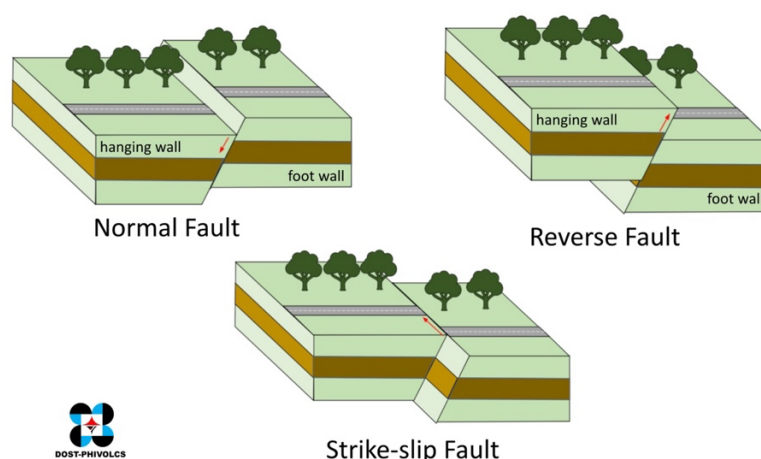
Τα ρήγματα λειτουργούν ως κανάλια για τη διέλευση ρευστών, όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και τα υπόγεια ύδατα. Λόγω της διαπερατότητάς τους, τα τεκτονισμένα πετρώματα είναι χρήσιμα για την αποθήκευση υδρογονανθράκων και χρησιμεύουν ως υδροφόροι ορίζοντες. Για παράδειγμα, στη γεωλογία πετρελαίου, οι ρωγμές μπορούν να βελτιώσουν τη ροή υδρογονανθράκων, γεγονός που τις καθιστά απαραίτητες για την εξόρυξη και την εξερεύνηση πόρων. Για την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων των ρηγμάτων στους φυσικούς πόρους και τις υποδομές, είναι απαραίτητο να χαρακτηριστούν τα ρήγματα (British Geological Survey, 2024).

Με βάση τις μεθόδους δημιουργίας και τα χαρακτηριστικά τους, μπορούν να διακριθούν διάφοροι τύποι ρηγμάτων. Οι ρωγμές λάσπης, οι οποίες προκύπτουν από την αποξήρανση σε ιζήματα πλούσια σε άργιλο, τα cleats, τα οποία είναι ρήγματα ανοικτού τρόπου που παρατηρούνται σε στρώματα άνθρακα, και οι ζώνες παραμόρφωσης που εμφανίζονται σε ψαμμίτες υψηλού πορώδους είναι μερικά παραδείγματα των διαφόρων μορφών φυσικών ρηγμάτων. Οι επιπτώσεις των ρηγμάτων στη ροή ρευστών και τη γεωλογική σταθερότητα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο τους (Huang et al., 2023).

Τα πετρώματα αντιδρούν στην καταπόνηση (θλίψη ή εφελκυσμό) κοντά στην επιφάνεια της Γης με αποτέλεσμα τη διάρρηξη τους. Όταν τα πετρώματα σπάνε και δεν υπάρχει μετατόπιση κατά μήκος είτε της μίας είτε της άλλης πλευράς του σπασίματος, το σπάσιμο ονομάζεται ρωγμή ή αρμός. Τα πετρώματα μπορούν επίσης να σπάσουν ως αποτέλεσμα της θερμικής διαστολής και συστολής, της επίδρασης των υγρών που παγώνουν ή όταν τα πετρώματα συμπιέζονται ή απομακρύνονται το ένα

από το άλλο. Όταν τα πετρώματα κινούνται το ένα μακριά από το άλλο κατά μήκος της επιφάνειας της ρωγμής, αυτό ονομάζεται ρήγμα. Οι επιφάνειες ρηγμάτων είναι συχνά σχεδόν επίπεδες και αυτή η επίπεδη επιφάνεια αναφέρεται ως «επιφάνεια ρήγματος».

Υπάρχουν τέσσερις τύποι ρηγμάτων – κανονικό, ανάστροφο, οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης και λοξό. Ένα κανονικό ρήγμα είναι εκείνο στο οποίο τα πετρώματα πάνω από την επιφάνεια του ρήγματος, ή το υπερκείμενο τέμαχος, κινούνται προς τα κάτω σε σχέση με τα πετρώματα κάτω από την επιφάνεια του ρήγματος, ή το υποκείμενο τέμαχος. Ένα ανάστροφο ρήγμα είναι εκείνο στο οποίο το υπερκείμενο τέμαχος κινείται προς τα πάνω σε σχέση με το υποκείμενο τέμαχος (Εικόνα 2.1). Όταν τα πετρώματα στις δύο πλευρές ενός σχεδόν κάθετου ρήγματος κινούνται οριζόντια, η κίνηση ονομάζεται οριζόντια ολίσθηση. Ένα λοξό ρήγμα είναι ένας ειδικός τύπος ρήγματος που σχηματίζεται όταν η κίνηση δεν είναι ακριβώς παράλληλη με την επιφάνεια του ρήγματος. Η λοξή κίνηση συμβαίνει όταν τα κανονικά ή αντίστροφα ρήγματα έχουν κάποια οριζόντια κίνηση και όταν τα οριζόντια ρήγματα έχουν είτε κάποια κανονική είτε αντίστροφη κίνηση.



Εικόνα 2.8: Τύποι Σεισμικών Ρηγμάτων, (Philippine Institute of Volcanology and Seismology, 2024).

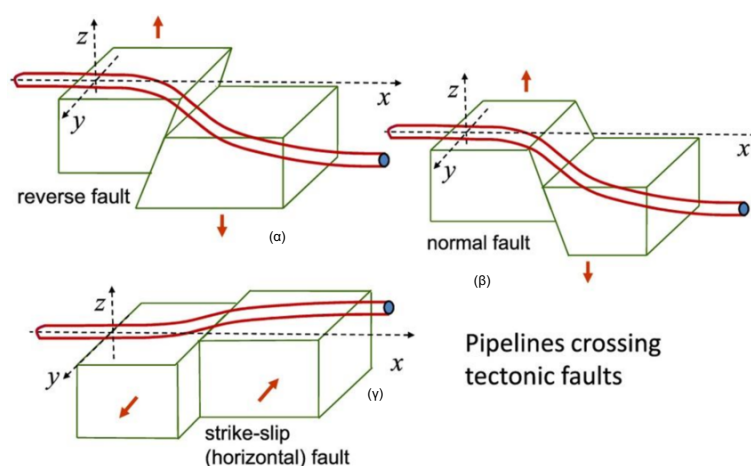
Συνήθως, διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων ή χαρακτηριστικά πετρωμάτων (όπως φλέβες χαλαζία, στρώματα ορυκτών ή κλίνες) είναι σπασμένα και μετατοπισμένα κατά μήκος της επιφάνειας του ρήγματος. Τα ρήγματα συνήθως γίνονται αντιληπτά από θραύσματα, που σχηματίζονται όταν υπάρχει κίνηση κατά μήκος της επιφάνειας του ρήγματος. Η τριβή του πετρώματος κατά μήκος της επιφάνειας του ρήγματος μπορεί επίσης να παράγει ένα αργιλώδες, θρυμματισμένο πέτρωμα (gouge). Συχνά, όταν η επιφάνεια του ρήγματος είναι εκτεθειμένη, φαίνονται αυλακώσεις, ραβδώσεις και

ασύμμετρες ρωγμές (slickensides) που παρέχουν οπτική απόδειξη της κίνησης του εδάφους.

Με την πάροδο του χρόνου, η έρευνα των ρηγμάτων έχει εξελιχθεί, επιλέγοντας προσεγγίσεις αιχμής, όπως πειραματικές μεθοδολογίες, αριθμητική μοντελοποίηση και αριθμητική ανάλυση. Αυτές οι μέθοδοι βελτιώνουν την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι περιβάλλοντες γεωλογικοί σχηματισμοί αλληλεπιδρούν με τη μηχανική των ρωγμών. Η αξιολόγηση των γεωκινδύνων που σχετίζονται με τις κατολισθήσεις και τις καταπτώσεις βράχων εξαρτάται επίσης από την αξιολόγηση των ρηγμάτων, επειδή η αστοχία κατά μήκος αυτών των επιπέδων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά γεγονότα (Chen et al., 2015).

Η ακεραιότητα των αγωγών αναφορικά με τους σεισμικούς γεωκινδύνους είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα επίπεδα συνεκτικότητας του εδάφους στο οποίο βρίσκονται θαμμένοι. Επομένως, η κατάλληλη μελέτη του εδαφικού περιβάλλοντος είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς έναντι των εδαφικών μετατοπίσεων (Monroy-Concha, 2014).

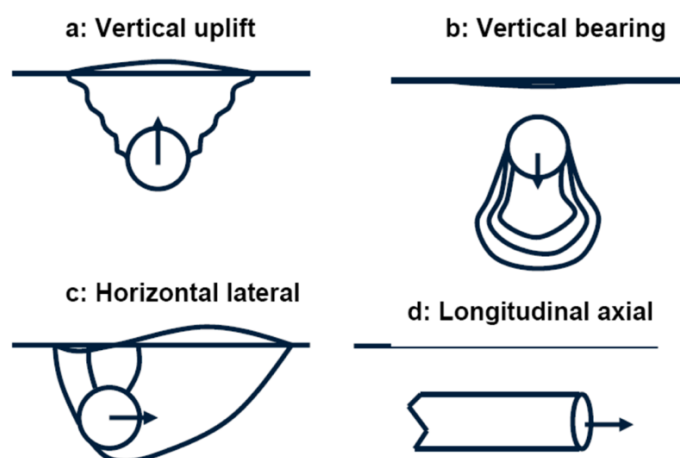
Ένα σεισμικό ρήγμα χαρακτηρίζεται βάσει των κινήσεων του κατά μήκος της γραμμής ή της κλίσης του εδάφους. Ανάλογα με τον τύπο του ρήγματος προκύπτουν και διαφορετικοί τρόποι συγκράτησης μεταξύ του εδάφους και του αγωγού και σύμφωνα με αυτό γίνεται και η αντίστοιχη κατανομή φορτίων και τάσεων στα τμήματα του αγωγού. Οι παραπάνω παράμετροι εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του αγωγού σε σχέση με την εδαφική μετατόπιση, το μέγεθος της εδαφικής μετατόπισης αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος κατά μήκος του αγωγού. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται οι τυπικές παραμορφώσεις αγωγών στους βασικούς τύπους ρηγμάτων.



Εικόνα 2.9: Τυπικές παραμορφώσεις αγωγών στους τρεις τύπους ρηγμάτων (α) ανάστροφο (β) κανονικό (γ) πλάγιας ολίσθησης, (Akram et. al., 2020).

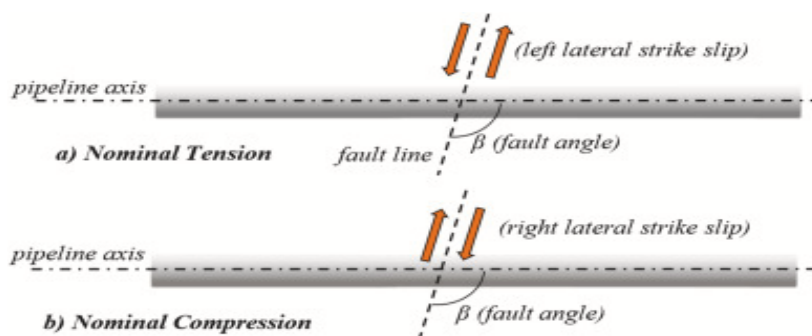
Οι διαφορετικές δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό από το έδαφος και ουσιαστικά αντιστέκονται στην μετακίνηση ή την παραμόρφωση του αγωγού λόγω των

εδαφικών μετατοπίσεων που προκαλούνται από τους γεωκινδύνους, ταξινομούνται σύμφωνα με την φύση και κατεύθυνση της μετατόπισης αυτής όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10: Επίδραση εδάφους σε αγωγούς λόγω διαφορετικών κατευθύνσεων της σχετικής κίνησης, (ASCE, 1984); (PRCI 2004, 2009).

Οι πιο σοβαρές ζημιές σε υποδομές αγωγών οφείλονται κυρίως σε αιφνίδιες παραμορφώσεις του εδάφους, από διάφορους μηχανισμούς όπως κανονικά ρήγματα, ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ή ανάστροφα ρήγματα, και στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις σύμφωνα με τον Kaya (2024) προκαλούνται λόγω θραύσης εφελκυσμού στο τοίχωμα του αγωγού. Ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις συμπίεσης του αγωγού όπως φαίνεται στο σχήμα:



Εικόνα 2.11: Σχηματική απεικόνιση της γραμμής του ρήγματος και του άξονα του αγωγού που διασταυρώνεται, με αποτέλεσμα: α) εφελκυστική τάση και β) θλιπτική τάση, (Kaya, 2024).

Συμπερασματικά, τα ρήγματα αποτελούν σημαντικό μέρος των γεωκινδύνων που επηρεάζουν τις γεωλογικές διεργασίες καθώς και την ανθρώπινη δραστηριότητα. Η έρευνά τους είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της εξόρυξης πόρων, τη διασφάλιση της ασφάλειας των υποδομών και τον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με τους φυσικούς κινδύνους. Με την κατανόηση των περιπλοκών των ρωγμών, οι ερευνητές και οι μηχανικοί μπορούν να βελτιώσουν την ικανότητά τους να προβλέπουν πώς θα συμπεριφέρονται κάτω από διαφορετικά σενάρια καταπόνησης,

οδηγώντας στην ανάπτυξη πιο ανθεκτικών σχεδίων σε περιοχές με ενεργές γεωλογικές διεργασίες.

2.4.1.2 Κατολισθήσεις

Οι κατολισθήσεις αποτελούν μείζονα γεωλογικό κίνδυνο και προκαλούνται από την ταχεία μετακίνηση βράχων, γαιών ή συντριμμιών σε μια πλαγιά. Μπορούν να εμφανιστούν σε διάφορα περιβάλλοντα, αλλά είναι πιο συχνές σε ορεινά και απότομα επικλινή μέρη. Οι κατολισθήσεις προκαλούνται κυρίως από την έλξη της βαρύτητας έναντι των αντίθετων δυνάμεων μιας πλαγιάς, η οποία συχνά επιδεινώνεται από εξωτερικές μεταβλητές, όπως η έντονη βροχή, η σεισμική δραστηριότητα, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και η ανθρώπινη δραστηριότητα (U.S. Geological Survey, 2024).

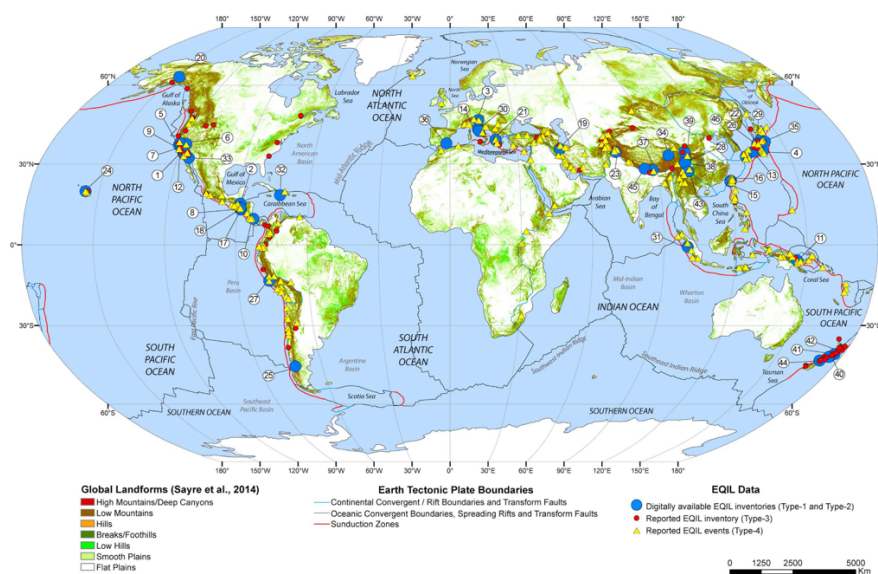
Οι έντονες βροχοπτώσεις είναι μία από τις φυσικές αιτίες των κατολισθήσεων, επειδή προκαλούν κορεσμό του εδάφους και αυξάνουν την πίεση του νερού των πόρων, γεγονός που δημιουργεί αστάθεια. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η διάβρωση του εδάφους. Όταν τα φυτά και το έδαφος εξαφανίζονται, οι δυνάμεις συνοχής που συγκρατούν τα υλικά μεταξύ τους εξασθενούν και τα πρηνή γίνονται πιο επιρρεπή σε κατάρρευση. Μέσω της αποσταθεροποίησης των πλαγιών και του κουνήματος των χαλαρών επιφανειακών υλικών, οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις. Η τέφρα και άλλα συντρίμια από ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να συσσωρευτούν στις πλαγιές, προσθέτοντας βάρος και δημιουργώντας αστάθεια (National Geographic Society, 2024).

Οι κατολισθήσεις είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας σε μεγάλες ποσότητες. Η απομάκρυνση της βλάστησης που σταθεροποιεί το έδαφος λόγω της αποψίλωσης των δασών αυξάνει τον κίνδυνο κατολισθήσεων και διάβρωσης. Μέσω της αφαίρεσης της στήριξης ή της τροποποίησης των προτύπων αποστράγγισης, οι κατασκευαστικές εργασίες, όπως η διάνοιξη δρόμων και οι εκσκαφές, μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια των πρηνών. Επιπλέον, τα ακραία καιρικά φαινόμενα που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή έχουν αυξήσει τη συχνότητα και την ένταση των βροχοπτώσεων που μπορούν να προκαλέσουν κατολισθήσεις (Islam & Islam, 2018).

Με βάση τον τρόπο με τον οποίο κινούνται, οι κατολισθήσεις μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες. Αυτές περιλαμβάνουν τις ανατροπές, κατά τις οποίες το υλικό γέρνει προς τα εμπρός, τις πτώσεις, κατά τις οποίες το υλικό κατεβαίνει από ένα ύψος, τις ολισθήσεις, κατά τις οποίες το υλικό ταξιδεύει προς τα κάτω πάνω σε μια καθορισμένη επιφάνεια, και τις ροές, κατά τις οποίες το υλικό κατεβαίνει μια πλαγιά με τρόπο που μοιάζει με ρευστό. Κάθε ποικιλία δημιουργεί ξεχωριστές δυσκολίες παρατήρησης και αντιμετώπισης (British Geological Survey, 2021).

Οι κατολισθήσεις μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες. Θέτουν σε κίνδυνο τόσο την ανθρώπινη ζωή όσο και την περιουσία, οδηγώντας συχνά σε θανάτους και μεγάλες οικονομικές απώλειες ως αποτέλεσμα της καταστροφής ζωτικών υποδομών όπως κτίρια, γέφυρες και αυτοκινητόδρομοι. Εκτός από τον εκτοπισμό κοινοτήτων και την παρεμπόδιση των μεταφορών, οι κατολισθήσεις μπορούν να έχουν μακροπρόθεσμες αρνητικές κοινωνικές επιπτώσεις. Μπορούν επίσης να αλλάξουν τα οικοσυστήματα και τα φυσικά τοπία, γεγονός που μπορεί να έχει αντίκτυπο στους οικοτόπους και τα υδατορέματα (Sim et al., 2022).

Εν κατακλείδι, η δημιουργία επιτυχημένων σχεδίων μετριασμού και πρόληψης προϋποθέτει τη βαθιά κατανόηση της προέλευσης και των επιπτώσεων των κατολισθήσεων. Οι κοινωνίες μπορούν να προετοιμαστούν αποτελεσματικότερα για αυτόν τον φυσικό κίνδυνο και να ανταποκριθούν σε αυτόν, θέτοντας σε εφαρμογή συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, βελτιώνοντας τις διαδικασίες σχεδιασμού των χρήσεων γης και αυξάνοντας την κατανόηση της κοινότητας για τους κινδύνους των κατολισθήσεων.

