



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
ΠΜΣ Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου
Διπλωματική Εργασία

**Τίτλος Διπλωματικής
Εργασίας:**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ
ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ
ΣΥΝΕΠΑΓΟΜΕΝΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΤΟΥΣ
ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΑΕΡΙΟΥ**

Όνοματεπώνυμο Φοιτητή: ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αρ.Μητρώου Φοιτητή: 20200059

Επιβλέπων: Δρ. Φίλιππος-Μάρκος Σπανίδης,
Διευθυντής Έργων Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου
ΑΣΠΡΟΦΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ Α.Ε.
(μέλος του Ομίλου της HELLENiQ ENERGY A.E.)

Ημερομηνία: 17 Μαΐου 2024

Επιτροπή αξιολόγησης και βαθμολόγησης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Δρ Αιμιλία Κονδύλη, Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

(Όνομα)

(Υπογραφή)

Δρ Ιωάννης Καδδέλλης, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

(Όνομα)

(Υπογραφή)

Δήλωση Συγγραφής

Εγώ, ο Παπαδημητρίου Δημήτριος επιβεβαιώνω ότι η εργασία με τίτλο «**Διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης και των συνεπαγόμενων κινδύνων στους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου**» είναι δική μου δουλειά. Δεν έχω αντιγράψει κατά λέξη άλλο υλικό, εκτός από ρητά εισαγωγικά και έχω προσδιορίσει με σαφήνεια τις πηγές του υλικού.

Αθήνα, Μάιος 2024

Υπογραφή



Παπαδημητρίου Δημήτριος

Δήλωση συγγραφέα Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παπαδημητρίου Δημήτριος του Ιωάννου, με Αριθμό Μητρώου 20200059 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Αθήνα, Μάιος 2024

Ο Δηλών



Παπαδημητρίου Δημήτριος

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια εκπόνησης της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής μου Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου για την καθοριστική συμβολή τους στα γνωστικά αντικείμενα που παρακολούθησα για την ολοκλήρωση των σπουδών μου κατά την διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος του Πανεπιστημίου Αυτικής Αττικής. Επίσης οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους Εμπειρογνώμονες από την ΑΣΠΡΟΦΟΣ και τον ΔΕΣΦΑ που συνέδραμαν με την καθοδήγηση και εμπειρία τους. Τέλος, ιδιαίτερα επιθυμώ να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, επιβλέποντα την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία και συνάδελφο Δρ Φίλιππο-Μάρκο Σπακνίδη για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας με τις εύστοχες και εποικοδομητικές παρατηρήσεις του.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει το φαινόμενο της διάβρωσης που εκδηλώνεται στις μηχανολογικές υποδομές των αγωγών και στις συναφείς υποδομές μεταφοράς φυσικού αερίου (ΦΑ), με έμφαση στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς. Μελετώνται θέματα τεχνολογίας και απαιτήσεων στο πεδίο κατασκευής σωληναγωγών στην σύγχρονη βιομηχανία, όπως οι τρόποι κατασκευής, το αυστηρό πλαίσιο προτύπων και αυστηρών ελέγχων σε όλα τα στάδια παραγωγής και ανέγερσης. Εξετάζεται η θεωρητική διάσταση της διάβρωσης, οι αιτίες που την προκαλούν και τα συμπτώματα που εντοπίζονται στο υλικό των εγκατεστημένων αγωγών μεταφοράς ΦΑ, ως αποτέλεσμα της διαβρωτικής δράσης του εδάφους και πώς αυτό αλληλοεπιδρά με το υλικό.

Γίνεται περιγραφή και εκτενείς ανάλυση των τριών (3) βασικών τύπων διάβρωσης που συναντώνται στις περισσότερες περιπτώσεις αστοχιών αγωγών ΦΑ. Καταγράφονται τα αίτια εμφάνισης, οι τρόποι που εκδηλώνονται και αναπτύσσονται, τα καταστρεπτικά αποτελέσματα στους αγωγούς, καθώς και ανασταλτικά μέτρα περιορισμού του φαινομένου της διάβρωσης τα οποία λαμβάνονται.

Περιγράφεται αναλυτικά το πλαίσιο και το διάγραμμα ροής της γενικής μεθοδολογίας με τα βήματα έρευνας, καθώς και η Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος, ως επιλεγείσα μέθοδος απεικόνισης που χρησιμοποιείται στη σύγχρονη βιομηχανία, αξιολογώντας τις πιθανότητες εκδήλωσης και των σχετικών επιπτώσεων που καταγράφονται.

Μετά την βιβλιογραφική επισκόπηση εξετάζεται Μελέτη Περίπτωσης για υπόγειο αγωγό μεταφοράς ΦΑ και κατόπιν συνεργασίας με Εμπειρογνώμονες από το χώρο της βιομηχανίας του ΦΑ και της ενέργειας, ποσοτικοποιούνται τα φαινόμενα της διάβρωσης της εργασίας. Πραγματοποιούνται εκτιμήσεις των αιτιών εμφάνισης των φαινομένων καθώς και των επιπτώσεων και διενεργείται Ανάλυση Κινδύνων.

Τέλος εξετάζονται ορισμένα τεχνικοοικονομικής φύσεως θέματα με ιδιαίτερη σημασία για το κόστος διαχείρισης του φαινομένου της διάβρωσης, παρουσιάζοντας τα συμπεράσματα της εργασίας και τις προτάσεις περαιτέρω έρευνας.

Λέξεις Κλειδιά

Αγωγός Μεταφοράς Φυσικού Αερίου, Διάβρωση, Διάβρωση Επηρεαζόμενη από το Υδρογόνο, Μικροβιακά Επηρεαζόμενη Διάβρωση, Συνδυασμένη Δυναμοδιάβρωση, Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος, Αστοχίες Αγωγού, Επίστρωση, Αποκατάσταση Αστοχιών, Ανάλυση Κινδύνων

Abstract

This paper investigates the phenomenon of corrosion occurring in the engineering infrastructure of pipelines and associated natural gas (NG) transmission infrastructure, with emphasis on underground transmission pipelines. Technology issues and requirements in the field of pipeline construction in the modern industry are studied, such as construction methods, strict regulations and stringent controls at all stages of production and erection.

The theoretical dimension of corrosion, its causes and symptoms identified in the material of installed NG transmission pipelines as a result of the corrosive action of the soil and how this interacts with the material are examined.

A description and extensive analysis of the three (3) basic types of corrosion found in the most common cases of NG pipeline failures is provided. The causes of occurrence, the ways in which they manifest and develop, the destructive effects on the pipelines, and inhibitory measures taken to limit the corrosion phenomenon are described.

The framework and flowchart of the general methodology with investigation steps is described in detail, as well as Fault Tree Analysis as the chosen modelling method used in modern industry, evaluating the probabilities of occurrence and the associated effects recorded.

After the literature review, a Case Study for an underground NG transmission pipeline is considered and after collaboration with experts from the NG and energy industry, the erosion phenomena of the work are quantified. Assessments of the causes of occurrence of the phenomena as well as the impacts are carried out and a Risk Analysis is performed.

Finally, a number of technical and economic issues of particular importance for the cost of managing the corrosion phenomenon are examined, presenting the conclusions of the work and suggestions for further research.

Key Words

Natural Gas Transmission Pipeline, Corrosion, Hydrogen Induced Corrosion, Microbiologically Induced Corrosion, Stress Corrosion Cracking, Fault Analysis Tree, Pipeline Failures, Coating, Failure Repair, Risk Analysis.