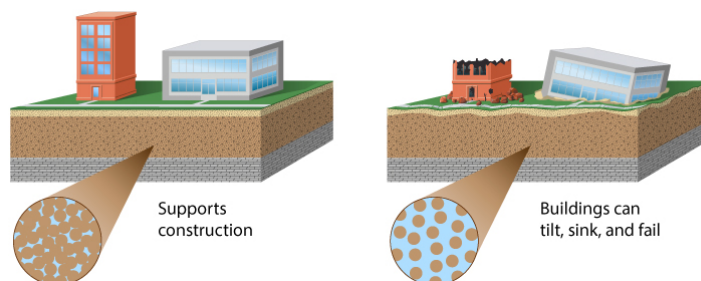


Εικόνα 2.12: Κατολισθήσεις που προέρχονται από σεισμική δραστηριότητα στον παγκόσμιο χάρτη, (Li, McGuire, & Eppes, 2018).

2.4.1.3 Ρευστοποίηση εδάφους

Ένα γεωτεχνικό φαινόμενο γνωστό ως «ρευστοποίηση του εδάφους» συμβαίνει όταν το κορεσμένο έδαφος γίνεται λιγότερο άκαμπτο και ισχυρό όταν ασκείται πίεση, συνήθως κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας. Λόγω αυτής της απώλειας αντοχής, το έδαφος συμπεριφέρεται περισσότερο σαν υγρό παρά σαν στερεό, γεγονός που παραμορφώνει σημαντικά το έδαφος και θέτει σε κίνδυνο τις υποδομές και τα

κτίρια. Η άμμος και η ιλύς είναι παραδείγματα χαλαρών, κοκκωδών εδαφών κορεσμένων σε νερό, όπου συνήθως λαμβάνει χώρα η διαδικασία αυτή. Αυτά τα εδάφη είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε ρευστοποίηση όταν φορτίζονται ξαφνικά (IADC Dredging, 2019).

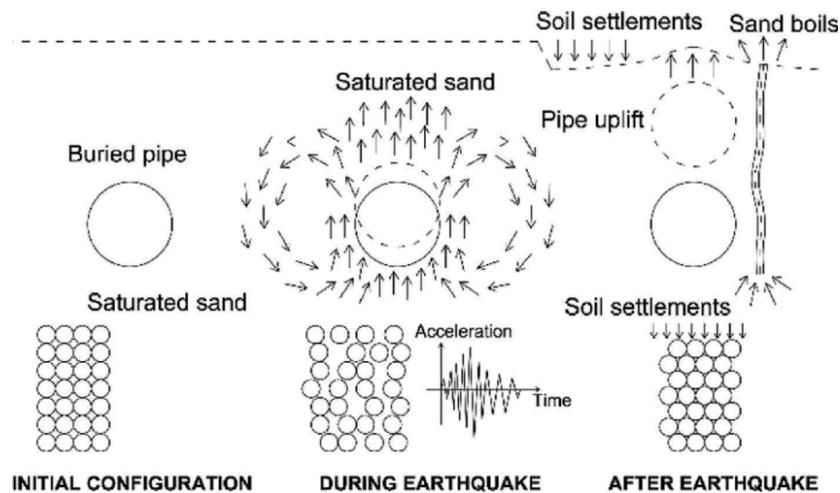


Εικόνα 2.13: Κατάρρευση κτιρίου λόγω ρευστοποίησης του εδάφους, (Southwest Research Institute, 2018).

Η σεισμική δόνηση είναι η κύρια αιτία ρευστοποίησης του εδάφους, επειδή αυξάνει την πίεση του νερού των πόρων στο έδαφος. Η πίεση των πόρων της γης μπορεί να αυξηθεί ως αποτέλεσμα της συμπύκνωσης και αναδιάταξης των εδαφικών σωματιδίων καθώς τα σεισμικά κύματα κινούνται μέσα στη γη, γεγονός που μειώνει τη συνεκτικότητα του εδάφους. Αυτή η πίεση των πόρων μπορεί να προκαλέσει την απώλεια της ικανότητας του εδάφους να στηρίζει το βάρος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα όπως η κλίση κτιρίων, η βύθιση, ακόμη και η ολική δομική αστοχία (Ben-Zeev et al., 2023).

Η ρευστοποίηση του εδάφους μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Η εκτεταμένη ρευστοποίηση μετά από μεγάλους σεισμούς, όπως αυτοί που έπληξαν το Κόμπε της Ιαπωνίας και το Κράιστσερτς της Νέας Ζηλανδίας, προκάλεσε σημαντικές ζημιές σε κτίρια και υποδομές. Η κατάρρευση του υποκείμενου εδάφους μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνη κλίση των κατασκευών ή ανομοιόμορφη καθίζηση. Οι υπόγειες εγκαταστάσεις κοινής ωφέλειας, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών, μπορούν επίσης να σπάσουν ή να στραβώσουν, διακόπτοντας ζωτικές υπηρεσίες όπως η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και νερού (Broder & Tucker, 2012).

Εξαιτίας της ρευστοποίησης του εδάφους, μπορεί να προκληθεί ανύψωση των υπόγειων υποδομών (π.χ., σύστημα χερσαίων αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου) λόγω της δύναμης άνωσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Castiglia, Santucci de Magistris, & Koseki, 2019). Πολλές περιπτώσεις ανύψωσης θαμμένων αγωγών έχουν αναφερθεί σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης του εδάφους.



Εικόνα 2.14: Ανύψωση χερσαίου αγωγού λόγω ρευστοποίησης του εδάφους μετά από σεισμό, (Castiglia, Santucci de Magistris, and Koseki, 2019).

Πολλές τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη μείωση των κινδύνων ρευστοποίησης του εδάφους. Η επιλογή της τοποθεσίας είναι καθοριστικής σημασίας, και πριν από την έναρξη της οικοδόμησης, θα πρέπει να εκπονηθούν ολοκληρωμένες γεωτεχνικές μελέτες για την αξιολόγηση των εδαφικών συνθηκών. Η συμπύκνωση και η πλήρωση των κενών είναι δύο παραδείγματα μεθόδων βελτίωσης του εδάφους που μπορούν να βελτιώσουν τη σταθερότητα του εδάφους ενισχύοντας τη συνεκτικότητα ή την πυκνότητα. Με τη δημιουργία αποτελεσματικών συστημάτων αποστράγγισης, μπορεί κανείς να ελέγξει τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων και να μειώσει τη συσσώρευση πίεσης πόρων κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας (Katsuumi et al., 2024).

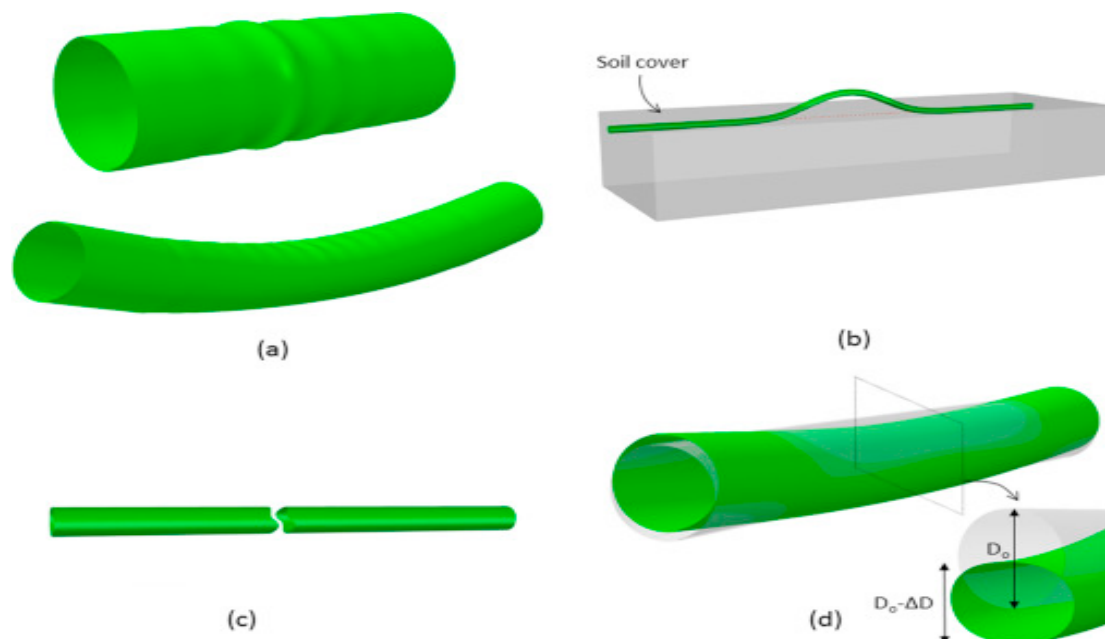
Εν κατακλείδι, η γνώση του τρόπου λειτουργίας της ρευστοποίησης του εδάφους είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ανθεκτικότητας των υποδομών και της δημόσιας ασφάλειας σε σεισμικά ενεργά μέρη. Προκειμένου να βελτιωθεί η ετοιμότητα της κοινότητας και να μειωθούν οι πιθανές ζημιές από μελλοντικές σεισμικές εκδηλώσεις, θα είναι ζωτικής σημασίας να προχωρήσει η έρευνα σχετικά με τους μηχανισμούς ρευστοποίησης και τις τεχνικές μετριασμού, καθώς η αστική ανάπτυξη προχωρά σε ευαίσθητα μέρη.

2.4.2 Παραδείγματα αστοχιών σε αγωγούς υδρογόνου

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενός δικτύου υπόγειων χαλύβδινων αγωγών πρέπει αρχικά να εντοπιστούν οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας μετά από ένα σεισμικό φαινόμενο. Στη συνέχεια καθορίζονται τα κατάλληλα κριτήρια σχετικά με την απόδοση του αγωγού και επιλέγεται η αποτελεσματικότερη μεθοδολογία. Σύμφωνα με τους Psyrras and Sextos (2018) οι δύο κυριότερες μορφές αστοχίας των αγωγών είναι αυτή που περιλαμβάνει αγωγούς που συναρμολογούνται με τεχνικές συγκόλλησης, όπου οι συγκολλήσεις είναι εξίσου ισχυρές ή ισχυρότερες από τους ίδιους τους αγωγούς. Η

δεύτερη μορφή αφορά αγωγούς στους οποίους, οι συνδέσεις γίνονται μέσω μηχανικών αρμών, που λόγω της χαμηλότερης αντοχής τους αστοχούν.

Διακρίνονται πέντε τύποι αστοχιών σε αγωγούς όπως αυτοί που μεταφέρουν φυσικό αέριο (ή υδρογόνο) που προκαλούνται από παραμορφώσεις του εδάφους: λυγισμός τύπου κελύφους, λυγισμός τύπου δοκού, καθαρή θραύση λόγω εφελκυσμού, αστοχία κάμψης, ωοειδής παραμόρφωση διατομής (Psyrras & Sextos, 2018).



Εικόνα 2.15: Κύριοι μηχανισμοί αστοχίας σε θαμμένους συνεχείς χαλύβδινους αγωγούς (λυγισμός τύπου κελύφους λόγω ομοιόμορφης αξονικής συμπίεσης πάνω και καθαρής κάμψης κάτω (β) λυγισμός τύπου δοκού (γ) θραύση λόγω εφελκυσμού και (δ) ωοειδής παραμόρφωση διατομής. (Psyrras and Sextos ,2018).

Οι δυσλειτουργίες των αγωγών υδρογόνου μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλους κινδύνους για την ασφάλεια, όπως διαρροές, εκρήξεις και δομικές καταρρεύσεις. Η ψαθυροποίηση του υλικού λόγω του υδρογόνου, είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Το προαναφερθέν φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις, υπογραμμίζοντας τις ευαισθησίες των σημερινών υλικών αγωγών σε περιβάλλοντα πλούσια σε υδρογόνο. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η καταστροφική αστοχία βαλβίδων από ανοξείδωτο χάλυβα σε σύστημα φόρτισης υδρογόνου ως αποτέλεσμα της ψαθυροποίησης από υδρογόνο. Τα ελατήρια αυτών των βαλβίδων αστόχησαν εντελώς, καθιστώντας τις άχρηστες και απαιτώντας σημαντικές επισκευές (Sobola & Dallaev, 2024).

Ένα άλλο αξιοσημείωτο περιστατικό ήταν η έκρηξη που προκλήθηκε από λανθασμένη εφαρμογή βαλβίδας κατά τη διάρκεια διαρροής υδρογόνου σε εγκατάσταση αποθήκευσης. Διαπιστώθηκε ότι η παραδοσιακή σφαιρική βαλβίδα που ήταν υπεύθυνη για τη διαρροή είχε σχεδιαστεί εσφαλμένα για χρήση υδρογόνου. Το γεγονός αυτό ανέδειξε την ανάγκη για εξειδικευμένα εξαρτήματα που κατασκευάζονται

για τη διαχείριση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του υδρογόνου, όπως η τάση του να διαρρέει και να παίρνει γρήγορα φωτιά (WHA International, Inc., 2023).

Επίσης, η έρευνα έδειξε ότι η ανάμιξη υδρογόνου με φυσικό αέριο σε ήδη υπάρχοντες αγωγούς μπορεί να επιδεινώσει τα ποσοστά διαρροής και να αυξήσει τον κίνδυνο αστοχίας. Επειδή το υδρογόνο έχει μικρότερα μόρια από το μεθάνιο, μπορεί να γλιστρήσει πιο εύκολα μέσα από μικροσκοπικές ρωγμές στο υλικό και να προκαλέσει το φαινόμενο της ψαθυροποίησης του χάλυβα, γεγονός που εγείρει ερωτήματα σχετικά με την ασφάλεια των αγωγών που δεν προορίζονταν για τη μεταφορά υδρογόνου (WHA International, Inc., 2023).

Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τους αγωγούς υδρογόνου επιδεινώνονται από εξωγενείς μεταβλητές όπως η σεισμική δραστηριότητα. Για παράδειγμα, η δόνηση του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού μπορεί να προκαλέσει ρήξεις αγωγών και επακόλουθες διαρροές. Ιστορικά περιστατικά έχουν δείξει ότι οι υπόγειοι αγωγοί, ιδίως εκείνοι που μεταφέρουν υδρογόνο, μπορούν να υποστούν σημαντικές ζημιές από την ρευστοποίηση του εδάφους κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε διαρροές αερίου και πυρκαγιές (Toprak & Taskin, 2006).

Συμπερασματικά, καθώς αυξάνεται η χρήση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας, οι σοβαρές ανησυχίες για την ασφάλεια αναδεικνύονται από τα ατυχήματα σε αγωγούς που χρησιμοποιούν υδρογόνο. Η διασφάλιση της ασφαλούς μεταφοράς υδρογόνου στα σημερινά και μελλοντικά συστήματα αγωγών απαιτεί την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν αυτές τις αστοχίες, όπως η ευθραυστότητα και η διαρροή υδρογόνου, καθώς και την εφαρμογή ισχυρών μέτρων ασφαλείας και τη χρήση κατάλληλων υλικών.

Η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών είναι σχετικά νέα τεχνολογία και μέχρι σήμερα δεν έχουν καταγραφεί σημαντικές περιπτώσεις αστοχίας αγωγών υδρογόνου λόγω γεωκινδύνων. Ωστόσο η εμπειρία από τους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων, όπως το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο μπορούν να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των κινδύνων. Οι γεωκίνδυνοι που αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν σημαντικές απειλές για την ακεραιότητα των αγωγών.

Πρόσφατοι σεισμοί έχουν προκαλέσει ζημιές στις υποδομές δικτύων αγωγών μεταφοράς ενέργειας. Η ζημιά ή η διακοπή λειτουργίας των θαμμένων αγωγών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά καθώς οι επιπτώσεις αφορούν πολιτικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς τομείς. Ο σεισμός Hyogo-Ken Nanbu το 1995 στην Ιαπωνία αποτελεί ένα σημαντικό παράδειγμα. Αναφέρθηκε ότι μετά τον σεισμό μεγέθους 6.9 ρίχτερ στην περιοχή Κόμπε - Οσάκα της Ιαπωνίας, σημειώθηκαν διαρροές αερίου σε αγωγούς σε 234 διαφορετικά σημεία. Στη συνέχεια ακολούθησαν πυρκαγιές, κυρίως λόγω των

διαρροών αερίου και των σπινθήρων από την ηλεκτρική ενέργεια. Οι πυρκαγιές εκδηλώθηκαν σε 531 διαφορετικά σημεία και οι καμένες περιοχές ξεπέρασαν το 1 km² (Lee, Kim, Lee, & Kong, 2009).



Εικόνα 2.16: Αστοχίες αγωγών μετά από σεισμό, (Raveshi and Noorzad (2023)).

Αντίστοιχα ο σεισμός Chi – Chi το 1999 μεγέθους 6.8 ρίχτερ στην Ταιβάν προκάλεσε σοβαρές ζημιές στα συστήματα παροχής φυσικού αερίου. Περισσότεροι από 100.000 άνθρωποι στην πληγείσα περιοχή έμειναν χωρίς παροχή φυσικού αερίου μετά τον σεισμό, ενώ η εκτιμώμενη οικονομική ζημιά για πέντε μεγάλες εταιρίες παροχής φυσικού αερίου ανήλθε περίπου στα 25 εκατομμύρια δολάρια σύμφωνα με τους Lee, Kim, Lee, and Kong (2009). Οι εδαφικές παραμορφώσεις εξαιτίας του σεισμού ήταν τεράστιας κλίμακας όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.17.



Εικόνα 2.17: Παραμόρφωση εδάφους - Σεισμός Chi-Chi Ταιβάν, (Tectonics Observatory (2024))

Ακόμα μια πιο πρόσφατη περίπτωση είναι ο σεισμός 7.8 ρίχτερ που έπληξε την περιοχή Καχραμανμαράς, της Τουρκίας, τον Φεβρουάριο του 2023 και προκάλεσε

σοβαρές ζημιές στις ενεργειακές υποδομές της χώρας, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών φυσικού αερίου. Ειδικότερα σημειώθηκαν εκρήξεις στον αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου Καχραμανμαρας – Γκαζιαντέπ, προκαλώντας διακοπή της παροχής αερίου στις γύρω πόλεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι αγωγοί μεταφοράς νερού υπέστησαν αντίστοιχες ζημιές (Uçkan, Aksel, Atas, Toprak, & Kaya, 2024). Στους αγωγούς φυσικού αερίου οι ζημιές οφείλονται σε μόνιμες παραμορφώσεις του εδάφους. Σε πολλές περιπτώσεις σημειώθηκαν ρήξεις και τοπικές καμπυλώσεις παρά την υψηλή ελαστικότητα των αγωγών όπως φαίνεται στην εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18: Αγωγοί φυσικού αερίου μετά από διασταύρωση με ρήγμα μετά από τον σεισμό στην Τουρκία το 2023, (Uçkan, Aksel, Atas, Toprak, and Kaya, 2024).



Εικόνα 2.19 Αστοχία αγωγών λόγω ρευστοποίησης του εδάφους στο Γκιούλμπασι, (Uçkan, Aksel, Atas, Toprak, and Kaya, 2024).

2.2. Κανονιστικά πλαίσια σε αγωγούς υδρογόνου

Τα αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια σε αγωγούς υδρογόνου είναι απαραίτητα για την εγγύηση της ασφάλειας και της λειτουργικής ακεραιότητας καθώς η οικονομία του υδρογόνου αναπτύσσεται. Το ρυθμιστικό περιβάλλον για τους αγωγούς υδρογόνου στις ΗΠΑ είναι επί του παρόντος ασύνδετο και στερείται ενός ενιαίου, ολοκληρωμένου πλαισίου. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Ρύθμισης Ενέργειας (FERC) μπορεί να είναι σε θέση να ρυθμίζει τους διαπολιτειακούς αγωγούς υδρογόνου βάσει ορισμένων νόμων, όπως ο νόμος περί φυσικού αερίου, αλλά δεν υπάρχει καμία νομοθεσία που να στοχεύει ειδικά στη μεταφορά υδρογόνου. Για τους φορείς εκμετάλλευσης αγωγών και τους προγραμματιστές που προσπαθούν να διαπραγματευτούν το ρυθμιστικό τοπίο και ταυτόχρονα να εγγυηθούν τη δημόσια ασφάλεια, αυτή η ρυθμιστική αβεβαιότητα παρουσιάζει δυσκολίες (Energy Journal, 2024)

Από το 1970, η Διοίκηση Ασφάλειας Αγωγών και Επικίνδυνων Υλικών (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration - PHMSA) είναι υπεύθυνη για τη διασφάλιση της ασφάλειας των αγωγών υδρογόνου μέσω της εφαρμογής των «Ελάχιστων ομοσπονδιακών προτύπων ασφαλείας για τη μεταφορά φυσικού και άλλου αερίου μέσω αγωγών». Οι περιορισμοί αυτοί ισχύουν κυρίως για το φυσικό αέριο και κατατάσσουν το υδρογόνο ως εύφλεκτο αέριο. Ως εκ τούτου, πρέπει να ακολουθούνται διαφορετικά κριτήρια ασφαλείας όσον αφορά τα υλικά, τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση. Η PHMSA γνωρίζει ότι χρειάζονται νέοι κανόνες για να αντιμετωπιστούν τα ιδιαίτερα προβλήματα που παρουσιάζει το υδρογόνο, όπως το μεγαλύτερο εύρος ευφλεκτότητας σε σχέση με το φυσικό αέριο και η τάση του να προκαλεί ευθραυστότητα των μετάλλων.