Περιεχόμενα

Δήλωση Συγγραφής.....	3
Δήλωση συγγραφέα Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.....	4
Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Λέξεις Κλειδιά.....	6
Abstract.....	7
Key Words.....	7
Περιεχόμενα.....	8
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	12
Κατάλογος Πινάκων.....	13
Κατάλογος Εικόνων.....	14
Συνομογραφίες.....	15
Μονάδες και Μεγέθη.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1 Γνωσιολογικό Πλαίσιο Διπλωματικής Εργασίας.....	17
1.2 Αντικείμενο.....	17
1.3 Σκοπός και Στόχοι.....	18
1.4 Δομή του Περιεχομένου.....	18
1.5 Καινοτομία.....	19
1.6 Μεθοδολογία.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	21
2.1 Αγωγοί Μεταφοράς Φυσικού Αερίου.....	21
2.1.1 Γενική αναφορά.....	21
2.1.2 Τα Συστήματα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου.....	22
2.1.3 Κατασκευή και προδιαγραφές Υπόγειων Αγωγών Μεταφοράς.....	23
2.1.4 Ο ρόλος του εδάφους στο δίκτυο των Αγωγών Μεταφοράς.....	24
2.2 Διάβρωση: Γενική Επισκόπηση.....	25
2.2.1 Γενική επισκόπηση του φαινομένου.....	25
2.2.2 Η ηλεκτροχημεία του φαινομένου της διάβρωσης.....	26
2.2.3 Διάβρωση κάτω από το έδαφος.....	27

2.3	Διάβρωση Αγωγών Φυσικού Αερίου.....	27
2.3.1	Ανάπτυξη του φαινομένου στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς.....	27
2.3.2	Παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη του φαινομένου.....	28
2.3.3	Μέτρα – Πρακτικές αντιμετώπισης του φαινομένου	30
2.4	Η έννοια της Διαχείρισης Κινδύνου στους Αγωγούς Φυσικού Αερίου	32
2.5	Η Διάβρωση ως Παράγοντας Κινδύνου για Αγωγούς Φυσικού Αερίου	33
2.6	Διαχείριση Ασφάλειας Αγωγών Φυσικού Αερίου.....	33
2.7	Ανασκόπηση κεφαλαίου.....	34
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΓΩΓΩΝ.....	35
	ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	35
3.1	Δράση του Υδρογόνου.....	35
3.1.1	Περιγραφή του φαινομένου και γενεσιουργά αίτια.....	35
3.1.2	Επιπτώσεις στους αγωγούς μεταφοράς	36
3.2	Δράση των Μικροοργανισμών.....	39
3.2.1	Περιγραφή του φαινομένου και γενεσιουργά αίτια.....	39
3.2.2	Επιπτώσεις στους αγωγούς μεταφοράς	41
3.3	Συνδυασμένη Δυναμοδιάβρωση	44
3.3.1	Περιγραφή του φαινομένου και γενεσιουργά αίτια.....	44
3.3.2	Επιπτώσεις στους αγωγούς μεταφοράς	47
3.4	Άλλοι τύποι Διάβρωσης	48
3.5	Στοιχεία από τη Διεθνή Εμπειρία.....	51
3.5.1	Στοιχεία από την Ευρώπη.....	51
3.5.2	Στοιχεία από την Αμερική	55
3.6	Τύποι και Κατηγορίες Αστοχιών.....	58
3.7	Τεχνολογίες Επιθεώρησης	63
3.7.1	Στη φάση κατασκευής των σωληνοαγωγών	63
3.7.2	Στη φάση της εγκατάστασης των σωληνοαγωγών.....	65
3.7.3	Στη φάση της Λειτουργίας του Έργου	68
3.8	Πρόληψη	68
3.9	Αποκατάσταση Αστοχιών	68

3.9.1	Αξιολόγηση και μέθοδοι αποκατάστασης	68
3.9.2	Επιλογή μεθόδου επισκευής-αποκατάστασης.....	69
3.10	Καθοδική Προστασία	70
3.10.1	Γενικά - Αρχή Λειτουργίας της Μεθόδου	70
3.10.2	Τεχνική Επιβαλλόμενου Ρεύματος	70
3.10.3	Τεχνική θυσιαζόμενων ανοδίων	71
3.11	Κώδικες και Κανονισμοί	73
3.12	Ερωτήματα Έρευνας	75
3.13	Ανασκόπηση κεφαλαίου.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....		77
4.1	Εισαγωγικό Πλαίσιο: Ακεραιότητα Αγωγών Φυσικού Αερίου.....	77
4.2	Προτεινόμενη Μεθοδολογία Διερεύνησης.....	77
4.3	Ο ρόλος των Εμπειρογνομόνων	79
4.4	Επιλογή απεικονιστικής μεθόδου: Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος.....	80
4.5	Δένδρο Σφάλματος HIC	85
4.6	Δένδρο Σφάλματος MIC	88
4.7	Δένδρο Σφάλματος SCC	91
4.8	Μελέτη Περίπτωσης (Case Study).....	94
4.8.1	Εισαγωγικά – Οριοθέτηση της Μελέτης Περίπτωσης.....	94
4.8.2	Δεδομένα Αγωγού Μελέτης Περίπτωσης.....	94
4.8.3	Υπολογισμός Πιθανοτήτων Εμφάνισης Διάβρωσης.....	95
4.8.4	Αστοχίες της Μελέτης Περίπτωσης	100
4.8.5	Υπολογισμός των επιπτώσεων των αστοχιών.....	103
4.8.6	Αξιολόγηση των κινδύνων των αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης	114
4.9	Ανασκόπηση Κεφαλαίου.....	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....		121
5.1	Σχολιασμός Γενικής Μεθοδολογίας	121
5.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Κινδύνου.....	122
5.3	Τεχνοοικονομικά Ζητήματα	123
5.4	Απαντήσεις στα ερωτήματα της έρευνας.....	123
5.5	Προτάσεις Βελτίωσης της Μεθοδολογίας - Περαιτέρω Έρευνα.....	124

5.6	Συμβολή στη διάχυση Τεχνογνωσίας και στην Εκπαίδευση	125
	ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	127
	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	132
	ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	133

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Κατανομή Συμβάντων ανά αίτια εκδήλωσης των συμβάντων (EGIG, 2020).....	52
Διάγραμμα 3.2: Συχνότητα εμφάνισης αστοχιών σε σχέση με το μέγεθος διαρροής και των αιτιών εκδήλωσης (EGIG, 2020)	53
Διάγραμμα 3.3: Αριθμός συμβάντων ανά αίτια εμφάνισης (EGIG, 2020)	54
Διάγραμμα 3.4: Συχνότητα εμφάνισης αστοχιών σε σχέση με το είδος εξωτερικής προστασίας (EGIG, 2020)	54
Διάγραμμα 3.5: Κατανομή Συμβάντων ανά είδος διάβρωσης (EGIG, 2020)	55
Διάγραμμα 3.6: Συμβάντα ανά αίτια πρόκλησης για την περίοδο 2003-2022 (PHMSA, 2023) ..	57
Διάγραμμα 3.7: Συμβάντα ανά είδος διάβρωσης για την περίοδο 2003-2009 (PHMSA, 2023)...	57
Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα Ροής για τον καθορισμό της μεθοδολογίας.....	77
Διάγραμμα 4.2: Συμβολισμοί Δέντρου Σφάλματος (Kabir, 2017)	83
Διάγραμμα 4.3: Συνδέσεις γεγονότων με πύλες OR και AND.....	84
Διάγραμμα 4.4: Δέντρο Σφάλματος HIC	88
Διάγραμμα 4.5: Δέντρο Σφάλματος MIC.....	90
Διάγραμμα 4.6: Δέντρο Σφάλματος SCC.....	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βασικά πρότυπα για τις προδιαγραφές υλικών.....	24
Πίνακας 3.1: Πρότυπα και Κώδικες στην φάση κατασκευής των αγωγών.....	65
Πίνακας 3.2: Πρότυπα και Κώδικες για τον Υδροστατικό έλεγχο.....	67
Πίνακας 3.3: Διεθνή Πρότυπα ASME.....	73
Πίνακας 3.4: Ευρονόρμες για την μεταφορά του ΦΑ.....	74
Πίνακας 3.5: Πρότυπα της DNV (Det Norske Veritas).....	75
Πίνακας 4.1: Παράμετροι Αγωγού Μελέτης Περίπτωσης	95
Πίνακας 4.2: Πιθανότητες αιτιών διάβρωσης για το Δέντρο HIC.....	97
Πίνακας 4.3: Πιθανότητες αιτιών διάβρωσης για το Δέντρο MIC.....	97
Πίνακας 4.4: Πιθανότητες αιτιών διάβρωσης για το Δέντρο της SCC.....	98
Πίνακας 4.5: Σενάρια Αστοχιών του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης	102
Πίνακας 4.6: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F_1	105
Πίνακας 4.7: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F_2	106
Πίνακας 4.8: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F_3	108
Πίνακας 4.9: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F_1 ΜΕ διακοπή λειτουργίας του αγωγού	109
Πίνακας 4.10: Εκτίμηση χρόνου αποκατάστασης της Αστοχίας F_1 ΜΕ διακοπή λειτουργίας του αγωγού	110
Πίνακας 4.11: Εκτίμηση Κόστους Αντικατάστασης ολόκληρου του αγωγού	113
Πίνακας 4.12: Κατανομή κλίμακας Πιθανοτήτων (P_i).....	115
Πίνακας 4.13: Αστοχίες Μελέτης Περίπτωσης ανά Αίτιο, Πιθανότητα και Κόστος Αποκατάστασης	115
Πίνακας 4.14: Κατανομή κλίμακας Επιπτώσεων Κόστους (S_i)	116
Πίνακας 4.15: Πίνακας Κινδύνου Μελέτης Περίπτωσης.....	117
Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα Ανάλυσης Κινδύνου	119