Η Διοίκηση Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία (OSHA) εποπτεύει επίσης την PHMSA όσον αφορά τη ρύθμιση των συστημάτων αερίου και υγροποιημένου υδρογόνου στις εγκαταστάσεις των πελατών. Η σύγκλιση των διαφόρων ρυθμιστικών οργανισμών υπογραμμίζει την αναγκαιότητα συντονισμένων προσπαθειών από ομοσπονδιακούς οργανισμούς, επιχειρηματικούς εταίρους και κρατικές αρχές για τη δημιουργία ενιαίων προτύπων ασφαλείας που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες της μεταφοράς υδρογόνου. Ζητείται από τους νομοθέτες να διασφαλίσουν ότι οι νέοι κανονισμοί θα αντιμετωπίζουν επαρκώς τους κινδύνους που σχετίζονται με την ανάμειξη του υδρογόνου στην τρέχουσα υποδομή φυσικού αερίου, αποφεύγοντας παράλληλα την επικάλυψη κανονιστικών ρυθμίσεων.

Σε διεθνές επίπεδο, ορισμένα κράτη προσπαθούν να δημιουργήσουν πλαίσια για αγωγούς μεταφοράς υδρογόνου. Για παράδειγμα, η Ευρώπη καταβάλλει προσπάθειες για τη δημιουργία ενός κοινού ρυθμιστικού πλαισίου για τη μεταφορά υδρογόνου

μεταξύ των κρατών μελών της. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η διασυννοριακή λειτουργικότητα, το έργο European Hydrogen Backbone προβλέπει ένα τεράστιο δίκτυο αγωγών υδρογόνου που θα απαιτεί ενοποιημένους κανόνες.

Είναι επίσης ζωτικής σημασίας να δημιουργηθούν ακριβή κριτήρια για τις συμφωνίες που αφορούν τη μεταφορά υδρογόνου. Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι διατάξεις για καταστάσεις ανωτέρας βίας, οι απαιτήσεις ποιότητας αερίου για τη διατήρηση της ακεραιότητας του αγωγού και η κατανομή της ευθύνης σε περίπτωση διαρροών ή ατυχημάτων. Οι συμφωνίες αυτές θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι το υδρογόνο διαρρέει συχνότερα από το φυσικό αέριο, γεγονός που απαιτεί αυστηρότερες διαδικασίες συντήρησης και παρακολούθησης.

Συνοψίζοντας, η δημιουργία ισχυρών κανονιστικών πλαισίων για τους αγωγούς υδρογόνου είναι απαραίτητη για την προώθηση μιας ασφαλούς και παραγωγικής οικονομίας υδρογόνου. Το κλείσιμο των κενών στους ισχύοντες κανόνες θα είναι απαραίτητο για την εγγύηση της δημόσιας ασφάλειας και την επιτάχυνση της στροφής προς βιώσιμες ενεργειακές επιλογές, καθώς αναπτύσσεται το ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως καθαρή πηγή ενέργειας. Προκειμένου να διαμορφωθούν αυτά τα πλαίσια ώστε να ανταποκρίνονται στις μελλοντικές απαιτήσεις, η συνεχής συνεργασία μεταξύ των ρυθμιστικών φορέων, των ενδιαφερόμενων μερών της βιομηχανίας και των ερευνητών θα είναι ζωτικής σημασίας.

Κεφάλαιο 3 - Κανονισμοί αγωγών υδρογόνου

3.1 Κανονισμός ASME

Ο κανονισμός ASME B31.12 εφαρμόζεται σε αγωγούς μεταφοράς, αγωγούς διανομής και συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά υδρογόνου από μια εγκατάσταση παραγωγής στο σημείο τελικής χρήσης του προϊόντος. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού του κώδικα αποσκοπούν στην αντιμετώπιση των πιθανών ζητημάτων στη βιομηχανία μεταφοράς αέριου υδρογόνου. Ο κανονισμός καθορίζει απαιτήσεις σχετικά με τα υλικά, τα εξαρτήματα, τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των αγωγών. Για να εξασφαλιστεί η ομαλή μετατροπή ενός υφιστάμενου δικτύου μεταφοράς φυσικού αερίου σε δίκτυο μεταφοράς υδρογόνου ο κανονισμός προτείνει κάποιες βασικές οδηγίες. Αρχικά πραγματοποιείται αξιολόγηση του κινδύνου, αφού αξιολογηθούν και επιθεωρηθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τον αρχικό σχεδιασμό του αγωγού ιδιαίτερη σημασία δίνεται σε περιγραφές των υφιστάμενων υλικών, στις επικαλύψεις του αγωγού, στο επιτρεπτό ποσοστό υδρογόνου στον αγωγό, στην εσωτερική πίεση και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.

3.1.1 Ποσοστό ανάμειξης υδρογόνου με το φυσικό αέριο

Στη βιομηχανία δεν έχει αποσαφηνιστεί σε τι ποσοστό μπορεί να αναμειχθεί το υδρογόνο με το φυσικό αέριο για την ασφαλή μεταφορά του. Οι περισσότερες κατευθυντήριες γραμμές αναφέρονται σε μέγιστα επίπεδα της τάξης του 10 - 20% κατ' όγκο (Boukourt et al., 2018). Ωστόσο ο κώδικας ASME B31.12 δεν καθορίζει μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό ανάμειξης του υδρογόνου με άλλα αέριο, όπως το φυσικό αέριο.

3.1.2 Εσωτερική πίεση αγωγού

Ακόμη, ο κανονισμός, δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στην μέγιστη επιτρεπτή πίεση λειτουργίας (MAOP), η οποία καθορίζεται από τον τύπο σχεδιασμού χαλύβδινων σωληνώσεων και δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2200 psi (15.7 MPa). Σύμφωνα με τον κώδικα, η πιθανότητα ζημιάς στον αγωγό αυξάνεται σε τοποθεσίες με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κτιρίων, για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε μια μέθοδος αξιολόγησης επικινδυνότητας της γραμμής μεταφοράς ανάλογα με την κατηγορία της τοποθεσίας.

Η πίεση σχεδιασμού για συστήματα σωληνώσεων αερίου από χάλυβα ή το ονομαστικό πάχος τοιχώματος του αγωγού, για δεδομένη πίεση σχεδιασμού πρέπει να καθορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P = \frac{2St}{D} FETH_f \quad (3.1)$$

Όπου:

- D = εξωτερική διάμετρος του αγωγού,
- $E = 1.00$, συντελεστής διαμήκους συγκόλλησης, που λαμβάνεται από τον πίνακά του ASME 31.12
- $F = 0.50$, συντελεστής σχεδιασμού που εξαρτάται από τον έλεγχο θραύσης,
- H_f = συντελεστής απόδοσης υλικού από τον Πίνακα 3.2,
- P = πίεση σχεδιασμού, psi,
- S = καθορισμένη ελάχιστη αντοχή διαρροής, psi,
- $T = 1.00$, συντελεστής μείωσης θερμοκρασίας από σχετικό πίνακα,
- t = ονομαστικό πάχος τοιχώματος σε ίντσες.

Για τους υφιστάμενους αγωγούς φυσικού αερίου, που προορίζονται να μετατραπούν σε αγωγούς υδρογόνου, δίνονται οδηγίες από τον κώδικα σχετικά με την μέγιστη πίεση λειτουργίας ανάλογα με την κλάση της τοποθεσίας του αγωγού, αναφορικά με την πυκνότητα των κτιρίων που προορίζονται για ανθρώπινη χρήση, στην περιοχή. Ο κώδικας ASME B31.12, ορίζει απαιτήσεις αναφορικά με το πάχος του τοιχώματος των αγωγών και τη διάμετρο, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης λειτουργίας και τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση. Η επαρκής διάσταση του πάχους βοηθά στην αποφυγή των διαρροών και των αστοχιών.

3.1.3 Ποιότητα χάλυβα αγωγού

Η μέχρι σήμερα έρευνα, δείχνει να υπάρχει μια αβεβαιότητα όσον αφορά την σημασία της μικροδομής και της ποιότητας του χάλυβα σε σχέση με την ψαθυροποίηση του υλικού από το υδρογόνο. Σε γενικές γραμμές, επικρατεί μια ασάφεια σχετικά με την ποιότητα του χάλυβα που προτιμάται, αναφορικά με τη μεταφορά υδρογόνου, ωστόσο επικρατεί η άποψη πως οι χάλυβες με χαμηλότερη σκληρότητα ανταποκρίνονται καλύτερα σε συνθήκες υδρογόνου (Gallon, 2020). Ο κανονισμός ASME B31.12 επιτρέπει ρητά τη χρήση κατηγοριών μέχρι X80/L555 για υπηρεσίες μεταφοράς υδρογόνου, τονίζοντας ότι στη συγκεκριμένη επιλογή οι επιτρεπτές τάσεις, περιορίζονται σε τέτοιο βαθμό όπου η χρήση του υλικού έχει πολύ περιορισμένη αξία. Το προαιρετικό παράρτημα του ASME B31.12 δηλώνει ρητά ότι μόνο οι κατηγορίες μέχρι X52/L360 είναι εμπεριστατωμένα κατάλληλες για χρήση σε υπηρεσίες μεταφοράς αερίου υδρογόνου (ASME B31.12, 2008). Οι αγωγοί που επιλέγονται πρέπει να ελέγχονται ως προς την αντοχή τους σε φαινόμενα ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου καθώς ο συγκεκριμένος παράγοντας μπορεί να υποβαθμίσει την αντοχή του.

3.1.4 Αντοχή και ολκιμότητα αγωγού

Σύμφωνα με τον κώδικα, λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές ιδιότητες των αγωγών ανάλογα με την ποιότητα του αγωγού. Στην εξίσωση της πίεσης συμπεριλαμβάνεται ο όρος S, ο οποίος αφορά την καθορισμένη ελάχιστη αντοχή διαρροής, σε psi, όπως ορίζεται στις προδιαγραφές από τον κατασκευαστή ή όπως καθορίζεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Ελάχιστη τάση διαρροής για χαλύβδινους αγωγούς.

Specification No.	Grade	Type	SMYS, psi
API 5L	X52	ERW, S, DSA	52,000
	X65		65,000
	X80		80,000

Στον κανονισμό περιλαμβάνεται ένας «συντελεστής απόδοσης υλικών» (H_f) που αφορά την εξασθένηση της αντοχής, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του υδρογόνου. Με εξαίρεση συγκεκριμένες δοκιμές, οι συντελεστές εξαρτώνται από την ποιότητα του χάλυβα και παραμένουν σταθεροί για πιέσεις έως 2200 psig. Οι τιμές του συντελεστή επιλέγονται από τον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Συντελεστής απόδοσης υλικού αγωγού H_f .

Specified Min. Strength, ksi		System Design Pressure, psig						
Tensile	Yield	≤ 1000	2000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000
66 and under	≤ 52	1.0	1.0	0.954	0.910	0.880	0.840	0.780
Over 66 through 75	≤ 60	0.874	0.874	0.834	0.796	0.770	0.734	0.682
Over 75 through 82	≤ 70	0.776	0.776	0.742	0.706	0.684	0.652	0.606
Over 82 through 90	≤ 80	0.694	0.694	0.662	0.632	0.610	0.584	0.542

3.1.5 Επικάλυψη αγωγού

Έχει εδραιωθεί η άποψη ότι για να προκληθεί οποιαδήποτε μορφή ζημιάς από υδρογόνο στον χάλυβα, προϋποθέτει τη διείσδυση του στο υλικό. Ωστόσο, κατά τη μεταφορά του αέριου υδρογόνου αυτό μπορεί να συμβεί όπως περιγράφει ο νόμος του Sieverts, στην εσωτερική επιφάνεια του αγωγού. Αυτή η ιδιότητα, πρακτικά, εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε σημείο τις επιφάνειας του χάλυβα. Συνεπώς, κάθε επεξεργασία επιφάνειας ή επικάλυψη έχει αντίκτυπο στην λειτουργία μεταφοράς

υδρογόνου μέσω αγωγών. Σε γενικές γραμμές, η εσωτερική επιφάνεια του αγωγού μπορεί να υποστεί επεξεργασία και να εφαρμοστεί επένδυση στον αγωγό.

Ο κανονισμός ASME B31.12, κάνει αναφορά στις επικαλύψεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά ως φράγμα με σκοπό την αποφυγή της διάβρωσης από υγρό θειικό οξύ (H_2S) και κατ' επέκταση της ψαθυροποίησης του υλικού και σύμφωνα με αυτόν μπορεί να μετριάσει το φαινόμενο αυτό με τη χρήση οργανικής ή ανόργανης εσωτερικής επικάλυψης. Ωστόσο δεν παρέχεται συγκεκριμένη καθοδήγηση για το είδος των επικαλύψεων ή κάποια σχετική πρόβλεψη για την αναμενόμενη μείωση του προβλήματος. Ο κώδικας αναφέρει πως δεν υπάρχει αύξηση της επιτρεπτής τάσης του χάλυβα λόγω της παρουσίας της επένδυσης.

Αναφορικά με την εξωτερική επικάλυψη του αγωγού, στοχεύει κυρίως στην προστασία του αγωγού από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως από τη διάβρωση του αγωγού εξαιτίας της υγρασίας του εδάφους. Επιπλέον δεδομένου ότι ο αγωγός είναι εκτεθειμένος σε εξωτερικούς κινδύνους, η εξωτερική επικάλυψη προσφέρει επιπλέον αντοχή σε καταπονήσεις. Ωστόσο παρακάτω γίνεται λόγος, για αύξηση του συντελεστής τριβής ανάλογα με την επιλογή του υλικού της επικάλυψης.

3.1.6 Συγκολλήσεις

Οι συγκολλήσεις πρέπει να είναι ειδικά επεξεργασμένες για την μεταφορά υδρογόνου. Σύμφωνα με τον κώδικα, πρέπει να ελέγχονται για πιθανές μικρορωγμές και άλλες ατέλειες που θα μπορούσαν να επιδεινωθούν από τη διαπερατότητα του υδρογόνου. Οι συγκολλήσεις θα πρέπει να ελέγχονται σύμφωνα με τα πρότυπα του κανονισμού. Για χάλυβες οποιουδήποτε πάχους, απαιτείται προθέρμανση στους 80 °C πριν από τη συγκόλληση. Αυτό βοηθά στη μείωση του κινδύνου δημιουργίας ρωγμών κατά τη διάρκεια και μετά τη συγκόλληση. Μετά από τη συγκόλληση, είναι σημαντική η θερμική επεξεργασία του χάλυβα, έτσι ώστε να μειωθεί το υπόλοιπο εσωτερικό στρες στις συγκολλήσεις και να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ψαθυροποίησης.

3.1.7 Έλεγχος διαρροών - Συστήματα ασφαλείας και έλεγχοι πίεσης

Κατά την εγκατάσταση και πριν από την εκκίνηση, οι αγωγοί υδρογόνου πρέπει να ελεγχθούν για διαρροές με εξειδικευμένες μεθόδους, καθώς το υδρογόνο είναι δύσκολο να συγκρατηθεί λόγω την μικρής του μοριακής διαμέτρου. Ταυτόχρονα, η πίεση στους αγωγούς πρέπει να ελέγχεται συνεχώς για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, με συστήματα αυτόματης αποσυμπίεσης για την αποφυγή υπερβολικής πίεσης, που ενδεχομένως να οδηγήσει σε αστοχία. Οι αγωγοί

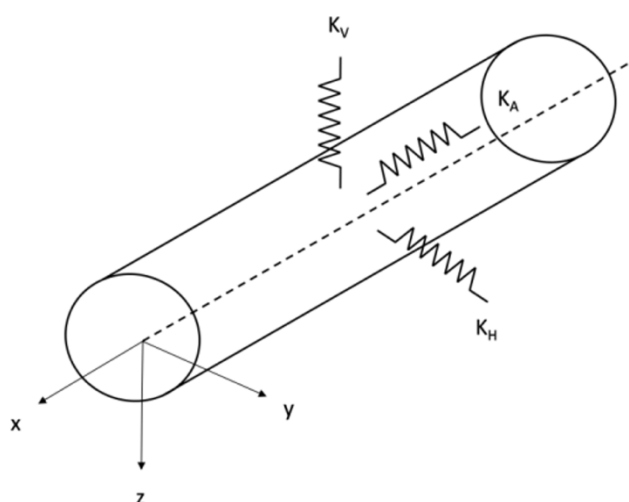
υδρογόνου απαιτούν τακτικές επιθεωρήσεις για να εντοπιστούν σημάδια διάβρωσης, φθοράς ή άλλων προβλημάτων.

3.2 Κανονισμός ALA

Ο κανονισμός ALA (American Lifelines Alliance) έχει αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές και βέλτιστες πρακτικές για την προστασία των υποδομών όπως αγωγοί και συστήματα μεταφοράς από φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, πλημμύρες και άλλοι κίνδυνοι. Σημαντικό έργο της ALA είναι οι κανονιστικές οδηγίες που παρέχει σχετικά με τον σχεδιασμό δικτύων χαλύβδινων αγωγών που θάβονται στο έδαφος, εστιάζοντας στην αντοχή τους απέναντι σε φυσικά φαινόμενα.

Η αναπαράσταση των εδαφικών ελατηρίων αναφέρεται στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του εδάφους και του αγωγού που είναι θαμμένος σε αυτό. Τα ελατήρια χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν την αντίσταση του εδάφους στις μετακινήσεις του αγωγού. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται συχνά στη μηχανική για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων που ασκούνται σε υπόγεια δίκτυα ή άλλες κατασκευές λόγω εξωτερικών παραγόντων όπως είναι οι σεισμικές δονήσεις.

Σύμφωνα με τον κανονισμό ALA η μετατόπιση του εδάφους αναπαρίσταται με τη μορφή δύναμης προς τον αγωγό και συγκεκριμένα, με διακεκριμένα αξονικά και πλευρικά μη γραμμικά ελατήρια. Από τις παρακάτω εξισώσεις υπολογίζονται οι μέγιστες δυνάμεις των ελατηρίων και οι αντίστοιχες απαραίτητες μετατοπίσεις ώστε να παραχθούν οι δυνάμεις αυτές. Για να υπολογιστούν οι αξονικές εδαφικές δυνάμεις των ελατηρίων χρειάζεται να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του εδάφους που γίνεται η επίχωση του αγωγού.

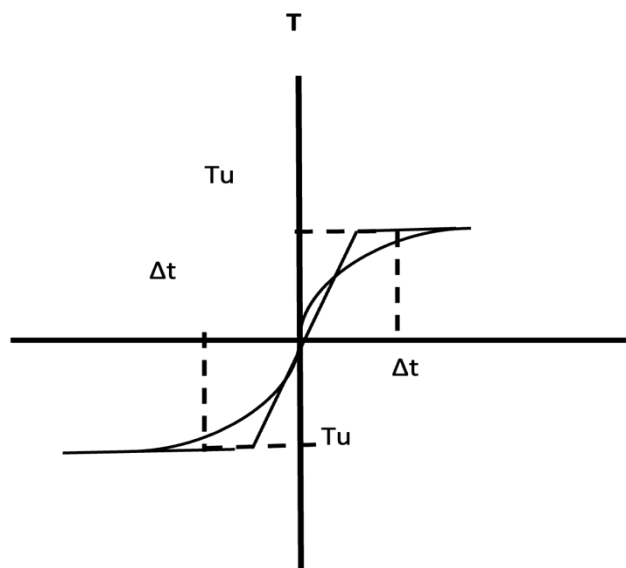


Εικόνα 3.1: Αναπαράσταση εδαφικών ελατηρίων στον αγωγό.