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση ανταλλαγής ηλεκτρονίων (διάβρωση) (Perez, 2016).....	27
Εικόνα 2.2: Σχηματική Απεικόνιση λειτουργίας των δυο μεθόδων (εξωτερικού ρεύματος και θυσιαζόμενης ανόδου) Καθοδικής Προστασίας (Υφαντής, 2008)	32
Εικόνα 3.1: Δείγματα Ψαθυροποίησης μεταλλικών επιφανειών (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) (Paravinasam, 2014)	37
Εικόνα 3.2: Δείγμα Ψαθυροποίησης σε χαλύβδινο αγωγό (Woodtli, 1999)	37
Εικόνα 3.3: Μορφολογία κηλίδων τύπου “μάτι ψαριού” (Whiteley, 2015).....	38
Εικόνα 3.4: Τυπικές μορφές φλукταινών H ₂ (Avery, 2001)	38
Εικόνα 3.5: Φαινόμενο εργοδιάβρωσης λόγω θεικών ανιόντων (Avery, 2001).....	39
Εικόνα 3.6: Βακτηριακά κύτταρα τύπου SRB (Lahiri, 2017)	42
Εικόνα 3.7: Προϊόντα διάβρωσης από SRB βακτήρια μετά από δυο(a,b) και δεκατέσσερεις(c,d) ημέρες επώασης (Lahiri, 2017).....	43
Εικόνα 3.8: Στελέχη που παράγουν οξύ (APB) σε (a) νηματοειδή και (b) σπειροειδή μορφή (Javaherdashti, 2008).....	43
Εικόνα 3.9: Προϊόντα διάβρωσης από APB βακτήρια σε χαλύβδινο αγωγό (Javaherdashti, 2008)	44
Εικόνα 3.10: Αλλαγή της μορφολογίας και εξάπλωση της ρωγμής διάβρωσης (Ossai, 2014).....	45
Εικόνα 3.11: Τυπικές μορφές (a) Ενδοκοκκικής και (b) Διακοκκικής ρηγμάτωσης ανοξειδωτου χάλυβα (Lahiri, 2017).....	48
Εικόνα 3.12: Τυπική περίπτωση διάβρωσης υπό τάση (Lahiri, 2017).....	48
Εικόνα 3.13: Ενδεικτικές περιπτώσεις απώλειας μετάλλου (Gopal, 2020).....	58
Εικόνα 3.14: Ρωγμή σε αγωγό μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020).....	59
Εικόνα 3.15: Χτύπημα σε αγωγό μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020).....	60
Εικόνα 3.16: Βαθούλωμα σε αγωγό μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020)	60
Εικόνα 3.17: Κατασκευαστική αστοχία στο σώμα αγωγού μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020).....	60
Εικόνα 3.18: Διάβρωση λόγω αστοχίας συγκόλλησης (Mwiks, 2020).....	61
Εικόνα 3.19: Εκτεταμένη διάβρωση λόγω καιρικών φαινομένων (Gopal, 2020)	62
Εικόνα 3.20: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής Επιβαλλόμενου Ρεύματος (https://www.materialsperformance.com/news/2020/08/kbr-awards-cp-specialist-support-contract-to-fims-international).....	72
Εικόνα 3.21: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής Θυσιαζόμενων Ανοδίων (https://pressbooks-dev.oer.hawaii.edu/chemistry/chapter/corrosion/)	73

Συνομογραφίες

A	Ampere (Αμπέρ)
APB	Acid Producing Bacteria (Βακτήρια που παράγουν οξύ)
ASME	American Society for Testing and Materials (Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών)
CNG	Compressed Natural Gas (Συμπιεσμένο Φυσικό αέριο)
CO	Μονοξείδιο του Άνθρακα
CO ₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
DNV	Det Norske Veritas
EGIG	European Gas Pipeline Incident Data Group (Ευρωπαϊκή Ομάδα Δεδομένων Περιστατικών Αγωγών Φυσικού Αερίου)
EN	European Norms (Ευρωπαϊκά Πρότυπα)
FTA	Fault Tree Analysis (Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος)
H ₂	Υδρογόνο
H ₂ S	Υδρόθειο
H ₂ O	Νερό
HIC	Hydrogen Induced Corrosion (Διάβρωση Δράσης Υδρογόνου)
LNG	Liquefied Natural Gas (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο)
MIC	Microbiologically Induced Corrosion (Μικροβιακά Επηρεασμένη Διάβρωση)
NDT	NonDestructive Tests (Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι)
O ₂	Οξυγόνο
PHMSA	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (Υπηρεσία Ασφάλειας Αγωγών)
PWHT	Post Weld Heat Treatment (Θερμική επεξεργασία μετά τη συγκόλληση)
SCC	Stress Corrosion Cracking (Συνδυασμένη Δυναμοδιάβρωση)
SRB	Sulphate Reducing Bacteria (Βακτήρια που μειώνουν τα θειικά άλατα)
SMYS	Specified Minimum Yield Strength (Ελάχιστο Όριο Διαρροής)
V	Volt (Βολτ)
TAP	Trans Adriatic Pipeline (Διαδριατικός Αγωγού Φυσικού Αερίου)
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΣΦΑ	Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου
ΜΠΕ	Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων
ΦΑ	Φυσικό Αέριο

Μονάδες και Μεγέθη

°C	Celsius Degrees (βαθμός Κελσίου)
bar	Metric unit of pressure (1 bar ισοδυναμεί σε 0.986923 atm)
Barg	Unit for the measurement of gauge pressure
bcm	Billion cubic meter (δισεκατομμύρια κυβικό μέτρο)
Kg/m ³	Kilogram per cubic meter (κιλά ανά κυβικό μέτρο)
Lm	Linear meter (τρέχον μέτρο)
In	Inch (1 ίντσα αντιστοιχεί σε 2,54 εκατοστόμετρα)
m	Meter (μέτρο)
cm	Centimeter (εκατοστό)
mm	Millimeter (χιλιοστό)
m ²	Square meter (τετραγωνικό μέτρο)
m ³	Cubic meter (κυβικό μέτρο)
kWh	Kilowatt-hour (Κιλοβατώρα) (1kWh = 10 ³ Wh)
MWh	Megawatt-hour (Μέγα-βατώρα) (1MWh = 10 ⁶ Wh)
GWh	Gigawatt hour (Γιγαβατώρα) (1GWh = 10 ⁹ Wh)
psi	Pound per square inch (1psi = 0.0689475729 bar)
kg/cm ²	Kilogram-force per square centimeter (κιλά πίεσης ανά τετραγωνικό εκατοστό)
pcs	Piece (τεμάχιο)
pH	Indicator for Acidic or Basic (δείκτης Οξύτητας ή Αλκαλικότητας)
Ohm.cm	Ohm centimetres (Μονάδα μέτρησης Ειδικής Αντίστασης Εδάφους)
€	Ευρώ (νόμισμα)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γνωσιολογικό Πλαίσιο Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο γνωσιολογικό πεδίο του φαινομένου της διάβρωσης που εκδηλώνεται στις μηχανολογικές υποδομές των αγωγών και στις συναφείς υποδομές μεταφοράς και αποθήκευσης Φυσικού Αερίου (ΦΑ). Εξετάζεται και αποτυπώνεται η θεωρητική διάσταση της φαινομενολογίας της διάβρωσης, τα αίτια (βασικοί λόγοι) που την προκαλούν και το αιτιατό (συμπτώματα) που εντοπίζονται, στο υλικό των εγκατεστημένων αγωγών μεταφοράς ΦΑ, ως αποτέλεσμα της διαβρωτικής δράσης. Η διάβρωση διερευνάται, βάσει της βιβλιογραφίας ως ηλεκτροχημικό φαινόμενο. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τρεις (3) κύριες κατηγορίες του φαινομένου οι οποίες είναι: (α) η Δράση του Υδρογόνου (H_2) (Hydrogen Induced Corrosion - HIC) που απελευθερώνεται κατά κύριο λόγο στο εσωτερικό των αγωγών, (β) στην δράση των Μικροοργανισμών (Microbiologically Induced Corrosion - MIC) που αναπτύσσονται και επιδρούν στην εξωτερική επιφάνεια των αγωγών και (γ) στην συνδυασμένη μηχανική-ηλεκτροχημική προσβολή των αγωγών που είναι γνωστή ως Συνδυασμένη Δυναμοδιάβρωση (Stress Corrosion Cracking - SCC).

Προτείνεται μια μεθοδολογία απεικόνισης της οντολογίας της διάβρωσης μέσω της Ανάλυσης Δένδρου Σφάλματος (Fault Tree Analysis - FTA). Αξιολογούνται εμπειρικά οι πιθανότητες εκδήλωσης του φαινομένου και των επιπτώσεών τους ανά διακριτό αίτιο, βάσει των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν την ανάλυση κινδύνων των βιομηχανικών συστημάτων. Επίσης, αναφέρονται οι τεχνικές επιθεώρησης, ελέγχου και αποκατάστασης των αστοχιών που προκαλούνται από τη διάβρωση στη λειτουργία των αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Τέλος, παρατίθεται Μελέτη Περίπτωσης στα πλαίσια της οποίας, με την βοήθεια Εμπειρογνομώνων, ποσοτικοποιούνται οι πιθανότητες των αιτιών εμφάνισης των ειδών διάβρωσης της εργασίας, εξετάζονται πιθανές αστοχίες που προκαλούνται και εκπονείται Ανάλυση Κινδύνου με σκοπό την συνδρομή στην λήψη αποφάσεων.

1.2 Αντικείμενο

Περιλαμβάνει επισκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά τη διάβρωση και τη δυναμική της, ανάλυση και κατηγοριοποίηση του φαινομένου σε διάφορα επίπεδα αιτίου/αιτιατού καθώς και των συνθηκών που επιτρέπουν την εκδήλωσή του. Ακολουθεί συλλογή στοιχείων από την εμπειρική έρευνα για τους τύπους των αστοχιών και περιγραφή των μεθόδων και τεχνικών ελέγχου, επιθεώρησης και αποκατάστασης, με ιδιαίτερη αναφορά στο ρόλο της καθοδικής προστασίας που εφαρμόζεται στα συστήματα των αγωγών μεταφοράς. Επίσης αναπτύσσεται η έννοια της διαχείρισης κινδύνου στο πλαίσιο των αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Εξετάζεται η διάβρωση ως παράγοντας κινδύνου και πρόκλησης αστοχιών καθώς και ο τρόπος με τον οποίο η διάβρωση αναδεικνύεται ως σημαντικό αίτιο αστοχιών. Μετά το βιβλιογραφικό μέρος της εργασίας παρατίθεται Μελέτη Περίπτωσης μέσα από την οποία αναπτύσσεται προτεινόμενη μεθοδολογία

διερεύνησης τριών (3) κύριων φαινομένων διάβρωσης του αγωγού και αντίστοιχες αστοχίες προερχόμενες από τα φαινόμενα διάβρωσης. Επίσης με την βοήθεια τριών (3) Εμπειρογνομόνων από το χώρο του ΦΑ, καταγράφονται και υπολογίζονται οι επιπτώσεις των αστοχιών και τέλος διενεργείται ανάλυση διακινδύνευσης.

1.3 Σκοπός και Στόχοι

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αποτύπωση πρότασης μεθοδολογίας ποιοτικής ανάλυσης, απεικόνισης, καταγραφής και χρήσης της γνώσης του φαινομένου της διάβρωσης. Συνδυάζεται με ποσοτικά στοιχεία, όσον αφορά την πιθανολογική ανάλυση του φαινομένου και προτάσεις περαιτέρω έρευνας προς αξιοποίηση της οντολογίας της διάβρωσης για πρακτικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Στόχος είναι η προσέγγιση του ζητήματος σε πιο πρακτικό επίπεδο, εξετάζοντας δράσεις και προτεινόμενο τρόπο λήψης αποφάσεων σε πραγματικές συνθήκες. Με την βοήθεια των Εμπειρογνομόνων το θέμα αναλύεται από την οπτική γωνία του Μελετητή και ταυτόχρονα υπό το πρίσμα μιας πιο πρακτικής προσέγγισης. Στην βιβλιογραφία καταγράφονται πολλοί τρόποι προσέγγισης με την βοήθεια μαθηματικών μοντελοποιήσεων και ανάλυσης πιθανοτήτων, βασιζόμενοι κατά κύριο λόγο σε στατιστικά στοιχεία και θεωρητικές αναφορές. Αποτελεί επίσης αφετηρία σκέψης και προβληματισμού για τον Διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς ΦΑ, προκειμένου να λάβει αποφάσεις με γνώμονα την πρόληψη αστοχιών του αγωγού.

1.4 Δομή του Περιεχομένου

Η οργάνωση και η δομή του κειμένου της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Κεφάλαιο 1: Γίνεται εισαγωγή στο ερευνητικό έργο, περιγράφεται το γνωσιολογικό πλαίσιο, το αντικείμενο, ο σκοπός και η δομή του περιεχομένου της διπλωματικής εργασίας. Επίσης αναφέρονται τα στοιχεία καινοτομίας, η δομή της μεθοδολογίας την οποία θα ακολουθήσει προκυμμένου να εκπληρώσει τους στόχους που έχουν εξ αρχής τεθεί.

Κεφάλαιο 2: Πραγματοποιείται επισκόπηση της βιβλιογραφίας και συλλογή εμπειρικών δεδομένων, όσον αφορά τη γενική φιλοσοφία και κατανόηση της διάβρωσης, ως φαινόμενο και ως παράγοντας κινδύνου για την λειτουργία και ασφάλεια των μεταλλικών αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Επίσης, γίνεται γενική αναφορά στην έννοια του κινδύνου και της ασφάλειας ειδικά για την περίπτωση της διάβρωσης που αναπτύσσεται στους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ.

Κεφάλαιο 3: Γίνεται περιγραφή και ανάλυση των τριών (3) βασικών τύπων διάβρωσης που συναντώνται ως συνηθέστερες σε περιπτώσεις αστοχιών αγωγών ΦΑ, δηλαδή, της HIC, της MIC και της SCC. Ακολουθεί συνοπτική αναφορά σε άλλους τύπους διάβρωσης ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν, με τη μορφή εμφάνισης και τους μηχανικούς παράγοντες που επιδρούν αρνητικά. Παρατίθενται επίσης στοιχεία από την διεθνή βιβλιογραφία για το φαινόμενο της

διάβρωσης και γενικότερα των αστοχιών στους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ. Γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες επιθεώρησης και σε μεθόδους πρόληψης με έμφαση στην καθοδική προστασία. Επίσης καταγράφεται το κανονιστικό πλαίσιο που αφορά τον σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς ΦΑ, την εγκατάσταση του έργου, τις προληπτικές ενέργειες, τις συντηρήσεις και τις διορθωτικές ενέργειες σε περιπτώσεις παρόμοιων έργων στη βιομηχανία της ενέργειας. Τέλος παρατίθεται σειρά ερωτημάτων έρευνας που αποσκοπούν στην ανάγκη ανάπτυξης μεθοδολογίας, ολοκληρωμένης θεώρησης και αποτύπωσης του φαινομένου, χρήσιμη για τους μελετητές, αλλά για τους διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς αγωγών ΦΑ.