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης εδάφους - αγωγού λαμβάνει υπόψη τις διάφορες κατευθύνσεις στις οποίες μπορεί να συμβεί κίνηση και αντίστοιχα γίνεται η αναπαράσταση των εδαφικών ελατηρίων:

3.2.1 Αξονικά εδαφικά ελατήρια

Τα αξονικά εδαφικά ελατήρια αναπαριστούν την αντίσταση του εδάφους σε αξονικές κινήσεις του αγωγού, δηλαδή κατά μήκος αυτού. Η μέγιστη αξονική δύναμη ανα μονάδα μήκους του αγωγού μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (3.2.1):



Εικόνα 3.2: Διγραμμικά ελατήρια εδάφους που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της αξονικής δύναμης του εδάφους στον αγωγό.

$$T_u = \pi Dac + \pi DH\gamma \frac{1+K_0}{2} \tan \delta \quad (3.2.1)$$

Όπου:

- T_u = μέγιστη δύναμη τριβής στην επιφάνεια επαφής αγωγού εδάφους (μέγιστη αξονική δύναμη εδάφους ανά μονάδα μήκους που μπορεί να ασκηθεί στον αγωγό)
- D = εξωτερική διάμετρος αγωγού,
- c = συνοχή εδάφους,
- H = βάθος επίχωσης του αγωγού,
- γ = ειδικό βάρος του εδάφους,
- K_0 = συντελεστής πίεσης γης σε ηρεμία,
- α = συντελεστής συνοχής, μόνο για αργιλικά εδάφη,
- $\alpha = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2+1} + \frac{0.095}{c^3+1}$, c σε ksf ή kPa/100,

- δ = γωνία τριβής στη διεπιφάνεια εδάφους – αγωγού $\delta = f\phi$,
- ϕ = γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους – αγωγού,
- f = συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια (εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, δηλαδή την επικάλυψη).

Τιμές για την επικάλυψη του αγωγού f σύμφωνα με τα διάφορα είδη επικάλυψης φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Τιμές συντελεστή τριβής για διάφορα είδη επικάλυψης.

Επικάλυψη αγωγού	f
Concrete	1.0
Coal Tar	0.9
Rough Steel,	0.8
Smooth Steel	0.7
Fusion Bonded Epoxy	0.6
Polyethylene	0.6

Όπου Δt η μετατόπιση για T_u :

- = 3 mm για πυκνή άμμο,
- = 5 mm για χαλαρή άμμο,
- = 8 mm για σκληρή άργιλο,
- = 10 mm για μαλακή άμμο,

3.2.2 Πλευρικά εδαφικά ελατήρια

Τα πλευρικά εδαφικά ελατήρια αναπαριστούν την αντίσταση του εδάφους σε οριζόντιες κινήσεις του αγωγού, δηλαδή κινήσεις κάθετες προς τον άξονα του αγωγού. Οι μέγιστες πλευρικές δυνάμεις ανά μονάδα μήκους του αγωγού υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_u = N_{ch}cD + N_{qh}\gamma HD \quad (3.2.2(a))$$

Όπου:

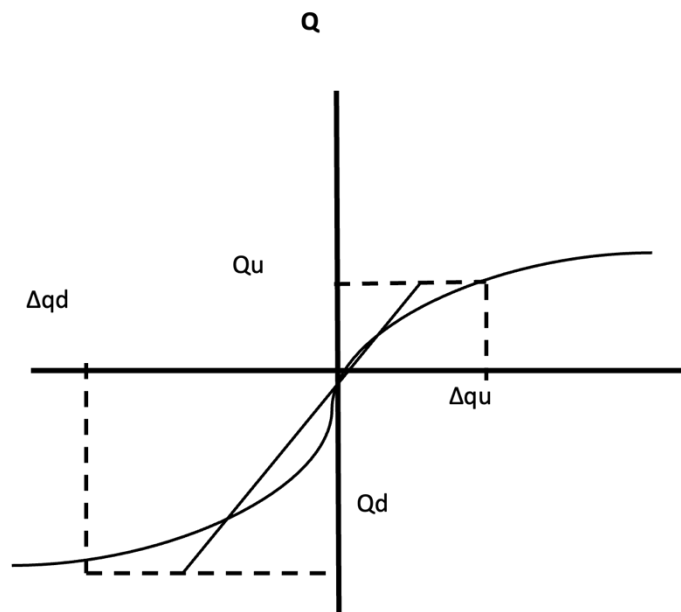
- P_u = η μέγιστη οριζόντια φέρουσα ικανότητα εδάφους (μέγιστη πλευρική δύναμη εδάφους ανά μονάδα μήκους που μπορεί να ασκηθεί στον αγωγό),
- N_{ch} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας για αργιλώδες έδαφος (0 για $c = 0$),
- N_{qh} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (0 για $c = 0$),
- c = συνοχή εδάφους,

- D = εξωτερική διάμετρος του αγωγού,
- γ = ενεργό ειδικό βάρος,
- H = βάθος επίχωσης του αγωγού,
- Δp = μετατόπιση για P_u ,

$$\Delta p = 0.04 \left(H + \frac{D}{2} \right) \leq 0.10 D \text{ to } 0.15 D \quad (3.2.2(b))$$

3.2.3 Κατακόρυφα εδαφικά ελατήρια προς τα άνω

Η εφαρμογή των εξισώσεων που δίνονται παρακάτω περιορίζεται σε μικρά βάθη (H) λόγω του ότι οι δυνάμεις των εδαφικών ελατηρίων που ασκούνται προς τα πάνω βασίζονται σε εργαστηριακά και θεωρητικά προσομοιώματα μικρής κλίμακας:



Εικόνα 3.3: Διγραμμικά ελατήρια εδάφους που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της κατακόρυφης δύναμης του εδάφους στον αγωγό

$$Q_u = N_{cv}cD + N_{qv} + \bar{\gamma}HD \quad (3.2.3(a))$$

Όπου:

- Q_u = η μέγιστη κατακόρυφη ανοδική φέρουσα ικανότητα του εδάφους (μέγιστη κατακόρυφη ανυψωτική δύναμη ανά μονάδα μήκους που μπορεί να ασκηθεί στον αγωγό),
- N_{cv} = συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης για την άργιλο (0 για $c = 0$)
- $= 2 \frac{H}{D} \leq 10$, εφαρμόζεται όταν $\frac{H}{D} \leq 10$,

- N_{qv} = συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης για την άμμο (0 για $c = 0$),

$$\frac{\varphi+H}{44D} \leq N_q \quad (3.2.3(b))$$

Όπου,

- c = συνοχή του εδαφικού υλικού,
- D = εξωτερική διάμετρος του αγωγού,
- γ^- = ενεργό ειδικό βάρος,
- H = βάθος επίχωσης του αγωγού (από την επιφάνεια του εδάφους έως το κέντρο του αγωγού),
- $\Delta_{qu} = 0.01H$ to $0.02H$ για συνεκτική έως χαλαρή άμμο $< 0.1D$,

3.2.4 Κατακόρυφα προς τα κάτω εδαφικά ελατήρια

$$Q_d = N_c c D + N_q \bar{\gamma} H D + N_{\gamma} \bar{\gamma} \frac{D^2}{2} \quad (3.2.4(a))$$

Όπου,

- Q_d = μέγιστη κατακόρυφη φέρουσα ικανότητα εδάφους ανά μονάδα μήκους που μπορεί να ασκηθεί στον αγωγό
- N_c , N_q , N_{γ} = συντελεστές κατακόρυφης καθοδικής φέρουσας ικανότητας,

$$N_c = [\cot(\varphi + 0.001)] \{ \exp[\pi \tan(\varphi + 0.001)] \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi + 0.001}{2} \right) - 1 \} \quad (3.2.4(b))$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \Phi) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.2.4(c))$$

$$N_{\gamma} = e^{(0.18\varphi - 2.5)} \quad (3.2.4 (d))$$

- γ = συνολικό ξηρό ειδικό βάρος εδάφους
- Δ_{qd} = κατακόρυφη μετατόπιση λόγω της δύναμης Q_d

$$\Delta_{qd} = 0.1D, \text{ για χαλαρά εδάφη} \quad (3.2.4(e))$$

$$\Delta_{qd} = 0.2D, \text{ για πυκνά εδάφη} \quad (3.2.4(f))$$

Κεφάλαιο 4 – Κινηματική καταπόνηση αγωγών μεταφοράς υδρογόνου λόγω σεισμικών ρηγμάτων

4.1 Εισαγωγή

Η μελέτη της κινηματικής καταπόνησης των αγωγών μεταφοράς υδρογόνου υπό σεισμική δραστηριότητα είναι καίριας σημασίας, δεδομένων των σημαντικών κινδύνων που ενέχουν τα σεισμικά φαινόμενα για την ακεραιότητα των αγωγών. Οι σεισμικές μετατοπίσεις εδάφους, και ιδιαίτερα οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις (Permanent Ground Displacements - PGDs), μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές παραμορφώσεις στους αγωγούς, θέτοντας σε κίνδυνο τη λειτουργία τους. Τα ρήγματα, οι κατολισθήσεις και η ρευστοποίηση του εδάφους είναι από τους κύριους παράγοντες που εξετάζονται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των αγωγών σε τέτοιες συνθήκες.

Για την αριθμητική προσομοίωση της απόκρισης των αγωγών έναντι σεισμικών γεωκινδύνων, χρησιμοποιείται το λογισμικό ABAQUS, ένα ισχυρό εργαλείο ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (FE). Το λογισμικό ABAQUS επιτρέπει την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι εδαφικές ιδιότητες, οι παραμορφώσεις του αγωγού και οι κινήσεις του εδάφους λόγω σεισμικών φαινομένων. Με τη χρήση του ABAQUS, είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν σύνθετα σενάρια καταπόνησης και να αξιολογηθεί η αντοχή των αγωγών σε ακραίες σεισμικές συνθήκες, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για τον σχεδιασμό και την ασφάλεια των αγωγών.

4.2 Περιγραφή μεθοδολογίας

4.2.1 Περιγραφή του προβλήματος

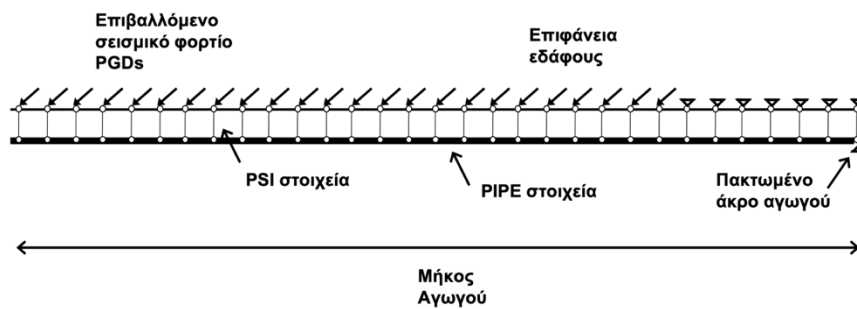
Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους που αντιμετωπίζουν οι αγωγοί μεταφοράς είναι η διασταύρωση τους με σεισμικά ρήγματα. Οι μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις, που συχνά είναι αποτέλεσμα διάρρηξης ρηγμάτων, αποτελούν έναν από τους πιο σοβαρούς γεωκινδύνους καθώς έχουν καταγραφεί πολλές καταστροφές λόγω αντίστοιχων αστοχιών. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτεί μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία που να λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις εδάφους-αγωγού, τις γεωμετρικές μετατοπίσεις, καθώς και τα υλικά και τα χαρακτηριστικά των αγωγών. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιούνται με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης για την κατανόηση των παραμορφώσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται στους αγωγούς κατά τη διάρκεια σεισμικών φαινομένων.

4.2.2 Αριθμητικό Προσομοίωμα Αγωγού

Για την αριθμητική προσομοίωση του αγωγού λόγω των εδαφικών μετακινήσεων που προκύπτουν από τη διασταύρωση του με σεισμικό ρήγμα χρησιμοποιήθηκε το συμβατικό Static – Standard Module του λογισμικού ABAQUS (Simulia 2014). Ο αγωγός προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας στοιχεία τύπου PIPE21, τα οποία είναι δισδιάστατα στοιχεία Timoshenko με δύο κόμβους. Για την αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους, επιλέχθηκαν στοιχεία PSI24 για τις αξονικές και κατακόρυφες κατευθύνσεις, τα οποία αποτελούνται από τέσσερις κόμβους, δύο για την αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους και δύο που είναι συνδεδεμένοι με τον αγωγό. Τα στοιχεία PSI προτιμώνται σε σύγκριση με τα συμβατικά ελατήρια εδάφους, καθώς αξιολογούν αυτόματα την αντίσταση του εδάφους βάσει των οδηγιών του κανονισμού ALA (ALA 2001) όπως αναλύεται στο 3^ο κεφάλαιο, εφόσον είναι γνωστό το βάθος επίχωσης του αγωγού και οι παράμετροι του περιβάλλοντος εδάφους (όπως η γωνία τριβής, το ειδικό βάρος του εδάφους, κ.λπ.).

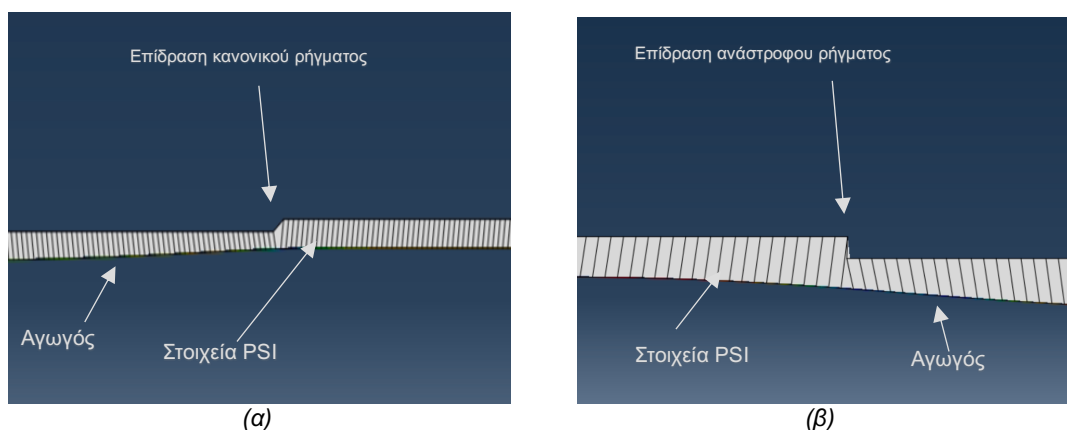
Επιπλέον, τα στοιχεία PSI συνήθως οδηγούν σε πιο ρεαλιστικά και ακριβή αποτελέσματα, καθώς έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν την κατεύθυνση της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους και λαμβάνουν υπόψη τη μεγάλη κίνηση και περιστροφή του αγωγού, ενώ παράλληλα εξετάζουν και τις σχετικές διακυμάνσεις που μπορεί να αναπτυχθούν λόγω των μεταβολών στο βάθος επίχωσης του αγωγού. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το εξεταζόμενο πρόβλημα συχνά οδηγεί σε μεγάλα επίπεδα παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να υπερβαίνεται η ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Ως εκ τούτου, οι μη γραμμικότητες των υλικών και της γεωμετρίας έχουν ενσωματωθεί επιτυχώς στις αναλύσεις.

Για την επίτευξη της βέλτιστης αριθμητικής προσομοίωσης και την εξασφάλιση της σύγκλισης της λύσης, επιλέγεται κατάλληλο μέγεθος για τα πεπερασμένα στοιχεία του αγωγού (FE). Επιπλέον, προσομοιώνεται ένας αγωγός με τυπικά άπειρο μήκος (δηλαδή πολύ μεγάλο, $L=4\text{km}$, στα προσομοιώματα) για την ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων οριακών συνθηκών στις άκρες του μοντέλου FE. Το άκρο του αγωγού, καθώς και οι κόμβοι PSI προς την πλευρά του τοιχώματος του εδάφους, είναι σταθεροί, ενώ το αντίθετο άκρο και οι αντίστοιχοι κόμβοι PSI (προς το πλευρικό τοίχωμα) ακολουθούν την κίνηση του ρήγματος. Οι μόνιμες γεωμετρικές μετατοπίσεις (PGDs) στις αξονικές και κατακόρυφες κατευθύνσεις, επιβάλλονται στον αγωγό μέσω των στοιχείων PSI, εντός του κρίσιμου πλάτους της ζώνης διάρρηξης στο μέσον του προσομοιώματος.



Εικόνα 4.1: PSI στοιχεία & PIPE στοιχεία στον αγωγό.

Η προσομοίωση αφορά δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση μελετάται η αλληλεπίδραση του αγωγού σε διασταύρωση με κανονικό ρήγμα (Σχ. 4.2(α)), δηλαδή το ένα άκρο του αγωγού θεωρείται ότι είναι πακτωμένο και παραμένει σταθερό, ενώ το ελεύθερο τμήμα του αγωγού μετακινείται προς τα αριστερά και κάτω. Αυτό σημαίνει πως ο αγωγός επιμηκύνεται υπό την επίδραση εφελκυστικών δυνάμεων.



Εικόνα 4.2: Προσομοίωση αγωγού στο ABAQUS σε διασταύρωση (α) με κανονικό ρήγμα (β) με ανάστροφο ρήγμα.

Στην δεύτερη περίπτωση, που αφορά τη διασταύρωση του αγωγού με ανάστροφο ρήγμα (Σχ. 4.2(β)), οι μόνιμες γεωμετρικές μετατοπίσεις του εδάφους που προκαλούνται από το ανάστροφο ρήγμα επιβάλλονται στον αγωγό, με την κίνηση του μετακινούμενου τμήματος να κατευθύνεται προς τα πάνω. Αυτό οδηγεί σε έντονες θλιπτικές δυνάμεις στον αγωγό, προκαλώντας παραμορφώσεις και πιθανές αστοχίες λόγω των θλιπτικών τάσεων. Τα στοιχεία PSI προσαρμόζουν τις αντιστάσεις του εδάφους ανάλογα με την κίνηση, και οι αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι οι θλιπτικές παραμορφώσεις είναι πιο κρίσιμες στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος, αφού υπερβαίνουν τις τιμές που αντιστοιχούν σε ελαστική συμπεριφορά του αγωγού.

Το λογισμικό ABAQUS και τα στοιχεία PIPE21 και PSI24 επιτρέπουν τη ρεαλιστική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους υπό σεισμικά φαινόμενα και την εκτίμηση των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τα κανονικά και ανάστροφα ρήγματα.

4.3 Παραμετρική διερεύνηση

Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε προηγουμένως, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με σκοπό τη συλλογή αποτελεσμάτων, σχετικά με τις διάφορες παραμέτρους που πιθανόν να επηρεάσουν τον αγωγό υπό την επιρροή του ρήγματος. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα που προκύπτουν αφορούν τις εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις στα σημεία του αγωγού. Η επιλογή των χαρακτηριστικών του αγωγού και του εδάφους βασίζεται σε βιβλιογραφικά δεδομένα για να προκύψουν πιο ρεαλιστικά και ακριβή αποτελέσματα.

Ένας τυπικός αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου API 5L από χάλυβα ποιότητας X52, με διάμετρο $D_{out} = 0.4064$ m, πάχος τοιχώματος $t = 30.96$ mm αποτελεί το βασικό σενάριο. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα είναι, μέτρο ελαστικότητας $E = 200$ GPa, τάση διαρροής $\sigma_0 = 360$ MPa και $K_0 = 0.5$. Ο αγωγός είναι θαμμένος σε βάθος $H = 1.2$ m σε άμμο μέτριας πυκνότητας με φαινόμενο βάρος $\gamma = 18$ kN/m³ και γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi = 34^\circ$. Η εσωτερική πίεση είναι $P_{in} = 7$ MPa και ο συντελεστής τριβής λόγω επικάλυψης του αγωγού επιλέχθηκε $f = 0.7$ από τον πίνακα 3.3

Αναφορικά με τα εδαφικά ελατήρια, στην παρούσα μελέτη, η προσομοίωση, αφορά δύο διαστάσεις επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη ο υπολογισμός των πλευρικών εδαφικών ελατηρίων. Στον Πίνακα 4.1 φαίνεται ο υπολογισμός των παραπάνω δυνάμεων και των αντίστοιχων μετατοπίσεων για τα σενάρια που εξετάστηκαν.