Κεφάλαιο 4: Περιγράφεται το πλαίσιο και το διάγραμμα ροής της γενικής μεθοδολογίας με τα βήματα έρευνας, με την FTA να χρησιμοποιείται ευρέως, ως τεχνική, στη σύγχρονη βιομηχανία για την μελέτη αξιοπιστίας βιομηχανικών συστημάτων και υποδομών. Επιχειρείται αποσύνθεση των τριών (3) τύπων διάβρωσης και ανασύνθεσή τους σε FTA οντολογία, αξιολόγηση των πιθανοτήτων εκδήλωσης και των σχετικών επιπτώσεων με τη βοήθεια ομάδας Εμπειρογνομόνων. Τέλος, αναπτύσσεται Μελέτη Περίπτωσης με ανάδειξη δυνητικών κινδύνων σε υποθετικά σενάρια τριών (3) αστοχιών αγωγού μεταφοράς ΦΑ με γενεσιουργά αίτια τους τρεις (3) τύπου διάβρωσης που πραγματεύεται η εργασία. Σχολιάζεται η γενική μεθοδολογία, όσον αφορά την εκπόνηση της FTA οντολογίας και τα αποτελέσματα της ανάλυσης κινδύνου, η συμβολή των Εμπειρογνομόνων και ορισμένα τεχνικοοικονομικά θέματα με ιδιαίτερη σημασία για το κόστος διαχείρισης της διάβρωσης σε έναν οργανισμό παροχής ΦΑ.

Κεφάλαιο 5: Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνας, σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά και σε επίπεδο συμβολής στην ανάπτυξη και διάχυσης της τεχνογνωσίας, χρήσιμης για τη βιομηχανία του ΦΑ αλλά και για την εκπαίδευση στην Ελλάδα πάνω στο ευρύτατο γνωστικό πεδίο του φαινομένου της διάβρωσης.

1.5 Καινοτομία

Η συμβολή της εργασίας σε νέα γνώση έγκειται κυρίως στον τρόπο διαχείρισης του θέματος. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα να διερευνηθεί το μείζον και πολύπτυχο θέμα της διάβρωσης υπόγειων αγωγών μεταφοράς ΦΑ και τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης των επιπτώσεων από τη διάβρωση για τον διαχειριστή του συστήματος. Η διερεύνηση αυτή συνδυάζει την ανάλυση του φαινομένου της διάβρωσης, το ποιοτικό και ποσοτικό του μαθηματικό ισοδύναμο και τέλος την τεκμηρίωσή του μέσα από Μελέτη Περίπτωσης.

1.6 Μεθοδολογία

Γίνεται διερεύνηση σε ένα αντικείμενο με εκτεταμένες επιπτώσεις στα μηχανολογικά συστήματα μεταφοράς ΦΑ είτε είναι υπέργεια είτε υπόγεια. Γίνεται εκτενείς έρευνα στην υφιστάμενη βιβλιογραφία και προτείνεται πιο πρακτική προσέγγιση λιγότερο θεωρητική και περισσότερο διαχειριστική (managerial). Δηλαδή η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει τη φιλοσοφία της

συμβουλευτικής διαχείρισης(consulting management) προτείνοντας στον διαχειριστή λύσεις και διεξόδους σε περιπτώσεις παρόμοιες με αυτή της Μελέτης Περίπτωσης. Θεμελιώνονται προβληματισμοί για τις αποφάσεις που καλούνται να λάβουν οι αρμόδιοι στα πλαίσια της Ανάλυσης Κινδύνων με ζητούμενα την ασφάλεια και ορθή λειτουργία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Αγωγοί Μεταφοράς Φυσικού Αερίου

2.1.1 Γενική αναφορά

Το ΦΑ έχει πλέον αναδειχθεί σε ένα από τα πιο σημαντικά ενεργειακά καύσιμα του εικοστού πρώτου (21^{ου}) αιώνα με συνεχή αυξανόμενη ζήτηση. Η μεταφορά του μέχρι και σήμερα αποτελεί ζήτημα θεμελιώδους σημασίας και κρισιμότητας σε γεωστρατηγικό, τεχνολογικό και οικονομικό επίπεδο. Οι βασικοί τρόποι μεταφοράς που καταγράφονται είναι:

Με Αγωγούς Μεταφοράς (Transmission Pipelines): Με την κατασκευή συστήματος μεταφοράς μεταφέρεται διακρατικά και αποτελεί τον δημοφιλέστερο τρόπο μεταφοράς.

- Σε Υγροποιημένη μορφή (Liquefied Natural Gas - LNG): Το ΦΑ αφού πρώτα υγροποιηθεί σε θερμοκρασίες της τάξεως των -160°C μεταφέρεται με ειδικά διαμορφωμένα δεξαμενόπλοια και
- Σε Συμπιεσμένη μορφή (Compressed Natural Gas - CNG): Το ΦΑ αφού πρώτα συμπιεστεί σε πίεση μεταξύ 2.900 psi και 3.600 psi μεταφέρεται με ειδικά διαμορφωμένα βυτιοφόρα οχήματα.

Η μεταφορά πραγματοποιείται με την εγκατάσταση ολοκληρωμένων συστημάτων μεταφοράς, η οποία είναι δημοφιλέστερη και πιο εφικτή επιλογή. Οι αγωγοί μεταφοράς ανάλογα με το περιβάλλον που εγκαθίστανται διακρίνονται σε Επίγειους (Υπέργειους ή Υπόγειους) και Υποθαλάσσιους.

Επίγειοι (Υπέργειοι ή Υπόγειοι) αγωγοί: Είναι αγωγοί υψηλής πίεσης, διατρέχουν αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων και κατά κύριο λόγο κατασκευάζονται από ατσάλι εξαιρετικά υψηλής ανθεκτικότητας. Επίσης οι αγωγοί αυτοί συχνά είναι διακρατικοί ενώ λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο πολλών παραμέτρων εγκαθίστανται υπόγεια ή υπέργεια.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της υπόγειας εγκατάστασης των αγωγών μεταφοράς είναι η δυνατότητα χρήσης του υπεδάφους για τη στήριξη των σωληνώσεων καθώς και η φυσική προστασία που παρέχει το ίδιο το έδαφος. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η ανάγκη τεχνικά πολύπλοκων και δαπανηρών υπέργειων κατασκευών στήριξης. Επιπλέον, οι υπόγειοι αγωγοί προστατεύονται φυσικά από την έκθεση σε δυνητικά επιβλαβείς περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως οι έντονες καιρικές συνθήκες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και από ανθρωπογενείς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων και των δολιοφθορών, ατυχημάτων κ.α.

Υποθαλάσσιοι αγωγοί: Εγκαθίστανται συνήθως σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα χερσαίας διασύνδεσης. Ο σχεδιασμός αυτών των αγωγών διαφέρει κυρίως ως προς τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του περιβάλλοντος και της διαδικασίας εγκατάστασης. Υπόκεινται σε υψηλές τάσεις κάμψης, πιθανά μεγάλες δυνάμεις σύνθλιψης, ιδίως όταν εγκαθίστανται σε μεγάλα βάθη.

Σε κάθε περίπτωση η απόφαση για τον τρόπο μεταφοράς του ΦΑ λαμβάνεται κατόπιν εξειδικευμένων τεχνικών μελετών, διακρατικών συμφωνιών και είναι αποτέλεσμα στρατηγικού σχεδιασμού. (Harsimran, 2021; Γενεθλίου, 2021).