Πίνακας 4.1: Υπολογισμός δυνάμεων και μετατοπίσεων εδαφικών ελατηρίων ανά σενάριο μοντελοποίησης.

	f = 0.7			f= 0.8	f=0.9
	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 34^\circ$	$\varphi = 39^\circ$	$\varphi = 34^\circ$	$\varphi = 34^\circ$
T_u , N	6.92	3.82	10.63	4.45	5.12
Δ_t , mm	5	4	3	4	4
Q_u , N	15.41	8.73	25.04	8.73	8.73
Δ_{qu} , mm	2.4	2	1.2	2	2
Q_d , N	5000	5000	5000	5000	5000
Δ_{qd} , mm	5	5	5	5	5

Το μέγεθος του σεισμού σχετίζεται με τη μετατόπιση του βραχύδους υπόβαθρου σύμφωνα με τη σχέση των Wells and Coppersmith (1994). Για σεισμικό μέγεθος ίσο

με $M = 7$ που εξετάστηκε στην παρούσα διερεύνηση, η τιμή της μετατόπισης αντιστοιχεί σε $AD = 1.07 \text{ m}$, η οποία αναλύεται σε δύο συνιστώσες που σχετίζονται με τη γωνία διάρρηξης β , του ρήγματος και αυτές δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$AD_x = AD \cdot \cos\beta \quad (4.3(a))$$

$$AD_y = AD \cdot \sin\beta \quad (4.3(b))$$

Σημειώνεται ότι οι μετακινήσεις επιβάλλονται απλουστευτικά ομοιόμορφα σε όλο το μετακινούμενο τμήμα του αγωγού.

4.3.1 Επίδραση γωνίας εσωτερικής τριβής εδάφους

Η διερεύνηση αφορά αμμώδες έδαφος και εξετάστηκαν παραμετρικά οι περιπτώσεις μαλακού, μέτριας πυκνότητας και σκληρού εδάφους σε στραγγιζόμενες συνθήκες. Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), διαφέρει ανάλογα με την πυκνότητα του εδάφους. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2 έγινε διερεύνηση για τρεις διαφορετικές τιμές της γωνίας: 30° , 34° και 39° .

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες του εδάφους.

Άμμος	Πυκνότητα εδάφους	Μέτρο ελαστικότητας	Λόγος Poisson	Γωνία εσωτερικής τριβής
	(ρ)	E(z)	ν	ϕ_p
	(t/m^3)	(MPa)	(-)	($^\circ$)
Χαλαρή	1.6	$5 + 0.75 z$	0.33	30
Μέτρια	1.8	$10 + 1.5 z$	0.33	34 - 30
Πυκνή	2.0	$20 + 3 z$	0.33	39-30

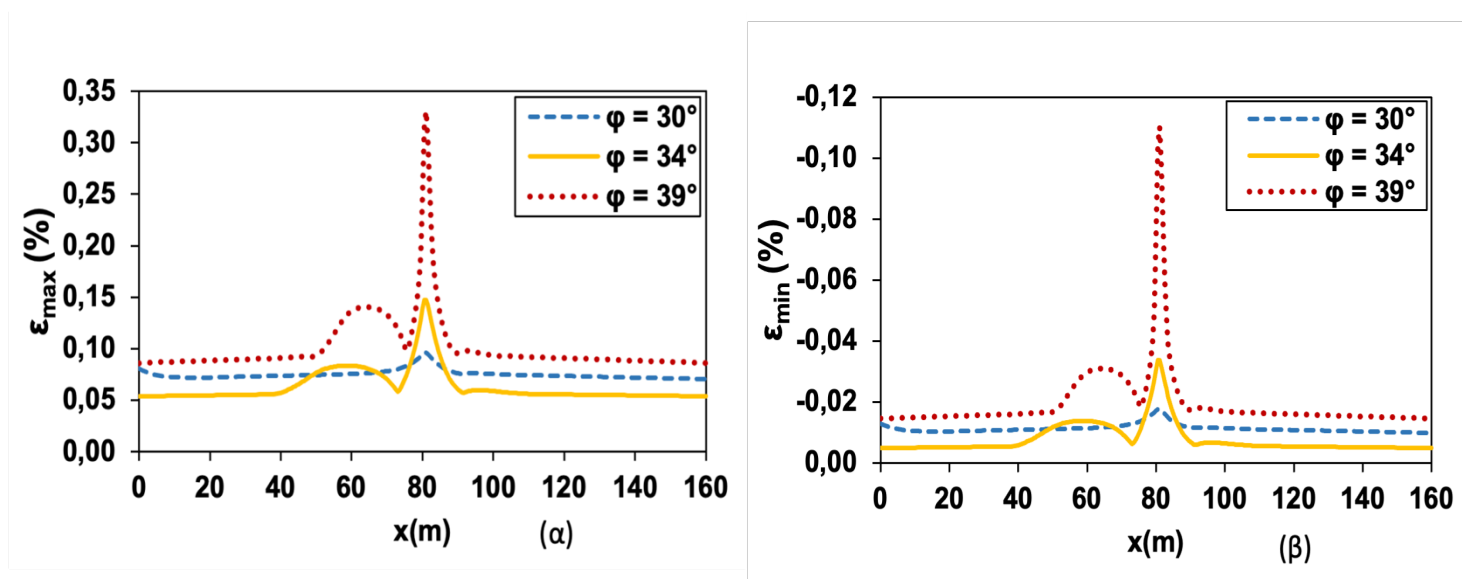
Τα γραφήματα 4.1 και 4.2 δείχνουν τις μέγιστες και τις ελάχιστες παραμορφώσεις για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής ϕ , οι οποίες αντιπροσωπεύουν την πυκνότητα των εδαφών, για την περίπτωση του κανονικού και του ανάστροφου ρήγματος ως προς την αρχική θέση του αγωγού.

Στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος, όπως φαίνεται στο γράφημα 4.1(α) οι μέγιστες παραμορφώσεις παραμένουν σε μέτρια επίπεδα για όλες τις γωνίες τριβής, με σημαντική αύξηση κοντά στα 80 m από την αρχική θέση του αγωγού. Για μεγαλύτερη τιμή γωνίας εσωτερικής τριβής $\phi = 39^\circ$, παρουσιάζεται έντονη κορύφωση,

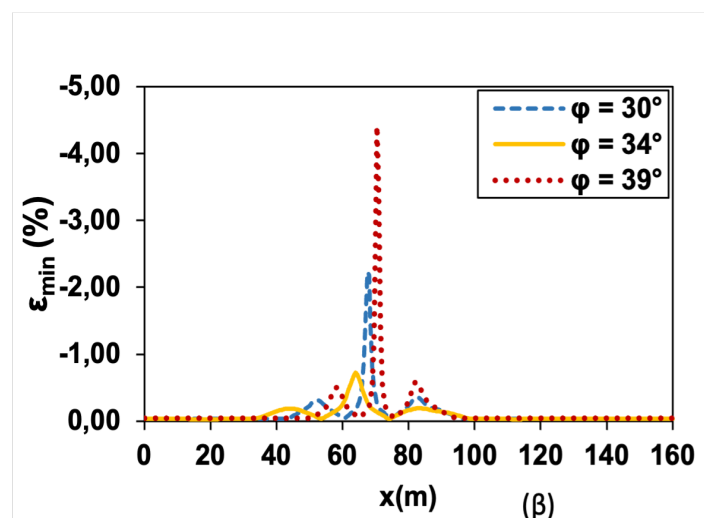
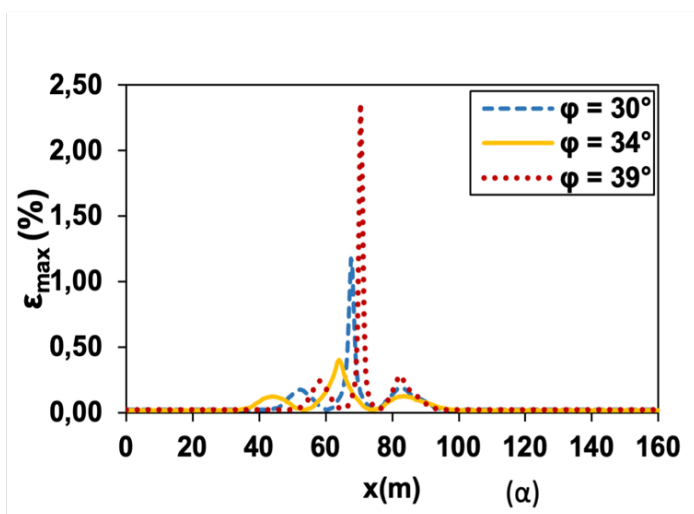
γεγονός που υποδηλώνει ισχυρότερη απόκριση του εδάφους με μεγαλύτερη πυκνότητα, ενώ τα πιο χαλαρά εδάφη παρουσιάζουν μέτρια απόκριση. Παρόμοιες τάσεις παρουσιάζει και το γράφημα 4.1 (β), στην περίπτωση της ελάχιστης παραμόρφωσης. Οι τιμές είναι γενικά αρνητικές (θλιπτικές) και μεγαλύτερο σημείο θλίψης εμφανίζεται κοντά στα 80 m από την αρχική θέση του αγωγού. Τα πιο πυκνά εδάφη, εμφανίζουν μεγαλύτερες θλιπτικές παραμορφώσεις. Για την τιμή γωνίας εσωτερικής τριβής $\varphi = 39^\circ$, η συμπίεση είναι πολύ έντονη, ενώ για $\varphi = 30^\circ$, είναι αρκετά περιορισμένη.

Στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος (Σχήμα 4.2) η συμπεριφορά είναι πιο ακραία σε σύγκριση με το κανονικό ρήγμα, τόσο για τις εφελκυστικές όσο και για τις θλιπτικές παραμορφώσεις. Στο γράφημα 4.2(α), φαίνεται πως η μέγιστη παραμόρφωση είναι σημαντικά υψηλότερη κοντά στα 80 m από την αρχική θέση του αγωγού. Για πυκνά εδάφη ($\varphi = 39^\circ$) παρουσιάζεται κορυφή πάνω από 2%, πολύ υψηλότερη συγκριτικά με την περίπτωση του κανονικού ρήγματος. Τα πιο χαλαρά εδάφη ($\varphi = 30^\circ, 34^\circ$) εμφανίζουν επίσης σημαντικές παραμορφώσεις αλλά με μικρότερη μέγεθος σε σύγκριση με τα πιο πυκνά εδάφη. Στο γράφημα 4.2 (β), η ελάχιστη παραμόρφωση φαίνεται να αγγίζει πολύ χαμηλότερες τιμές με θλιπτική παραμόρφωση -5% στα πιο πυκνά εδάφη ($\varphi = 39^\circ$). Ωστόσο και για τα πιο χαλαρά εδάφη, οι παραμορφώσεις είναι σημαντικές, αλλά μειώνονται αισθητά σε σχέση με τα πιο πυκνά.

Συνοψίζοντας, σε πιο πυκνά εδάφη οι αγωγοί παρουσιάζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις τόσο εφελκυστικές όσο και θλιπτικές, ενώ σε πιο χαλαρά εμφανίζουν μικρότερη καταπόνηση.



Σχήμα 4.1: Επίδραση της τιμής της γωνίας φ για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.



Σχήμα 4.2: Επίδραση της τιμής της γωνίας φ για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.

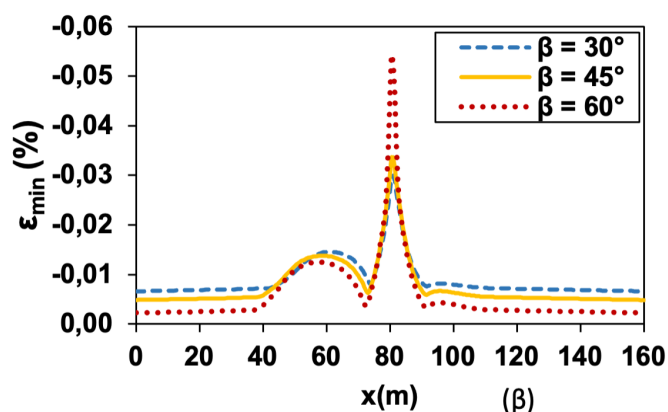
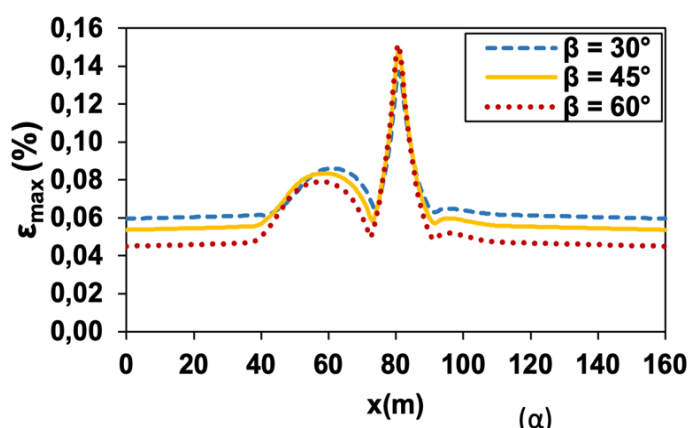
4.3.2 Επίδραση γωνίας διάρρηξης ρήγματος

Η γωνία διάρρηξης του ρήγματος, β αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ακεραιότητα ενός αγωγού υπό κινηματική καταπόνηση. Το μοντέλο υποβλήθηκε σε διερεύνηση για τρεις διαφορετικές τιμές της γωνίας διάρρηξης για κανονικό ρήγμα 30° , 45° και 60° . Εξετάστηκαν επίσης οι ίδιες περιπτώσεις για ανάστροφο ρήγμα.

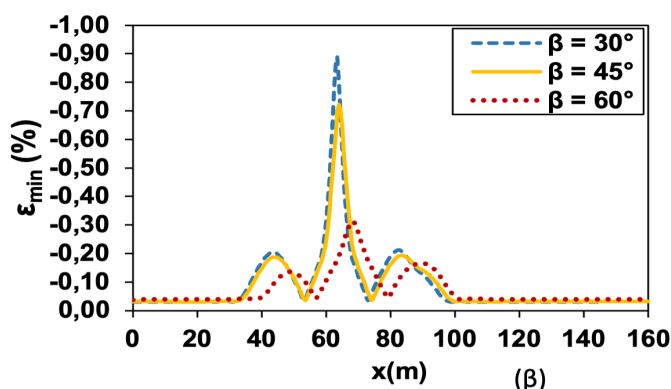
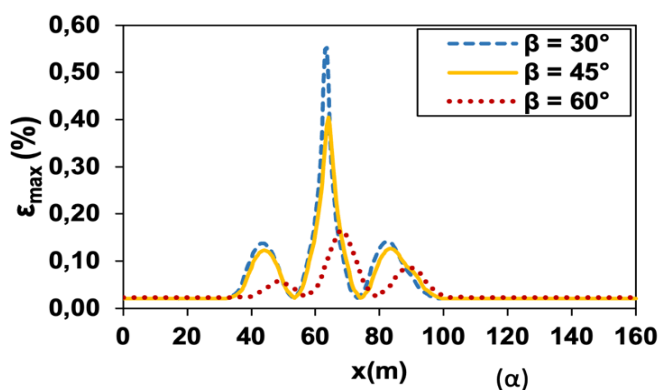
Το σχήμα 4.3. και 4.4 εξετάζουν την επίδραση της γωνίας διάρρηξης στην περίπτωση του κανονικού και του ανάστροφου ρήγματος αντίστοιχα, δείχνοντας την ελάχιστη και τη μέγιστη παραμόρφωση. Η μέγιστη παραμόρφωση είναι συγκριτικά χαμηλή με τιμές που κυμαίνονται από 0.05% έως 0.15% και αυξάνεται κυρίως κοντά στα 80 m από την αρχική θέση (4.3(α)). Η γωνία διάρρηξης $\beta = 30^\circ$, εμφανίζει τη μεγαλύτερη κορυφή ευφελκυστικής παραμόρφωσης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές γωνίας διάρρηξης παρουσιάζεται μείωση της παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση επηρεάζεται άμεσα από τη γωνία διάρρηξης, με την πιο απότομη να παρατηρείται για μικρότερες γωνίες διάρρηξης που σημαίνει πιο ομαλή κατανομή της παραμόρφωσης στον αγωγό. Στο γράφημα 4.3(β) παρατηρούνται μεγαλύτερες θλιπτικές παραμορφώσεις κοντά στα 80 m από την αρχική θέση, με τιμές που κυμαίνονται από -0.10% έως -0.90%. Η θλιπτική παραμόρφωση είναι πιο έντονη για τιμές γωνίας διάρρηξης $\beta = 30^\circ$ και $\beta = 45^\circ$, ενώ για $\beta = 60^\circ$, οι τιμές είναι ελαφρώς μειωμένες. Η μικρότερη γωνία διάρρηξης φαίνεται να προκαλεί τη μεγαλύτερη θλιπτική παραμόρφωση, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη καταπόνηση του αγωγού.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος (Σχήμα 4.4(α)) η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση είναι πιο έντονη ειδικά για τις γωνίες διάρρηξης $\beta = 30^\circ$, 45° όπου οι κορυφές είναι πιο οξείες σε σχέση με το κανονικό ρήγμα. Η γωνία $\beta = 30^\circ$ προκαλεί τη μεγαλύτερη κορυφή παραμόρφωσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μικρότερες γωνίες διάρρηξης προκαλούν μεγαλύτερη καταπόνηση στον αγωγό, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές για τη γωνία διάρρηξης παρουσιάζουν πιο απαλές παραμορφώσεις, με το εδαφικό υλικό να αντιδρά λιγότερο έντονα στην κινηματική καταπόνηση. Υπό συνθήκες θλίψης, (Σχήμα 4.4 (β)) η παραμόρφωση είναι ακόμα πιο έντονη στις μικρές τιμές της γωνίας, με τις γωνίες $\beta = 40^\circ$ και $\beta = 45^\circ$ να φτάνουν κοντά σε τιμές της τάξης του -1%, ενώ για τιμή γωνίας διάρρηξης, $\beta = 60^\circ$, παρουσιάζεται πιο ομαλή θλιπτική παραμόρφωση, επιβεβαιώνοντας πως οι μικρότερες γωνίες διάρρηξης προκαλούν σημαντικά μεγαλύτερη καταπόνηση.

Συνολικά, και στις δύο περιπτώσεις (κανονικό και ανάστροφο ρήγμα) παρατηρείται ότι οι μικρότερες γωνίες διάρρηξης ($\beta = 30^\circ$) προκαλούν πιο απότομες παραμορφώσεις και καταπονήσεις, τόσο σε όρους εφελκυσμού όσο και θλιπτικής παραμόρφωσης, ιδιαίτερα κοντά στα 60 – 80 m από την αρχική θέση. Οι μεγαλύτερες



Σχήμα 4.4: Επίδραση της τιμής της γωνίας β για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.



Σχήμα 4.4: Επίδραση της τιμής της γωνίας β για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.

τιμές για τη γωνία διάρρηξης οδηγούν σε πιο ομαλή κατανομή της καταπόνησης και μικρότερες κορυφές παραμόρφωσης.