2.1.2 Τα Συστήματα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου

Οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς, στους οποίους η παρούσα εργασία εμβαθύνει, αποτελεί τμήμα ενός ολοκληρωμένου συστήματος το οποίο με ένα σύνολο υποδομών και εξοπλισμού έρχονται και συμπληρώνουν το σύστημα μεταφοράς. Ακολουθώς παρατίθενται τα βασικότερα μέρη του Συστήματος Μεταφοράς ΦΑ, εκτός των αγωγών μεταφοράς για τους οποίους προηγήθηκε σχετική αναφορά στην Παράγραφο 2.1.1. Πιο συγκεκριμένα ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει:

Σταθμούς Συμπίεσης (Compressor Stations): Εξασφαλίζουν την απαιτούμενη πίεση του ΦΑ μειώνοντας ταυτόχρονα τον όγκο του, σύμφωνα με τον προβλεπόμενο σχεδιασμό, εξασφαλίζοντας την επιθυμητή ροή του αερίου στο δίκτυο. Τοποθετούνται κατά μήκος του αγωγού, ενώ στην περίπτωση υποθαλάσσιων αγωγών οι σταθμοί συμπίεσης κατασκευάζονται σε πλωτές εξέδρες. Οι κινητήρες των συμπιεστών είναι είτε ΦΑ είτε ηλεκτρικοί, με τα απαραίτητα συστήματα αυτοματισμού. Ο ρόλος του κρίνεται καθοριστικός και απαραίτητος για το Σύστημα Μεταφοράς ΦΑ.

Μετρητικοί Σταθμοί (Metering Stations): Κατά μήκος των αγωγών τοποθετούνται περιοδικά σταθμοί μέτρησης, για την μέτρηση των ποσοτήτων του ΦΑ κατά μήκος του αγωγού και επιτρέπουν στον διαχειριστή του συστήματος να παρακολουθεί, να ελέγχει και να μετρά τις ποσότητες του ΦΑ. Η ροής του αερίου, η πίεση εσωτερικά του αγωγού και μια σειρά άλλων παραμέτρων είναι αποτέλεσμα τους λεπτομερούς σχεδιασμού του συστήματος. Ο βασικός σκοπός ενός σταθμού ρύθμισης/μέτρησης είναι να πραγματοποιεί ακριβείς μετρήσεις της ροής του αερίου και παράλληλα να ρυθμίζει την πίεση του σύμφωνα με τις απαιτήσεις του δικτύου.

Βαλβιδοστάσια (Line Valve Stations): Κατά μήκος των αγωγών τοποθετείται περιοδικά μεγάλος αριθμός βαλβίδων ελέγχου της ροής του αερίου. Υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει η ροή σε συγκεκριμένα τμήματα του αγωγού να ρυθμιστεί ή και να διακοπεί εντελώς για λόγους συντήρησης ή αντικατάστασης τμήματος του αγωγού σε περιπτώσεις μεγάλης αστοχίας, ατυχήματος κ.α.

Σταθμοί Ξεστροπαγίδων (Scraper Stations): Οι ξεστροπαγίδες είναι ανεξάρτητες διατάξεις οι οποίες τοποθετούνται εσωτερικά στους αγωγών μεταφοράς και λειτουργούν ως ζεύγος αποστολής/παραλαβής (launcher/receiver). Εκτελούν εργασίες καθαρισμού, αποφράξεων που μπορεί να απαιτηθούν και επιθεωρήσεων (in-line inspection) εσωτερικά του αγωγού. Ο καθαρισμός αποσκοπεί στην αφαίρεση ξένων σωμάτων όπως το νερό (H₂O) και η σκόνη και πραγματοποιείται με ειδικά καθαριστικά ξέστρα.

Η συχνότητα των επιθεωρήσεων αυτών καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά παραμέτρων όπως η παλαιότητα του αγωγού, το ιστορικό βλαβών και αστοχιών κ.α. Οι επιθεωρήσεις αυτές πραγματοποιούνται με την συγκέντρωση πληροφοριών από το εσωτερικό του αγωγού, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, στοιχεία διάβρωσης, έλεγχος συγκολλήσεων κ.α. Η συλλογή των πληροφοριών αυτών γίνεται συνήθως με τη βοήθεια υπερήχων ή μαγνητικής απεικόνισης.

Με την επιθεώρηση κυρίως επιτυγχάνεται:

- Η μέτρηση του πάχους του αγωγού για τυχόν απώλεια μετάλλου, φαινόμενα διάβρωσης και παραμορφώσεις
- Ο εντοπισμός τυχόν τραυματισμών της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού
- Ο έλεγχος για φυσική μετακίνηση του αγωγού λόγω σεισμού ή κατολίσθησης

Τέλος οι παραπάνω διατάξεις κινούνται συνήθως με την βοήθεια της υφιστάμενης ροής του αερίου εσωτερικά του αγωγού μεταξύ των σταθμών ξέστρων, χωρίς να απαιτείται η διακοπή λειτουργίας του αγωγού.

Συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης: Είναι συστήματα συλλογής μετρήσεων και δεδομένων κατά μήκος του αγωγού μεταφοράς, τα οποία διαβιβάζονται στο κεντρικό σταθμό ελέγχου του συστήματος. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν στοιχεία για την παροχή εντός του αγωγού, τη λειτουργική κατάσταση, την πίεση και τη θερμοκρασία. Τα δεδομένα αυτά, με τη βοήθεια κατάλληλων συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου (π.χ. SCADA) και τηλεμετρίας μεταφέρονται σε κεντρικό σταθμό ελέγχου (Control Room). Τέλος μετά την επεξεργασία των δεδομένων και εφόσον εντοπιστεί πρόβλημα στην εγκατάσταση, δρομολογούνται οι κατάλληλες ενέργειες αποκατάστασης, ώστε να διασφαλίζονται οι επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας (Harsimran, 2021; Γενεθλίου, 2021).

2.1.3 Κατασκευή και προδιαγραφές Υπόγειων Αγωγών Μεταφοράς

Μέταλλο κατασκευής: Οι περισσότεροι αγωγοί μεταφοράς πλέον κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, ενώ αναλαμβάνουν την κατασκευή τους εξειδικευμένες εταιρείες χαλυβουργίας. Οι αγωγοί μεταφοράς, είναι συνήθως μήκους 12 m και συγκολλητοί, ενώ η πίεση σχεδιασμού ποικίλλει (από 4 barg έως και 120 barg) ανάλογα με το αν ο αγωγός προορίζεται για το σύστημα της υψηλής, της μέσης ή της χαμηλής πίεσης. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, πραγματοποιούνται αυστηροί έλεγχοι και δοκιμές για την διασφάλιση της εναρμόνισης με τις προδιαγραφές σχεδιασμού και τις απαιτήσεις των προτύπων. Ενδεικτικά καταγράφονται οι βασικοί τύποι μη καταστροφικών ελέγχων (Non Destructive Tests-NDT) που εφαρμόζονται όπως:

- Ο Οπτικός Έλεγχος
- Οι Μετρήσεις Υπερήχων
- Τα Μαγνητικά Σωματίδια

– Η Επιθεώρηση με δινορρεύματα, κυρίως σε περιπτώσεις περισσότερο όξινου περιβάλλοντος κ.α. Προκειμένου τα κράματα να περάσουν την ελεγχόμενη διαδικασία έλασης, λαμβάνονται υπόψη μεταβλητές όπως οι εδαφικές και γεωγραφικές συνθήκες που πρόκειται να εγκατασταθούν, οι θερμοκρασίες, η χημική σύσταση και ο αριθμός των περασμάτων (επαναλήψεων) έλασης του κράματος μετάλλου με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

Μόνωση αγωγών: Στους αγωγούς εφαρμόζονται προστατευτικές επιστρώσεις μόνωσης με ειδικά υλικά, σε εξειδικευμένα εργοστάσια, με βασικό στόχο την προστασία από το φαινόμενο της διάβρωσης. Στο παρελθόν, γινόταν χρήση σμάλτου λιθανθρακόπισσας. Πλέον, προστατεύονται με εποξειδική μόνωση ή πολυαιθυλένιο. Για την εφαρμογή της εποξειδικής επικάλυψης, η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα αρχικά καθαρίζεται πλήρως με αμμοβολή, θερμαίνεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και εφαρμόζεται σ’ αυτόν εποξειδική επίστρωση. Το εργοστάσιο ελέγχει τον μονωμένο πλέον αγωγό με αυστηρά κριτήρια προκυμμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της επένδυσης πριν την παράδοσή του.

Πρότυπα – Σχεδιασμός: Ο σχεδιασμός ο οποίος προηγείται της κατασκευής, έχει να κάνει με τον προσδιορισμό όλων των απαραίτητων χαρακτηριστικών που πρέπει τελικά να διαθέτει ο αγωγός. Η επιλογή των προδιαγραφών αποτελεί βασικό κεφάλαιο του σχεδιασμού, μερικές από τις βασικές παραμέτρους του οποίου είναι:

- Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του αερίου
- Η πίεση σχεδιασμού
- Η θερμοκρασία σχεδιασμού
- Οι επιμέρους συντελεστές σχεδιασμού και
- Η ανοχή στη διάβρωση

Μερικά από τα βασικά πρότυπα τα οποία ορίζουν προδιαγραφές υλικών και τεχνικές επεξεργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί.

Κωδικός	Ονομασία
API-5L	Specification for Line Pipe
ISO-3183	Steel Pipe for Pipeline Transportation Systems, International Standardization Organization
DNV-ST-F101	Submarine pipeline systems

Πίνακας 2.1: Βασικά πρότυπα για τις προδιαγραφές υλικών

Αναλυτική αναφορά των παραπάνω βασικών προτύπων θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας (Harsimran, 2021; Γενεθλίου, 2021).

2.1.4 Ο ρόλος του εδάφους στο δίκτυο των Αγωγών Μεταφοράς

Η απόδοση και η μακροζωία των υπόγειων αγωγών μεταφοράς, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο η δομή των αγωγών αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του εδάφους. Συνεπώς,

η γεωχημεία και η εδαφολογία διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στο σχεδιασμό, στην κατασκευή, στην εγκατάσταση και στη ασφαλή λειτουργία των αγωγών. Λαμβάνονται υπόψη πολυάριθμοι παράγοντες που σχετίζονται με την ποιότητα του υπεδάφους, συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων εγκατάστασης, των ιδιοτήτων του εδάφους, των γεωπεριβαλλοντικών συνθηκών καθώς και των γεωτεχνικών κινδύνων που αναπτύσσονται και επηρεάζουν την ακεραιότητα των εγκατεστημένων αγωγών. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και του αγωγού είναι πολύπλοκη, απαιτώντας συχνά από τους μηχανικούς να χρησιμοποιούν εξελιγμένα εργαλεία μελέτης για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς στη φάση της λειτουργίας του αγωγού.

Επίσης οι ιδιότητες και οι συνθήκες του εδάφους, δηλαδή η επαρκής γνώση των υφιστάμενων εδαφικών ιδιοτήτων είναι ένα από τα κρίσιμα στοιχεία για την διασφάλιση σωστού σχεδιασμού, κατασκευής και της εγκατάστασης του δικτύου των αγωγών. Οι γεωτεχνικές έρευνες βοηθούν τους μηχανικούς να προσδιορίσουν τις γεωλογικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους, καθώς και τις συνθήκες των υπόγειων υδάτων στην υπό εξέταση τοποθεσία.

Η έκταση των απαιτούμενων ερευνών και δοκιμών εξαρτάται από τη γνώση των γεωλογικών συνθηκών και τη μέθοδο εγκατάστασης του αγωγού. Οι εδαφολογικές έρευνες θα προσδιορίσουν τις πληροφορίες με την βοήθεια των οποίων οι γεωτεχνικοί και πολιτικοί μηχανικοί μπορούν να ολοκληρώσουν τις μελέτες λεπτομερούς σχεδιασμού. Εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας μελέτης είναι τα φορτία στα οποία υπόκειται ο αγωγός. Ορισμένα από αυτά είναι μόνιμα και στατικά και άλλα έκτακτα. Προέρχονται από εξωτερικές πηγές και μπορεί συχνά να είναι έντονα με συνέπεια την εμφάνιση κινδύνων αστοχιών όπως ζημιές από σεισμική δραστηριότητα, αστοχίες πρανών, εδαφικές μετακινήσεις από ασυνέχειες και ρήγματα και άλλα.

Συμπερασματικά, για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική λειτουργία των υπόγειων συστημάτων μεταφοράς, πρέπει να ληφθούν υπόψη σειρά παράγοντες όπως οι μέθοδοι εγκατάστασης, οι ιδιότητες του εδάφους, τα εξωτερικά φορτία και οι γεωτεχνικοί παράμετροι. Συνεπώς, απαιτείται πρόληψη της αστοχίας και μετριασμός των δυσμενών αποτελεσμάτων σε πιθανή περίπτωση αστοχίας (Harsimran, 2021; Γενεθλίου, 2021).

2.2 Διάβρωση: Γενική Επισκόπηση

2.2.1 Γενική επισκόπηση του φαινομένου

Το φαινόμενο της διάβρωσης αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους που καλείται να αντιμετωπίσει η βιομηχανία του ΦΑ. Συγκαταλέγεται στα ηλεκτροχημικά φαινόμενα και επηρεάζει την κρυσταλλική δομή των μετάλλων, με αποτέλεσμα τη φθορά των μεταλλικών επιφανειών (απώλεια μετάλλων), την εξασθένηση της δομής και την πρόωρη γήρανση των μεταλλικών συστατικών. Η διάβρωση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία διαφόρων βιομηχανικών εξοπλισμών και υλικών, συμπεριλαμβανομένων δοχείων πίεσης, σωληνώσεων, δεξαμενών

πετρελαίου, αγωγών μεταφοράς ΦΑ και γενικότερα μεταλλικών κατασκευών που εκτίθενται στο φυσικό περιβάλλον.

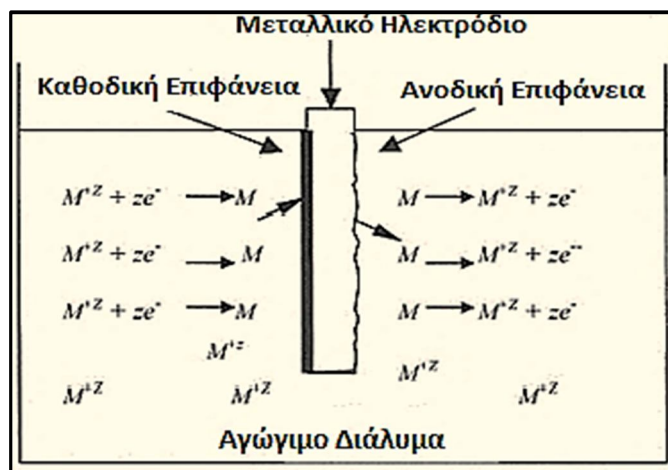
Δεδομένου ότι τα εν λόγω συστήματα λειτουργούν με σκοπό την μεταφορά πετρελαίου και ΦΑ σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, μεγάλης οικονομικής κλίμακας, είναι ζωτικής σημασίας η αποτελεσματική αντιμετώπιση των παραπάνω προβληματισμών. Στα πλαίσια του ασφαλούς σχεδιασμού οι ανησυχίες για το φαινόμενο της διάβρωσης, πρέπει να προλαμβάνονται και να αντιμετωπίζονται έγκαιρα.