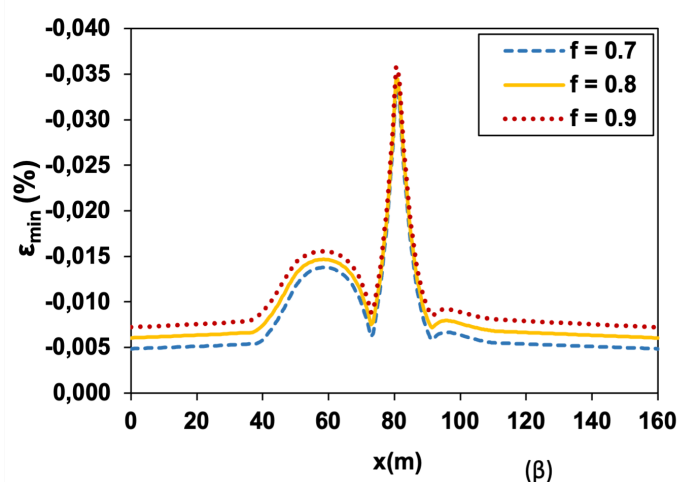
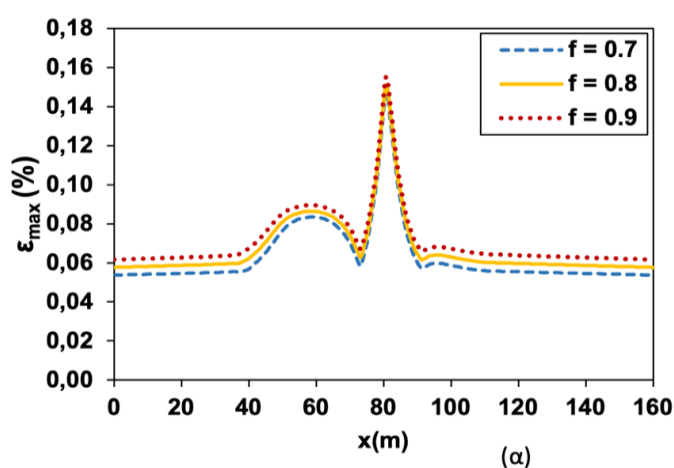
4.3.3 Επίδραση επικάλυψης αγωγού

Με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του αγωγού ή πολλές φορές την αποφυγή της ψαθυροποίησης του χάλυβα, ιδιαίτερα στην περίπτωση του υδρογόνου, επιλέγεται μια στρώση εσωτερικής επικάλυψης του αγωγού η οποία όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία δεν επηρεάζει τις παραμορφώσεις στο αγωγό. Η εξωτερική επικάλυψη όμως, επηρεάζει τον συντελεστή τριβής καθώς όπως αναφέρεται στον πίνακα (3) παρ. 3.2 η τιμή του συντελεστή τριβής αλλάζει ανάλογα με το είδος της επικάλυψης του αγωγού. Εξετάστηκαν οι τιμές $f = 0.7, 0.8$ και 0.9 , οι οποίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικές συνθήκες επικάλυψης του αγωγού και την επίδραση της τριβής μεταξύ αγωγού και εδάφους. Τα σχήματα 4.5 και 4.6, δείχνουν την επίδραση του συντελεστή τριβής στον αγωγό για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα αντίστοιχα.

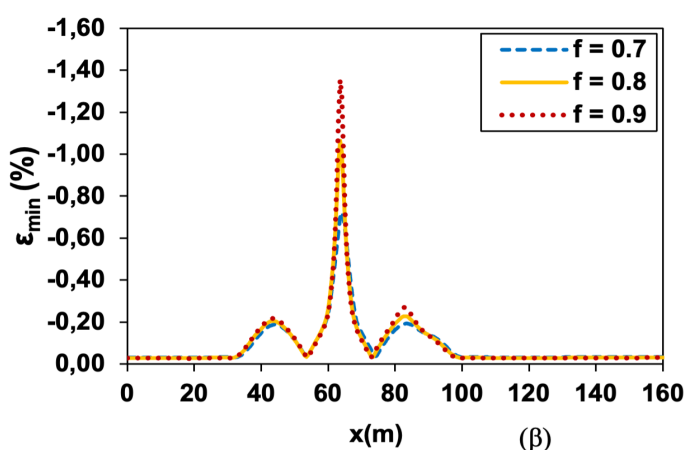
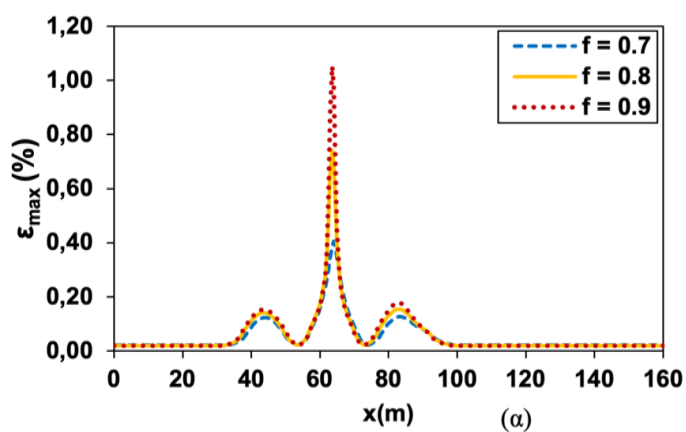
Παρατηρείται ότι η εφελκυστική παραμόρφωση στον αγωγό υπό καταπόνηση κανονικού ρήγματος κυμαίνεται μεταξύ 0.15% για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή f (Σχήμα 4.5(α)). Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η τιμή του f , η κορυφή της τιμής την παραμόρφωσης γίνεται και πιο έντονη με αποκορύφωμα τα 80 m από την αρχική θέση. Η πιο υψηλή τιμή $f = 0.9$ οδηγεί σε μεγαλύτερη παραμόρφωση, πιθανώς λόγω της αυξημένης αντίστασης που προσφέρει η επικάλυψη, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καταπόνηση του αγωγού. Για μικρότερες τιμές του συντελεστή f η παραμόρφωση είναι λιγότερο έντονη, λόγω της μικρότερης αντίστασης μεταξύ αγωγού και εδάφους. Η ελάχιστη παραμόρφωση για το κανονικό ρήγμα κυμαίνεται μεταξύ -0.005% έως -0.035% . Εδώ παρατηρείται η ίδια τάση όπως και στον εφελκυσμό με τον μεγαλύτερο συντελεστή τριβής ($f = 0.9$) να οδηγεί σε αυξημένες θλιπτικές παραμορφώσεις.

Για διασταύρωση του αγωγού με ανάστροφο ρήγμα (Σχήμα 4.6(α)) η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση είναι πολύ πιο έντονη σε σύγκριση με το κανονικό ρήγμα, ειδικά κοντά στην περιοχή του ρήγματος. Η επίδραση του συντελεστή τριβής είναι επίσης εμφανής εδώ, με τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή να εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη κορύφωση και η ε_{\max} να φτάνει σε τιμές πάνω από 1% . Αυτό δείχνει ότι η μεγαλύτερη τριβή προκαλεί και ισχυρότερη αντίδραση μεταξύ εδάφους και αγωγού, αυξάνοντας την καταπόνηση. Όπως και στο κανονικό ρήγμα, οι μικρότερες τιμές του συντελεστή τριβής οδηγούν σε μικρότερη παραμόρφωση. Η ελάχιστη παραμόρφωση στο ανάστροφο ρήγμα (Σχήμα 4.6 (β)) είναι πολύ πιο ακραία φτάνοντας τιμές έως και -1.5% . Όπως και στην ε_{\max} η αυξημένη τριβή οδηγεί σε μεγαλύτερη θλιπτική καταπόνηση.

Συνοψίζοντας, οι παραμορφώσεις είναι πιο ήπιες, στο κανονικό ρήγμα, με τη εφελκυστική και θλιπτική παραμόρφωση να επηρεάζονται σημαντικά από την αύξηση της τριβής. Η μεγαλύτερη τριβή $f=0.9$ αυξάνει την καταπόνηση του αγωγού τόσο στην ε_{\max} όσο και στην ε_{\min} . Στο ανάστροφο ρήγμα, οι τιμές των παραμορφώσεων είναι πολύ πιο έντονες με τον συντελεστή f να παίζει καθοριστικό ρόλο. Η αύξηση της τριβής οδηγεί σε ακραίες παραμορφώσεις, ιδιαίτερα στην περιοχή θλιπτικής καταπόνησης η οποία μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλές τιμές θλιπτικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 4.6: Επίδραση της τιμής του συντελεστή επικάλυψης f για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.



Σχήμα 4.6 Επίδραση της τιμής του συντελεστή επικάλυψης f για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.

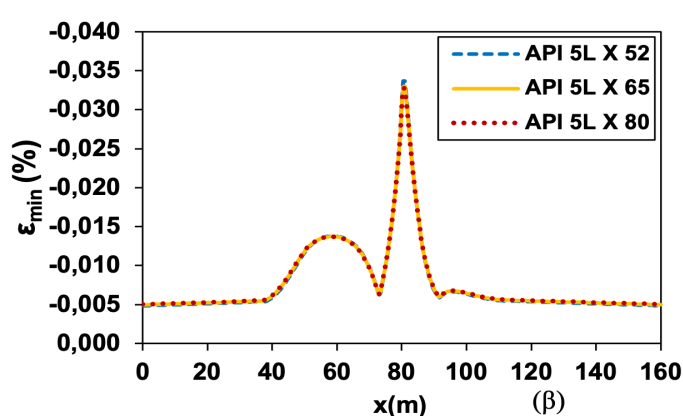
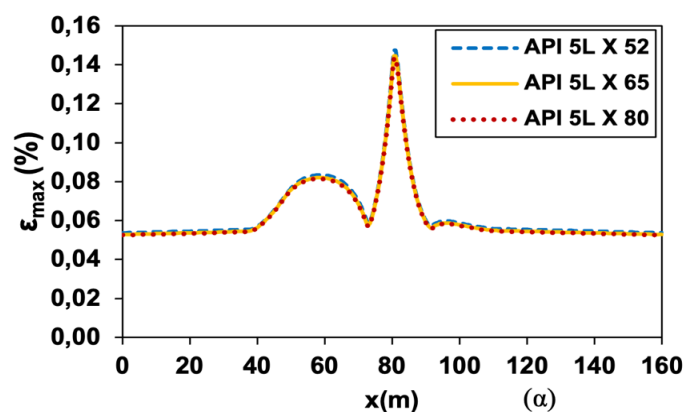
4.3.4 Επίδραση ποιότητας χάλυβα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές ποιότητες χάλυβα: API 5L X52, API 5L X65 και API 5L X80. Για κάθε ποιότητα χάλυβα επικρατούν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Για χάλυβα ποιότητας X65 το μέτρο ελαστικότητας είναι $E = 207 \text{ GPa}$, ενώ η τάση διαρροής είναι $\sigma_0 = 450 \text{ MPa}$. Παρομοίως, για τον χάλυβα ποιότητας X80 το μέτρο ελαστικότητας αντιστοιχεί σε $E = 210 \text{ GPa}$ και η τάση διαρροής σε $\sigma_0 = 555 \text{ MPa}$. Στα σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις για τους χάλυβες που μελετήθηκαν.

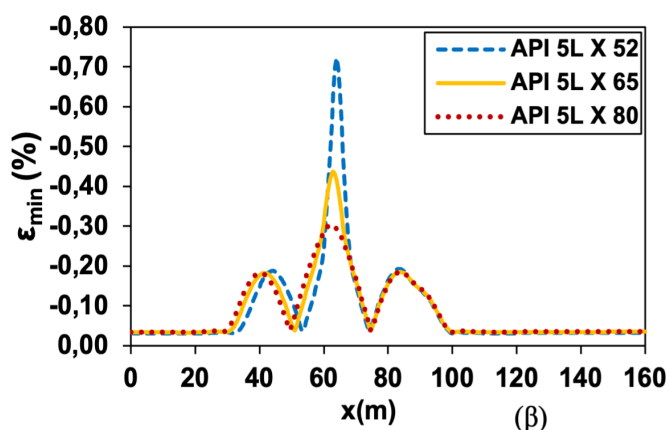
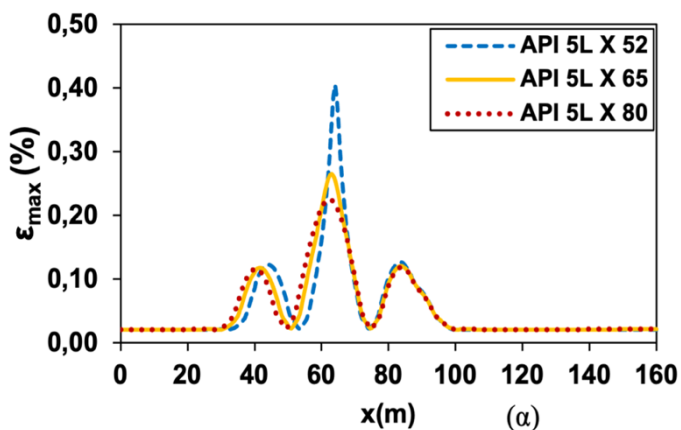
Οι τιμές της παραμόρφωσης υπό την καταπόνηση του αγωγού από κανονικό ρήγμα είναι σχετικά παρόμοιες για τις τρεις ποιότητες χάλυβα (Σχήμα 4.7(α)). Παρατηρείται μια κορυφή με τιμή περίπου 0.15%. Αν και ο κώδικας ASME B31.12 προτείνει τον χάλυβα ποιότητας X52 για υπηρεσίες υδρογόνου, από τα αποτελέσματα της μελέτης φαίνεται πως ο χάλυβας X52 παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη παραμόρφωση συγκριτικά με τον X80. Αυτό, πιθανώς οφείλεται στη χαμηλότερη τάση διαρροής και το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα X52, που επιτρέπουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις υπό τις ίδιες συνθήκες. Στην περίπτωση της ελάχιστης παραμόρφωσης (Σχήμα 4.7(β)), παρατηρείται μια αρνητική κορυφή κοντά στο σημείο του ρήγματος με τιμές που φτάνουν έως -0.035%. Οι διαφορές μεταξύ των χαλύβων είναι και εδώ μικρές, με τον χάλυβα X52 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη θλιπτική παραμόρφωση σε σχέση με τους άλλους δύο, λόγω των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων του.

Υπό την επίδραση ανάστροφου ρήγματος (Σχήμα 4.8) οι παραμορφώσεις είναι σαφώς πιο έντονες και διαφέρουν σημαντικά από αυτές του κανονικού. Οι μέγιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.8(α)) είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με το κανονικό ρήγμα, με τιμές που ξεπερνούν το 0.4% για τον χάλυβα X52. Η κορύφωση της παραμόρφωσης είναι πιο απότομη κοντά στην περιοχή του ρήγματος. Ο χάλυβας X52 εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης παραμόρφωσης από τους X65 και X80 λόγω της χαμηλότερης τάσης διαρροής. Ο χάλυβας X80 με τη μεγαλύτερη τάση διαρροής, δείχνει να είναι πιο ανθεκτικός στις παραμορφώσεις και παρουσιάζει την πιο ήπια απόκριση. Οι ελάχιστες παραμορφώσεις (Σχήμα 4.8(β)), φτάνουν σε πολύ χαμηλότερες τιμές, με τον χάλυβα X52 να εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές θλιπτικής παραμόρφωσης (έως -0.7%). Ο χάλυβας X80 εμφανίζει μικρότερη θλιπτική παραμόρφωση λόγω της υψηλότερης αντοχής του. Η θλιπτική παραμόρφωση είναι πιο έντονη στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος, γεγονός που αποδεικνύει την αυξημένη καταπόνηση του αγωγού σε αυτή την περίπτωση.

Συνοψίζοντας, οι διαφορές των χαλύβων στο κανονικό ρήγμα είναι μικρότερες και οι παραμορφώσεις πιο ήπιες. Ο χάλυβας ποιότητας API 5L X52 εμφανίζει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τους υπόλοιπους, τόσο στο κανονικό όσο και στο ανάστροφο ρήγμα, ενώ ο X80 με υψηλότερη αντοχή εμφανίζει μικρότερη απόκριση τόσο υπό συνθήκες θλίψης όσο και εφελκυσμού.



Σχήμα 4.8: Επίδραση της ποιότητας του χάλυβα για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.



Σχήμα 4.8 Επίδραση της ποιότητας του χάλυβα για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.

4.3.5 Επίδραση εσωτερικής πίεσης αγωγού

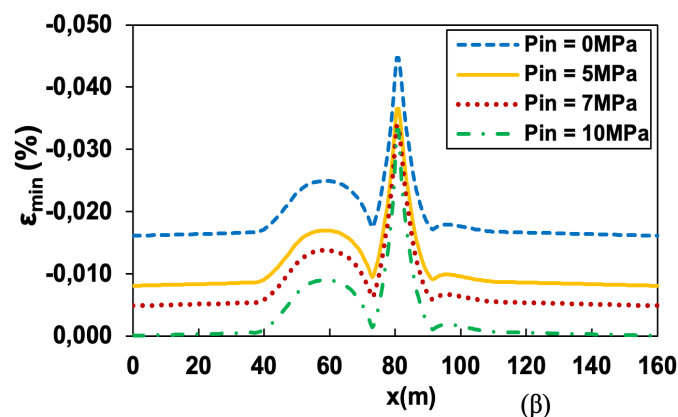
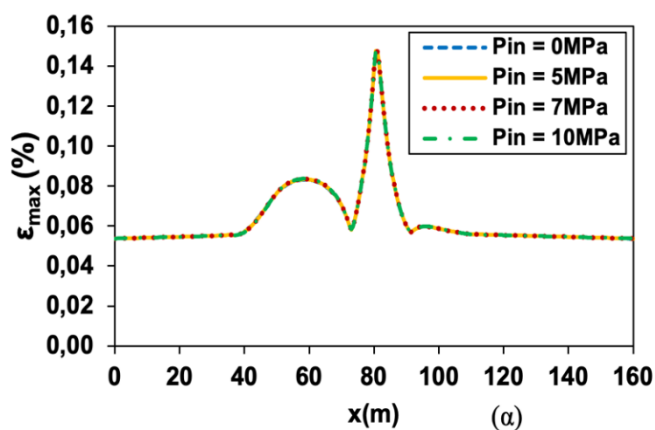
Η παράμετρος της εσωτερικής πίεσης λειτουργίας του αγωγού είναι κρίσιμη για την ομαλή λειτουργία του. Αξίζει να σημειωθεί πως σε έναν αγωγό καθαρού υδρογόνου για να μεταφερθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας με έναν υπάρχοντα αγωγό φυσικού αερίου θα χρειαστεί να γίνει τριπλασιασμός της εσωτερικής πίεσης (Romney, Barker, & Geren, 2021). Η εσωτερική πίεση του αγωγού διερευνήθηκε για τρεις περιπτώσεις

σύμφωνα με τις οδηγίες του κώδικα ASME B31.12: 5 MPa, 7 MPa (βασικό σενάριο) και 10 MPa. Εξετάστηκε επίσης το σενάριο μηδενικής πίεσης, όπου ο αγωγός δεν βρίσκεται σε λειτουργία. Στο Σχήμα 4.9 και 4.10, καταγράφονται οι μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις για τις διαφορετικές τιμές εσωτερικής πίεσης ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της πίεσης στον αγωγό υπό την επίδραση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος.

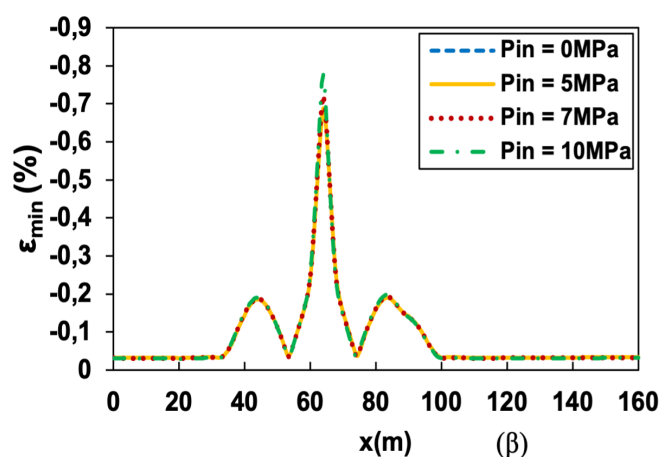
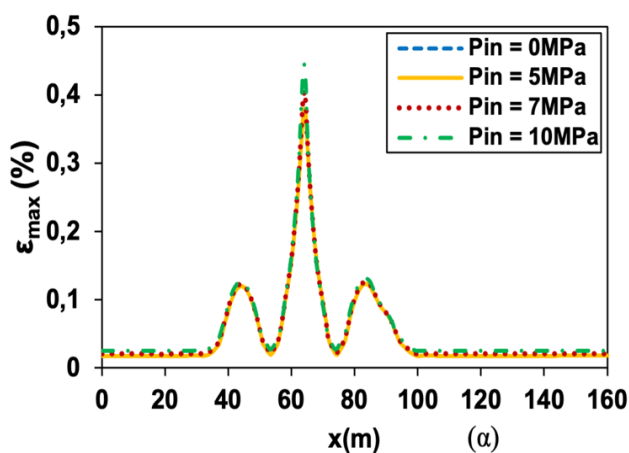
Η μέγιστη παραμόρφωση στην περίπτωση του κανονικού ρήγματος (Σχήμα 4.9(α)) κυμαίνεται μεταξύ 0.05% και 0.15%, ενώ παρατηρείται αύξηση κοντά στο σημείο του ρήγματος. Για όλες τις περιπτώσεις εσωτερικής πίεσης οι τιμές της παραμόρφωσης είναι πολύ κοντινές. Η παρουσία της πίεσης δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη μέγιστη παραμόρφωση του αγωγού για τις τιμές που εξετάζονται. Από την άλλη πλευρά, η ελάχιστη παραμόρφωση (Σχήμα 4.9(β)) κυμαίνεται από -0.005% έως -0.045%, με την τιμή να αυξάνεται όσο μειώνεται η πίεση. Ο αγωγός χωρίς εσωτερική πίεση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θλιπτική παραμόρφωση. Αντίθετα για τις μεγαλύτερες τιμές πίεσης (7MPa, 10MPa) , η θλιπτική παραμόρφωση μειώνεται γεγονός που υποδεικνύει ότι η αυξημένη εσωτερική πίεση μειώνει την καταπόνηση του αγωγού X52.

Για τις συνθήκες παρουσίας ανάστροφου ρήγματος, η εφελκυστική παραμόρφωση φτάνει σε τιμές έως -0.4% κοντά στο σημείο του ρήγματος (Σχήμα 4.10(α)), όπως και στο κανονικό ρήγμα η πίεση φαίνεται να έχει μικρή επίδραση στις εφελκυστικές παραμορφώσεις με μικρές διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών. Οι τιμές των θλιπτικών παραμορφώσεων, είναι μεγαλύτερες με την μέγιστη το -0.8% (Σχήμα 4.10(β)). Ο αγωγός φαίνεται να καταπονείται περισσότερο όσο οι εσωτερική πίεση μειώνεται.

Συνοψίζοντας, στο κανονικό ρήγμα η επίδραση της εσωτερικής πίεσης στον αγωγό είναι μικρή, με τις παραμορφώσεις να παραμένουν σε παρόμοια επίπεδα. Η μεγαλύτερη θλιπτική παραμόρφωση παρατηρείται σε περιβάλλον απουσίας εσωτερικής πίεσης. Στο ανάστροφο ρήγμα, η εσωτερική πίεση έχει μεγαλύτερη επίδραση στην ελάχιστη παραμόρφωση, με την αύξηση της πίεσης να μειώνει τη θλιπτική καταπόνηση του αγωγού.



Σχήμα 4.10: Επίδραση της εσωτερικής πίεσης για την περίπτωση κανονικού ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.



Σχήμα 4.10: Επίδραση της εσωτερικής πίεσης για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος: α) εφελκυστικές, β) θλιπτικές παραμορφώσεις του αγωγού στην περιοχή διάρρηξης.

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 4.4, η κινηματική καταπόνηση των αγωγών λόγω γεωκινδύνων αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα που απαιτεί προσεκτική μελέτη και αξιολόγηση. Οι διάφορες διερευνήσεις που παρουσιάστηκαν επισημαίνουν πως κάθε μια από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν μπορεί να επιδράσει διαφορετικά στην ακεραιότητα του αγωγού, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τα χαρακτηριστικά του σεισμικού φαινομένου. Κατά συνέπεια, διαπιστώνεται πως απαιτείται ενδεδειγμένη έρευνα για την αντοχή και την ασφάλεια των αγωγών σε σεισμικές περιοχές.

Από τη παραμετρική διερεύνηση ενός αγωγού υδρογόνου σε διασταύρωση με κανονικό ρήγμα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- **Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους (φ)**

- Η αύξηση γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους φ έχει σημαντική επίδραση στις παραμορφώσεις του αγωγού. Για μεγαλύτερες γωνίες (π.χ., $\varphi = 39^\circ$) παρατηρείται μεγαλύτερη εφελκυστική και θλιπτική παραμόρφωση κυρίως σε εδάφη μεγαλύτερης πυκνότητας.
- Οι χαμηλότερες τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής οδηγούν σε μικρότερες παραμορφώσεις και άρα μικρότερη καταπόνηση των αγωγών σε χαλαρά εδάφη.

- **Γωνία διάρρηξης του ρήγματος (β)**

- Για μεγαλύτερες τιμές γωνίας διάρρηξης (π.χ., $\beta = 60^\circ$) η κατανομή της παραμόρφωσης είναι πιο ομαλή και οι κορυφές είναι χαμηλότερες
- Οι μικρότερες τιμές για την γωνία διάρρηξης προκαλούν πιο απότομες παραμορφώσεις. Αυτό σημαίνει ότι ο αγωγός υπόκειται σε μεγαλύτερη καταπόνηση.
- Μεγαλύτερες τιμές γωνίας διάρρηξης ($\beta = 60^\circ$) οδηγούν σε πιο ομαλές κατανομές των παραμορφώσεων με μειωμένες κορυφές και ως αποτέλεσμα οι καταπονήσεις στον αγωγό είναι μικρότερες.

- **Συντελεστής τριβής f λόγω επικάλυψης του αγωγού**

- Όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής ($f = 0.7, 0.8, 0.9$) μεταξύ του και του εδάφους οι παραμορφώσεις αυξάνουν.
- Σε υψηλές τιμές του συντελεστή f , η καταπόνηση στον αγωγό είναι μεγάλες, κυρίως σε απόσταση 80 m από την αρχική θέση του αγωγού καθώς η αυξημένη τριβή εμποδίζει την κίνηση του αγωγού μέσα στο έδαφος προκαλώντας μεγαλύτερες παραμορφώσεις.
- Χαμηλότερες τιμές τριβής οδηγούν σε πιο ήπιες παραμορφώσεις γεγονός που μειώνει τις καταπονήσεις στον αγωγό.

- **Ποιότητα χάλυβα**

- Ο χάλυβας υψηλότερης ποιότητας X80 με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και τάση διαρροής εμφανίζει μικρότερες παραμορφώσεις και καλύτερη αντοχή στις καταπονήσεις για κανονικό ρήγμα.
- Οι παραμορφώσεις, είναι μεγαλύτερες για τον χαλβά χαμηλότερης ποιότητας X52, λόγω της χαμηλότερης αντοχής του.

- **Εσωτερική πίεση (P_{in})**

- Η ελάχιστη παραμόρφωση επηρεάζεται κυρίως από την πίεση του αγωγού. Όσο υψηλότερη είναι η πίεση τόσο μικρότερη είναι η θλιπτική παραμόρφωση γεγονός που δείχνει ότι η πίεση μειώνει την καταπόνηση στην περιοχή της θλίψης.
- Η αύξηση της εσωτερικής πίεσης μειώνει την ελάχιστη παραμόρφωση ενώ οι μέγιστες παραμορφώσεις δεν επηρεάζονται σημαντικά.
- Η απουσία εσωτερικής πίεσης οδηγεί σε μεγαλύτερη συμπτωστική παραμόρφωση.

Οι παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρότερες και με πιο ήπια κατανομή στο κανονικό ρήγμα συγκριτικά με το ανάστροφο. Αναλύοντας τις παραμέτρους που διερευνήθηκαν αναφορικά με το ανάστροφο ρήγμα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- **Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους (φ)**

- Η αύξηση της τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους έχει ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στο ανάστροφο ρήγμα, οι μεγαλύτερες γωνίες δηλαδή στα πιο πυκνά εδάφη προκαλούν πιο έντονες παραμορφώσεις, τόσο θλιπτικές όσο κι εφελκυστικές.
- Οι μικρότερες γωνίες (π.χ., $\varphi = 30$) οδηγούν σε πιο ήπια κατανομή των παραμορφώσεων.

- **Γωνία διάρρηξης του ρήγματος (β)**

- Στο ανάστροφο ρήγμα, η γωνία διάρρηξης β επηρεάζει έντονα την κατανομή των παραμορφώσεων. Οι μικρότερες γωνίες διάρρηξης προκαλούν υψηλές κορυφές παραμόρφωσης αυξάνοντας τη μηχανική καταπόνηση του αγωγού.
- Οι μεγαλύτερες γωνίες διάρρηξης οδηγούν σε πιο ομαλές παραμορφώσεις περιορίζοντας την κορύφωση των καταπονήσεων στον αγωγό.

- **Συντελεστής τριβής f λόγω επικάλυψης του αγωγού**

- Η αύξηση του συντελεστή τριβής f μεταξύ αγωγού και εδάφους αυξάνει τις καταπονήσεις, ειδικά στο ανάστροφο ρήγμα. Η παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά για τις επικαλύψεις αγωγού με υψηλό συντελεστή f , αυξάνοντας τις κορυφές στη μέγιστη και ελάχιστη παραμόρφωση.

- **Ποιότητα χάλυβα**

- ο Οι διαφορές στην ποιότητα του χάλυβα είναι επίσης πιο εμφανής στον ανάστροφο ρήγμα. Ο χάλυβας υψηλότερης ποιότητας X80 παρουσιάζει μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με το χαμηλότερης ποιότητας X52 γεγονός που υποδηλώνει τη μεγαλύτερη αντοχή στις καταπονήσεις.

- **Εσωτερική πίεση (Pin)**

- ο Η εσωτερική πίεση του αγωγού, στο ανάστροφο ρήγμα, έχει μεγαλύτερη επίδραση στην θλιπτική παραμόρφωση, όπου η αύξηση της πίεσης μειώνει τη συμπίεση του αγωγού, βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή του.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την επίδραση των παραμέτρων που εξετάστηκαν, επισημαίνοντας τη διαφοροποίηση των παραμορφώσεων ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες και τις ιδιότητες του αγωγού.

Πίνακας 4.3: Συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραμετρική διερεύνηση.

Παράμετρος	Κανονικό Ρήγμα	Ανάστροφο Ρήγμα	Συμπέρασμα
Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους (φ)	Αυξημένη γωνία τριβής φ προκαλεί μεγαλύτερη εφελκυστική και θλιπτική παραμόρφωση, ενώ χαμηλότερες τιμές τριβής οδηγούν σε μικρότερες παραμορφώσεις.	Στο ανάστροφο ρήγμα, η αύξηση της γωνίας τριβής προκαλεί ακόμα εντονότερες παραμορφώσεις, ενώ μικρότερες γωνίες οδηγούν σε πιο ήπιες κατανομές παραμορφώσεων.	Καταλληλότερο είναι το έδαφος μέτριας πυκνότητας.
Γωνία διάρρηξης του ρήγματος (β)	Μεγαλύτερες τιμές γωνίας διάρρηξης $\beta = 60^\circ$ οδηγούν σε πιο ομαλές κατανομές παραμορφώσεων με μειωμένες τιμές, ενώ μικρότερες τιμές προκαλούν απότομες παραμορφώσεις.	Στο ανάστροφο ρήγμα, μικρές γωνίες διάρρηξης προκαλούν υψηλές παραμορφώσεις, ενώ μεγαλύτερες γωνίες περιορίζουν τις κορυφές καταπονήσεων.	Για γωνία διάρρηξης ρήγματος $\beta = 60^\circ$ προκύπτουν ήπιες παραμορφώσεις.
Συντελεστής τριβής f λόγω επικάλυψης του αγωγού	Η αύξηση του f αυξάνει τις παραμορφώσεις, ενώ χαμηλότερες τιμές μειώνουν τις καταπονήσεις στον αγωγό.	Υψηλός συντελεστής τριβής f αυξάνει την παραμόρφωση στον αγωγό, ειδικά στο ανάστροφο ρήγμα.	Καταλληλότερη είναι η επιλογή σκληρού χάλυβα για την επικάλυψη του αγωγού ($f = 0.8$)
Ποιότητα χάλυβα	Χάλυβας X80 με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και τάση διαρροής εμφανίζει μικρότερες παραμορφώσεις	Στο ανάστροφο ρήγμα, η διαφορά ποιότητας χάλυβα είναι πιο εμφανής, με τον X80 να παρουσιάζει μικρότερες	Καταλληλότερη είναι η επιλογή χάλυβα X80 για μεγαλύτερη αντοχή σε καταπονήσεις.

συγκριτικά με τον παραμορφώσεις από χαμηλότερης ποιότητας χάλυβα X52. τον X52.

Εσωτερική πίεση (Pin)	Αυξημένη πίεση μειώνει την ελάχιστη παραμόρφωση χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τις μέγιστες παραμορφώσεις, ενώ η απουσία πίεσης αυξάνει την συμπιεστική παραμόρφωση.	Στο ανάστροφο ρήγμα, η εσωτερική πίεση έχει μεγαλύτερη επίδραση στη θλιπτική παραμόρφωση, όπου η αύξηση της πίεσης βελτιώνει την απόδοση του αγωγού.	Προτιμάται σχετικά υψηλή εσωτερική πίεση στον αγωγό σύμφωνα με τις τιμές που διερευνήθηκαν. Ο αγωγός αστοχεί σε μηδενική πίεση στην περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος λόγω αυξημένων θλιπτικών παραμορφώσεων.
-----------------------	--	--	---

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα / Μελλοντικές προεκτάσεις

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν μελέτη της επίδρασης των σεισμικών ρηγμάτων σε αγωγούς που μεταφέρουν φυσικό αέριο αναμεμειγμένο με υδρογόνο και η ανάλυση των παραμέτρων που μπορεί να σχετίζονται με τη συγκεκριμένη διαδικασία καθώς και η εξερεύνηση της πιθανότητας μετατροπής ενός υφιστάμενου δικτύου μεταφοράς φυσικού αερίου σε μεταφοράς υδρογόνου. Η παραμετρική ανάλυση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες ρηγμάτων (α) κανονικό και (β) ανάστροφο ρήγμα και οι παράμετροι ο οποίες διερευνήθηκαν είναι οι εξής:

- Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
- Συντελεστής τριβής λόγω επικάλυψης αγωγού
- Γωνία διάρρηξης του ρήγματος
- Ποιότητα χάλυβα
- Εσωτερική πίεση

Πρακτικά, το φαινόμενο της διασταύρωσης ενός αγωγού με κάποιο σεισμικό ρήγμα είναι σύνηθες σε υπόγειους αγωγούς. Επιπλέον, είναι πιθανό να μην υπάρχουν πλήρη δεδομένα για κάποιο ρήγμα, ενώ ακόμα και να υπάρχουν δεδομένα η αποφυγή του να είναι αδύνατη από τεχνική ή και οικονομική άποψη. Οι σωστές προδιαγραφές, για ένα δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου, είναι ζωτικής σημασίας, καθώς, κάποια μορφή αστοχίας μπορεί να έχει εξαιρετικής σημαντικότητας επιπτώσεις. Ακόμη περισσότερο, όταν πρόκειται για την μεταφορά μίγματος φυσικού αερίου και υδρογόνου ή αποκλειστικά υδρογόνο το οποίο είναι πιο «ευαίσθητο» συγκριτικά με το φυσικό αέριο όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Η κατάλληλη επιλογή, για τις τιμές των διαφορετικών παραμέτρων, που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία ενός αγωγού, είναι καίριας σημασίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας του αγωγού. Χρησιμοποιώντας ρεαλιστικές τιμές, που επιτρέπουν στο δίκτυο τη μεταφορά μίγματος φυσικού αερίου και υδρογόνου, ή αποκλειστικά υδρογόνου, διατηρείται η βιωσιμότητα του συστήματος αυτού τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά.

Αναφορικά με το δίκτυο μεταφοράς υδρογόνου, αξίζει να σημειωθεί πως η δημιουργία ενός νέου δικτύου, το οποίο να λειτουργεί σε προδιαγραφές αποκλειστικά για μεταφορά υδρογόνου, είναι μια επιλογή αρκετά κοστοβόρα, αλλά και χρονοβόρα. Η παρούσα μελέτη καταλήγει σε σημαντικά ευρήματα αναφορικά με την απόκριση των αγωγών υδρογόνου υπό σεισμική καταπόνηση. Τα ενεργά σεισμικά ρήγματα και οι γεωκίνδυνοι αποτελούν σοβαρό παράγοντα επικινδυνότητας για την ακεραιότητα των

αγωγών. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι η επικάλυψη του αγωγού, η ποιότητα του χάλυβα, αλλά και η εσωτερική πίεση αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας ενός αγωγού υδρογόνου. Επιπλέον, η χρήση υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου για τη μεταφορά μίγματος υδρογόνου και φυσικού αερίου φαίνεται εφικτή, υπό την προϋπόθεση ότι θα εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας και θα γίνουν οι αναγκαίες προσαρμογές στα υλικά και τον σχεδιασμό των αγωγών.

Συνοψίζοντας, τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

- Ανάγκη ασφαλούς μεταφοράς υδρογόνου: Η αυξημένη ανάγκη για «πράσινες» πηγές ενέργειας καθιστά το υδρογόνο κρίσιμο για την ενεργειακή μετάβαση. Ωστόσο η μεταφορά του παρουσιάζει προκλήσεις, ειδικά όταν εμπλέκονται σεισμικά φαινόμενα που επηρεάζουν την ακεραιότητα των αγωγών μεταφοράς.
- Προκλήσεις λόγω των σεισμικών ρηγμάτων: Τα ενεργά σεισμικά ρήγματα δημιουργούν υψηλό βαθμό κινδύνου για τους αγωγούς λόγω της πιθανότητας παραμορφώσεων και βλαβών, γεγονός που επηρεάζει ιδιαίτερα την δομική ακεραιότητα των αγωγών. Η μελέτη υποδεικνύει την ανάγκη κατανόησης των κινηματικών καταπονήσεων στους αγωγούς, για να μειωθούν οι πιθανότητες αστοχίας.
- Υλικό κατασκευής και σχεδιασμός: Η επιλογή υλικού και ο τρόπος κατασκευής των αγωγών μεταφοράς παίζουν καθοριστικό ρόλο. Το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει ψαθυροποίηση σε μεταλλικούς αγωγούς, κυρίως σε συνθήκες υψηλής πίεσης ή μηχανικής καταπόνησης με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος διαρροών και αστοχίας.
- Σημασία ρυθμιστικών πλαισίων: Η τήρηση των διεθνών κανονισμών για την ασφάλεια είναι καίριας σημασίας για τη βιωσιμότητα των αγωγών υδρογόνου. Ιδιαίτερα τα κανονιστικά πλαίσια όπως αυτά των ASME και ALA, είναι βαρύνουσας σημασίας για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας μιας υποδομής μεταφοράς υδρογόνου.

Η παρούσα μελέτη μπορεί σε επεκταθεί σε διάφορες κατευθύνσεις. Μια από αυτές είναι η διερεύνηση περισσότερων ειδών εδαφών. Η μελέτη μπορεί να επεκταθεί με την αξιολόγηση διαφορετικών τύπων εδαφών πέρα από το αμμώδες έδαφος. Η συμπεριφορά αγωγών εδραζόμενων σε βράχο και αργιλικά εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες. Επίσης, η διερεύνηση των παραμορφώσεων σε σύνθετες γεωλογικές δομές με διαφορετικά στρώματα εδάφους μπορεί να προσφέρει πιο ακριβή δεδομένα για τις συνθήκες

αγωγών υδρογόνου σε πολυστρωματικά υπεδάφη. Γενικά, η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των αγωγών λαμβάνοντας υπόψη και τη χωρική μεταβολή των εδαφικών μετακινήσεων για καλύτερη κατανόηση των γεωλογικών/γεωτεχνικών συνθηκών

Ακόμη, μια σημαντική παράμετρος που θα μπορούσε να διερευνηθεί μελλοντικά, είναι η ανάπτυξη νέων υλικών, ειδικά στο εσωτερικό των αγωγών. Η μελέτη νέων σύνθετων υλικών για αγωγούς που συνδυάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα χαμηλότερο βάρος και καλύτερη αντοχή στις παραμορφώσεις θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντική προέκταση της μελέτης αυτής. Λόγω της αναμενόμενης αύξησης της ζήτησης υδρογόνου ως εναλλακτική μορφή ενέργειας, οι αγωγοί που μεταφέρουν υδρογόνο θα μπορούσαν να εξεταστούν περαιτέρω η βελτίωση της ανθεκτικότητας των αγωγών στη διάβρωση και την σταθεροποίηση λόγω του υδρογόνου είναι σημαντικό πεδίο της έρευνας.

Επιπλέον, η προσαρμογή στις κλιματικές αλλαγές θα πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα για τη διερεύνηση περιβαλλοντικών συνθηκών για τη μεταφορά υδρογόνου. Με σημαντικές αλλαγές, αναμένονται ακραίες θερμοκρασίες, διακυμάνσεις υγρασίας, και αλλαγές στη σύνθεση του εδάφους. Μελλοντική έρευνα μπορεί να εξετάζει πώς επηρεάζονται οι παραμορφώσεις των αγωγών από τέτοιες συνθήκες ακόμα η ανάλυση της επίδρασης των παγετώνων και των θερμικών κυμάτων, καθώς και η διερεύνηση της συμπεριφοράς των αγωγών στις περιοχές με ακραίες κλιματικές συνθήκες και τις νέες απαιτήσεις σχεδιασμού για την προστασία των αγωγών.

Η ανάλυση και προσομοίωση σε τριδιάστατο περιβάλλον, αντί για διδιάστατο, με τη χρήση κατάλληλων τύπων πεπερασμένων στοιχείων θα μπορούσε να προσφέρει πληρέστερη εικόνα των καταπονήσεων και των παραμορφώσεων που υφίστανται οι αγωγοί. Ειδικά αν γίνει συνδυασμένη εξέταση πολλαπλών παραμέτρων (π.χ., ταυτόχρονη επίδραση θερμοκρασίας, σεισμικής καταπόνησης και εσωτερικής πίεσης), αυτή θα μπορούσε να δώσει πιο ακριβείς και ρεαλιστικές προβλέψεις για τη συμπεριφορά των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη και την ύπαρξη εσωτερικών αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων.

Οι μελλοντικές προεκτάσεις της έρευνας θα προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την περαιτέρω βελτίωση της αντοχής και της ασφάλειας των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, τις αυξημένες απαιτήσεις για τη μεταφορά υδρογόνου καθώς και τις νέες τεχνολογίες υλικών και προστασίας. Η συνέχιση της έρευνας με σύγχρονα εργαλεία προσομοίωσης και σχεδιαστικές/κατασκευαστικές πρακτικές θα συμβάλει στη διασφάλιση της

μακροχρόνιας βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας των αγωγών σε γεωλογικά και περιβαλλοντικά φαινόμενα.

Βιβλιογραφία

- Abdoun, T. H., Ha, D., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., & Stewart, H. E. (2009). *Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(3), 415–427. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.04.006>
- Agency for the Cooperation of Energy Regulators. (2022, October 18). Repurposing existing gas infrastructure to pure hydrogen: ACER finds divergent visions of the future. *Agency for the Cooperation of Energy Regulators*. <https://www.acer.europa.eu/news-and-events/news/repurposing-existing-gas-infrastructure-pure-hydrogen-acer-finds-divergent-visions-future>
- Ahad, M., Bhuiyan, M., Sakib, A., Corral, A. B., & Siddique, Z. (2023a). An overview of challenges for the future of hydrogen. *Materials*, 16(20), 6680. <https://doi.org/10.3390/ma16206680>
- Akram, M. R., Yesilyurt, A., Zulfikar, C., & Goktepe, F. (2020). Failure analysis of buried gas pipelines crossing seismic faults. *Academic Perspective Procedia*, 3(2), 781–790. <https://doi.org/10.33793/acperpro.03.02.2>
- American Society of Mechanical Engineers. (2019). ASME B31.12: Hydrogen piping and pipelines. American Society of Mechanical Engineers
- American Society of Mechanical Engineers. (2007). *ASME B31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. ASME.
- American Life Alliance (2001) Soil springs and their impact on infrastructure <https://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Update061305.pdf>
- Alternative Fuels Data Center. (2024, June). Hydrogen benefits and considerations. *U.S. Department of Energy*. <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen-benefits>
- Bauer, W. (2023, October 16). *Safely transporting green hydrogen*. *Physics*. <https://physics.aps.org/articles/v16/175>
- Ben-Zeev, S., Goren, L., Toussaint, R., & Aharonov, E. (2023a). Drainage explains soil liquefaction beyond the earthquake near-field. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41405-4>

- Ben-Zeev, S., Goren, L., Toussaint, R., & Aharonov, E. (2023b). Drainage explains soil liquefaction beyond the earthquake near-field. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41405-4>
- Bhandari, R., Shah, R. R., (2021). Hydrogen as energy carrier: *Techno-economic assessment of decentralized hydrogen production in Germany*. Pipeline Technology Conference, Berlin, Germany.
- Boukourt, H., Amara, M., Hadj Meliani, M., Bouledroua, O., Muthanna, B. G. N., Suleiman, R. K., Sorour, A. A., & Pluvina, G. (2018). Hydrogen embrittlement effect on the structural integrity of API 5L X52 steel pipeline. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(40), 18312–18321. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.149>
- British Geological Survey. (2021, September 20). *How to classify a landslide - British Geological Survey*. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/landslides/how-to-classify-a-landslide/>
- British Geological Survey. (2024, September 6). *Shallow geohazards - British Geological Survey*. <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/shallow-geohazards/>
- Broder, J. F., & Tucker, E. (2012). Response planning. In *Elsevier eBooks* (pp. 135–200). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-382233-8.00014-5>
- Calabrese, M., Portarapillo, M., Di Nardo, A., Venezia, V., Turco, M., Luciani, G., & Di Benedetto, A. (2024a). Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive review on production, storage, transport, utilization, and CFD-Based Consequence and Risk assessment. *Energies*, 17(6), 1350. <https://doi.org/10.3390/en17061350>
- Calabrese, M., Portarapillo, M., Di Nardo, A., Venezia, V., Turco, M., Luciani, G., & Di Benedetto, A. (2024b). Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive review on production, storage, transport, utilization, and CFD-Based Consequence and Risk assessment. *Energies*, 17(6), 1350. <https://doi.org/10.3390/en17061350>
- California Public Utilities Commission. (2022, July 21). *CPUC issues independent study on injecting hydrogen into natural gas systems*. <https://www.cpuc.ca.gov/news-and-updates/all-news/cpuc-issues-independent-study-on-injecting-hydrogen-into-natural-gas-systems>
- Camargo, J. M. R., Silva, M. V. B., Júnior, A. V. F., & Araújo, T. C. M. (2019). Marine Geohazards: A Bibliometric-Based Review. *Geosciences*, 9(2), 100. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020100>

- Caskey, G. R. (1985). Hydrogen degradation of ferrous alloys. In R. A. Oriani, J. P. Hirth, & M. Smialowski (Eds.), *Hydrogen degradation of ferrous alloys* (p. 822). Noyes Publications.
- Castiglia, M., Santucci de Magistris, F., & Koseki, J. (2019). Uplift of buried pipelines in liquefiable soils using shaking table apparatus. In F. Silvestri & A. Moraci (Eds.), *Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions*. Associazione Geotecnica Italiana. <https://doi.org/10.1201/9780429031274>
- Center for Hydrogen Safety. (2024, July). *Gaseous hydrogen properties and behaviors*. H2Tools. <https://h2tools.org/bestpractices/gaseous-hydrogen-properties-and-behaviors>
- Chen, W., Konietzky, H., & Abbas, S. M. (2015). Numerical simulation of time-independent and -dependent fracturing in sandstone. *Engineering Geology*, 193, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.021>
- Corner, E. (2022, November 1). Achieving accurate leak detection in hydrogen pipelines. *World Pipelines*. <https://www.worldpipelines.com/special-reports/01112022/achieving-accurate-leak-detection-in-hydrogen-pipelines/>
- Darsaliya, N. M., Farukhshina, R. R., & Saddik, Z. E. (2023). Transportation of hydrogen by main gas pipelines as a methane-hydrogen mixture. *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.21595/lger.2022.23097>
- Demaco Cryogenics. (2021, October 12). *Hydrogen embrittlement: What is it and how to prevent it?* Demaco Cryogenics. <https://demaco-cryogenics.com/blog/hydrogen-embrittlement/>
- Dulger, M., & Kilic, H. (2024). Investigation of earthquake-induced pipe damage in liquefiable soils. *Applied Sciences*, 14(11), 4599. <https://doi.org/10.3390/app14114599>
- El-Shafie, M., Kambara, S., & Hayakawa, Y. (2019). Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*, 07(01), 107–154. <https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007>
- EPRG. (2021, March 11). Hydrogen pipelines - literature study on design and material challenges available for download. *EPRG*. <https://eprg.net/about-eprg/news/news-detail/hydrogen-pipelines-design-and-material-challenges-and-mitigations>
- European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. European Commission. <https://ec.europa.eu/>

- European Industrial Gases Association. (2014). *EIGA Document 15/14: Hydrogen transportation pipelines*. European Industrial Gases Association.
- European Union Civil Protection Knowledge Network. (2024, July). *Geophysical risk*. European Commission. <https://civil-protection-knowledge-network.europa.eu/eu-overview-risks/natural-disaster-risks/geophysical-risk>
- FASTECH. (2024, June 11). Breaking down the different hydrogen production methods. *FASTECH*. <https://www.fastechus.com/blog/breaking-down-different-hydrogen-production-methods>
- Fetisov, V., Davardoost, H., & Mogylevets, V. (2023). Technological Aspects of Methane–Hydrogen Mixture Transportation through Operating Gas Pipelines Considering Industrial and Fire Safety. *Fire*, 6(10), 409. <https://doi.org/10.3390/fire6100409>
- Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G., Dall'Asta, A., Di Sarno, L., Giaralis, A., Gutiérrez-Urzúa, F., Málaga-Chuquitaype, C., Mitoulis, S. A., Petrone, C., Sextos, A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J., & Woo, G. (2021). Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102267. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102267>
- Flux Power (2021, January 14). *Hydrogen fuel cell advantages and disadvantages in material handling*. <https://www.fluxpower.com/blog/hydrogen-fuel-cell-advantages-and-disadvantages-in-material-handling>
- Gangloff, R. P., & Somerday, B. P. (Eds.). (2012). *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies, Vol. 1 and 2*. Woodhead Publishing Limited.
- Gantes, C. J., & Melissianos, V. E. (2016). Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture. *Frontiers in Built Environment*, 2. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00034>
- Gallon, N. (2020, December 22). Hydrogen Pipelines – Design and material challenges and mitigations (EPRG Project 221/2020. Rosen UK.
- Gas Infrastructure Europe. (2024, June 10). Updated hydrogen infrastructure map now identifies PCI/PMI status projects. *Gas Infrastructure Europe*. <https://www.gie.eu/press/updated-hydrogen-infrastructure-map-now-identifies-pci-pmi-status-projects/>
- Guy, P., & Julien, C. (2022). Risks Associated with the Use of Hydrogen as an Energy Carrier or Source. *Journal of Energy and Power Technology*, 4(3), 1. <https://doi.org/10.21926/jept.2203029>

- Haq, A. (2024, May 3). *Fracture, fracture everywhere* – part I. GeoExpro. <https://geoexpro.com/fracture-fracture-everywhere-part-i/>
- Huang, P., Wu, X., Ma, C., & Zhou, A. (2023). Geo-Environment vulnerability assessment of multiple geohazards using VWT-AHP: A case study of the Pearl River Delta, China. *Remote Sensing*, 15(20), 5007. <https://doi.org/10.3390/rs15205007>
- Hydrogen Europe. (2020). *Hydrogen Europe Reports on Infrastructure and Safety of Hydrogen Pipelines*. Hydrogen Europe. Retrieved from <https://hydrogeneurope.eu/>
- H2tools. (2024, October). Hydrogen compared with other fuels. *Hydrogen Tools*. <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>
- IADC Dredging. (2019, August 16). *Earthquakes - Earthquakes can cause liquefaction of soil because during an earthquake the soil loses its strength or stiffness, and can result in failure and landslides*. <https://www.iadc-dredging.com/subject/weather-events/earthquakes/>
- International Renewable Energy Agency. (n.d.). *Geopolitics of the energy transformation: The hydrogen factor*. <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation>
- Islam, M. S., & Islam, M. A. (2018). Reduction of landslide risk and Water-Logging using vegetation. *E3S Web of Conferences*, 65, 06003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186506003>
- Jolly, W. L. (2024, August 20). *Hydrogen | Properties, Uses, & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/hydrogen>
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D., Kouretzis, G. P., & Gkesouli, V. (2011, November). An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(11), 1452–1464. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.05.012>
- Kaya, E. S. (2024). Earthquake damage mitigation methods for buried pipelines under compressive loads: A case study of the Thames water pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105322>
- Katsuumi, A., Cong, Y., & Inazumi, S. (2024). AI-Driven prediction and mapping of soil liquefaction risks for enhancing earthquake resilience in smart cities. *Smart Cities*, 7(4), 1836–1856. <https://doi.org/10.3390/smartcities7040071>

- Kish, Z. (2022, March 29). *Circular and hydrogen economy based on waste chemical recycling*. Advanced Waste Solutions. <https://advancedwastesolutions.ca/2022/03/29/circular-and-hydrogen-economy-based-on-waste-chemical-recycling/>
- Kuczyński, S., Łaciak, M., Olijnyk, A., Szurlej, A., & Włodek, T. (2019). Thermodynamic and technical issues of hydrogen and Methane-Hydrogen mixtures pipeline transmission. *Energies*, 12(3), 569. <https://doi.org/10.3390/en12030569>
- Lamari, F., Weinberger, B., Langlois, P., & Fruchart, D. (2024). Instances of Safety-Related advances in hydrogen as regards its gaseous transport and buffer storage and its Solid-State storage. *Hydrogen*, 5(3), 387–402. <https://doi.org/10.3390/hydrogen5030022>
- LaoRen, & Günther, R. (2024, February 6). *Pros and Cons of hydrogen energy storage: Is worth the investment?* CLOU GLOBAL. <https://clouglobal.com/the-pros-and-cons-of-hydrogen-energy-storage-is-worth-the-investment/>
- Le, T., Tran, N., & Lee, H. (2024). Development of liquid organic hydrogen carriers for hydrogen storage and transport. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1359. <https://doi.org/10.3390/ijms25021359>
- Lee, D. H., Kim, B. H., Lee, H., & Kong, J. S. (2009). Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations. *Engineering Structures*, 31(5), 1011–1023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.012>
- Li, J., Song, F., & Zhang, X. (2024). A Review on Hazards and Risks to Pipeline Operation under Transporting Hydrogen Energy and Hydrogen-mixed Natural Gas. *Science and Technology for Energy Transition*, 79, 9. <https://doi.org/10.2516/stet/2024004>
- Li, W., McGuire, L. A., & Eppes, M. C. (2018). Modeling the influence of rock geometry on thermal stress weathering. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(2), 368–386. <https://doi.org/10.1002/2017JF004236>
- Libretexts. (2024, January 24). 8.4.1: *Hydrogen's Chemical Properties*. Chemistry LibreTexts. https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Inorganic_Chemistry_%28LibreTexts%29/08:_Chemistry_of_the_Main_Group_Elements/8.04:_Hydrogen/8.4.01:_Hydrogen%27s_Chemical_Properties
- Makrakis, N., Psarropoulos, P. N., Sextos, A., & Tsompanakis, Y. (2024). Do soft soil layers reduce the seismic kinematic distress of onshore high-pressure gas pipelines? *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(1), 159–189. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01668-0>

- Mahajan, D., Tan, K., Venkatesh, T., Kileti, P., & Clayton, C. R. (2022a). Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. *Energies*, 15(10), 3582. <https://doi.org/10.3390/en15103582>
- Mahajan, D., Tan, K., Venkatesh, T., Kileti, P., & Clayton, C. R. (2022b). Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. *Energies*, 15(10), 3582. <https://doi.org/10.3390/en15103582>
- Martino, M., Ruocco, C., Meloni, E., Pullumbi, P., & Palma, V. (2021). Main Hydrogen Production Processes: An Overview. *Catalysts*, 11(5), 547. <https://doi.org/10.3390/catal11050547>
- Meillaud, L. (2024, February 23). *Hydrogen Infrastructure Map: a real-time map of Europe's pipelines*. H2Today. <https://hydrogentoday.info/en/hydrogen-infrastructure-interactive-map/>
- Monroy-Concha, M. (2014). *Soil restraints on steel buried pipelines crossing active seismic faults* (Master's thesis). University of British Columbia. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0074267>
- National Fire Protection Association. (2020). *NFPA 2: Hydrogen Technologies Code*. National Fire Protection Association.
- National Geographic Society (2024, April 26). *Landslide*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/landslide/>
- Olander, Inc. (2024). *Understanding hydrogen embrittlement: How it impacts metal durability*. Olander. <https://www.olander.com/blog/84-understanding-hydrogen-embrittlement>
- Onyango, D. (2024, December 13). *New hydrogen infrastructure map shows rapid growth in Europe*. Pipeline Technology Journal. <https://www.pipeline-journal.net/news/new-hydrogen-infrastructure-map-shows-rapid-growth-europe>
- Philippine Institute of Volcanology and Seismology. (n.d.) *Earthquake hazards*. Department of Science and Technology. Retrieved (2024, October 10), from <https://www.phivolcs.dost.gov.ph/index.php/earthquake/earthquake-hazards>
- Psarropoulos, P. N., Tsompanakis, Y., & Gazetas, G. (2012). *Seismic reliability of slopes and embankments*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 32(1), 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.10.009>
- Psyrras, N. K., & Sextos, A. G. (2018). Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: A review. *Soil Dynamics and*

- Reda, B., Elzamar, A. A., AlFazzani, S., & Ezzat, S. M. (2024). Green hydrogen as a source of renewable energy: a step towards sustainability, an overview. *Environment Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04892-z>
- Reed Smith LLP. (2022, June 27). Hydrogen regulations by jurisdiction and changing transmission systems | *Energy Transition 2022 | Perspectives*. Reed Smith LLP. <https://www.reedsmith.com/en/perspectives/energy-transition/2022/06/hydrogen-regulations-by-jurisdiction-and-changing-transmission-systems>
- Riis, T., Hagen, E. F., Ulleberg, Ø., Vie, P. J. S., & Sandrock, G. (2006). *Hydrogen production and storage: R&D priorities and gaps*. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/publications>
- Siemens Energy. (2020, September 11). *Repurposing natural gas infrastructure for hydrogen* <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/repurposing-natural-gas-infrastructure-for-hydrogen.html>
- Silvestri, F., & Moraci, N. (Eds.). (2019). *Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780429031274>
- Sim, K. B., Lee, M. L., & Wong, S. Y. (2022). A review of landslide acceptable risk and tolerable risk. *Geoenvironmental Disasters*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00205-6>
- Smith, K. (2013). *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster* (6th ed.). Routledge.
- Sobola, D., & Dallaev, R. (2024). Exploring Hydrogen Embrittlement: Mechanisms, consequences, and advances in metal science. *Energies*, 17(12), 2972. <https://doi.org/10.3390/en17122972>
- S&P Global Commodity Insights. (2024, January 30). *Pipeline network crucial to Europe's bold 2030 hydrogen plans*. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/013024-pipeline-network-crucial-to-europes-bold-2030-hydrogen-plans>

- Southwest Research Institute. (2018, Spring). *Liquefaction consortium to improve earthquake models*. <https://www.swri.org/technology-today/liquefaction-consortium-earthquake-models>
- Tectonics Observatory. (n.d.). *Chi-Chi earthquake*. Retrieved [October 2024], from <http://www.tectonicsweb.eu/images/ChiChi/Chi-Chi.html>
- The Role of FERC in Regulating Hydrogen Infrastructure. (2023). *Journal of Energy Policy and Regulation*. Ανακτήθηκε από <https://www.energyjournal.org/ferc-regulation-hydrogen-infrastructure>
- Tian, X., & Pei, J. (2023a). Study progress on the pipeline transportation safety of hydrogen-blended natural gas. *Heliyon*, 9(11), e21454. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21454>
- Toprak, S., & Taskin, F. (2006). Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking. *Natural Hazards*, 40(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0002-1>
- Uckan, E., Aksel, M., Atas, O., Toprak, S., & Kaya, E. S. (2024). The performance of transmission pipelines on February 6th, 2023 Kahramanmaraş earthquake: A series of case studies. *Journal of Earthquake Engineering and Infrastructure*. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01957-2>
- U.S. Department of Energy. (2021). *Hydrogen Pipeline Working Group Report*. U.S. Department of Energy. Retrieved from <https://www.energy.gov/>
- U.S. Geological Survey. (2024, February 14). What is a landslide and what causes one? *U.S. Geological Survey*. <https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes-one>
- Vargas, C. A. (2023). Advanced technology and data analysis of monitoring observations in seismology. *Applied Sciences*, 13(19), 10561. <https://doi.org/10.3390/app131910561>
- WHA International, Inc. (2023, September 21). *Case study: Power plant hydrogen explosion*. <https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/>
- Yoho, G. P., Jensen, K. P., Biagiotti, S. F., Nidd, P., (2023). *Considerations and challenges when assessing the conversion of a pipeline to hydrogen service*. Pipeline Technology Conference, Berlin, Germany.
- Züttel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Materials Today*, 6(9), 24–33. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(03\)00922-2](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(03)00922-2)