Με βάση τα γενεσιουργά αίτια το φαινόμενο της διάβρωσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε:

- [1]. Χημική: Στην περίπτωση της χημικής διάβρωσης το μέταλλο χάνει ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα την οξείδωσή του και την δημιουργία οξειδίων στην επιφάνειά του.
- [2]. Ηλεκτροχημική: Στην ηλεκτροχημική διάβρωση, το μέταλλο έρχεται σε επαφή με ρευστά τα οποία διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο βασικοί τύποι, ο μηχανισμός διάβρωσης με απορρόφηση οξυγόνου(O_2) και ο μηχανισμός διάβρωσης με παραγωγή H_2 . Στην περίπτωση του H_2 , όταν αυτό παράγεται, προκαλεί την χαλάρωση των δεσμών των γειτονικών κόκκων, προκαλώντας ψαθυρότητα και μείωση της αντοχής του υλικού.
- [3]. Βιολογική: Στην περίπτωση των βιολογικών διαβρώσεων εμφανίζεται συγκέντρωση μικροοργανισμών οι οποίοι υπό συνθήκες, δημιουργούν διαβρωτικό περιβάλλον.
- [4]. Μηχανική διάβρωση: Στην περίπτωση αυτή ο σημαντικότερος παράγοντας είναι οι εξωτερικές μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του αγωγού.
- [5]. Συνδυασμός των παραπάνω αιτιών.

2.2.2 Η ηλεκτροχημεία του φαινομένου της διάβρωσης

Κατά την διάρκεια του φαινομένου, γίνεται ανταλλαγή ηλεκτρονίων με κατεύθυνση από την άνοδο προς την κάθοδο εντός υφιστάμενου αγωγίμου διαλύματος. Απελευθερώνονται ελεύθερα ηλεκτρόνια στην άνοδο του μετάλλου(δηλαδή φαινόμενο οξείδωσης) και παράλληλα τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια οδηγούνται στην άνοδο του μετάλλου(δηλαδή φαινόμενο αναγωγής). Το μέταλλο στην άνοδο υφίσταται απελευθέρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων (οξείδωση) ενώ το καθοδικό μέταλλο δέχεται τα ηλεκτρόνια αυτά (αναγωγή). Το μέταλλο με το μεγαλύτερο δυναμικό λειτουργεί ως άνοδος, ενώ το άλλο με το χαμηλότερο δυναμικό λειτουργεί ως κάθοδος. Η παραπάνω μετακίνηση κίνηση των ηλεκτρονίων αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 2.1, στο τέλος της παραγράφου. Η σκούρα παχιά γραμμή αριστερά αναπαριστά την καθοδική επιφάνεια όπου πραγματοποιείται η εναπόθεση των ηλεκτρονίων, αποτέλεσμα της οξείδωσης. Η δεξιά πλευρά αναπαριστά την ανοδική επιφάνεια από πραγματοποιείται η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων (Κορτίνας, 2018; Perez, 2004).



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση ανταλλαγής ηλεκτρονίων (διάβρωση) (Perez, 2016)

2.2.3 Διάβρωση κάτω από το έδαφος

Στο έδαφος το οποίο αποτελείται κατά βάση από οργανική ύλη, ορυκτά, H_2O και διάφορα αέρια, λαμβάνουν χώρα πληθώρα χημικών και φυσικών διεργασιών, οι οποίες εμπλέκονται άμεσα στο πολύπλοκο φαινόμενο της διάβρωσης. Οι διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους ενισχύουν την πολυπλοκότητα του φαινομένου, με σημαντική επίπτωση στην ταχύτητα ανάπτυξης και εξάπλωσης του φαινομένου. Η διάβρωση των υπόγειων αγωγών μεταφοράς σε σχέση με το περιβάλλον εγκατάστασης και το έδαφος που εγκαθίστανται εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις παρακάτω παραμέτρους:

- [1]. Τη φύση του εδάφους
- [2]. Τα υπόγεια υδάτινα ρεύματα/υγρασία
- [3]. Τα εξωτερικά ηλεκτρικά πεδία
- [4]. Την αποτελεσματικότητα του συστήματος καθοδικής προστασίας του αγωγού

Στην Παράγραφο 3.4 στο επόμενο κεφάλαιο, ακολουθεί εκτενέστερη αναφορά για τα είδη διάβρωσης που καταγράφονται (Κορτίνας, 2018).

2.3 Διάβρωση Αγωγών Φυσικού Αερίου

2.3.1 Ανάπτυξη του φαινομένου στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς

Σε συνέχεια των παραπάνω αναφορών, οι υπόγειοι αγωγοί μεταφοράς ΦΑ απειλούνται από την εμφάνιση διάβρωσης, εσωτερική είτε εξωτερική, η οποία αποτελεί διαχρονικά μια από τις σημαντικότερες απειλές για τους αγωγούς. Ποιο συγκεκριμένα για τις δυο (2) αυτές μεγάλες κατηγορίες:

Εσωτερική διάβρωση: Η διάβρωση στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού ΦΑ μπορεί να εμφανιστεί παρουσία νερού και ρύπων οι οποίοι προέρχονται από το ίδιο το αέριο, όπως H_2S , CO_2 ή χλωριούχα άλατα. Το είδος και η έκταση των καταστροφικών επιπτώσεων από την διάβρωση είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των διαφόρων διαβρωτικών συστατικών εσωτερικά καθώς και των συνθηκών

λειτουργίας του αγωγού. Για παράδειγμα, η ταχύτητα του ΦΑ και η θερμοκρασία εντός του αγωγού, παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της έκτασης και του βαθμού διάβρωσης. Με άλλα λόγια, συγκεκριμένη σύνθεση αερίου υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας του αγωγού μπορεί να προκαλέσει διάβρωση. Εάν οι συνθήκες μεταβληθούν ενδέχεται να αποφευχθεί ή να είναι διαφορετικής έντασης και έκτασης.

Εξωτερική διάβρωση: Η εξωτερική διάβρωση των αγωγών οφείλεται σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον με βασικούς παράγοντες την σύσταση του εδάφους (αμμώδες, υφάλμυρα νερά, κοίτες ποταμών κλπ.), τις ιδιαίτερες φυσικο-χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και τις εξωτερικές επιδράσεις μηχανικής φύσεως (εξωτερικές επιβαλλόμενες τάσεις, σεισμοί κλπ.). Το διαβρωτικό περιβάλλον των εδαφών οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υγρασία, στην ηλεκτροχημική συμπεριφορά των υπεδάφινων χημικών ενώσεων (π.χ. χλωριόντα¹ και άλλα ελεύθερα ιόντα), του O₂ και άλλων παραγόντων. Αποτελεί επίσης μείζον πρόβλημα, λόγω της διαβρωτικής φύσης του εδάφους και της μεγάλης ποικιλομορφίας στα επιμέρους είδη εξωτερικής διάβρωσης που αναπτύσσονται. Ακόμα και με τις πιο σύγχρονες μεθόδους και τεχνικές κατασκευής των αγωγών, εφαρμογή προστατευτικών επιστρώσεων και ανάπτυξη μεθόδων πρόληψης, το φαινόμενο της διάβρωσης (εξωτερική και εσωτερική) στους αγωγούς μεταφοράς συνεχίζει να απασχολεί έντονα την βιομηχανία του ΦΑ.

2.3.2 Παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη του φαινομένου

Η μακροχρόνια έρευνα και η εμπειρία καταδεικνύει άμεσο συσχετισμό μεταξύ της χημικής σύστασης του εδάφους και του βαθμού διαβρωτικότητας που παρουσιάζει. Έχουν καταγραφεί σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τους ρυθμούς διάβρωσης στο έδαφος, όπως το H₂O, ο βαθμός αερισμού (Degree of Aeration), ο δείκτης οξύτητας ή αλκαλικότητας (pH), το δυναμικό οξειδοαναγωγής (redox potential), η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Soil Resistivity), τα θειικά άλατα (Sulfates) και οι μικροβιακοί παράγοντες (Microbiological factors). Ποιο συγκεκριμένα:

- Το H₂O σε υγρή μορφή αποτελεί τον βασικό ηλεκτρολύτη που απαιτείται για τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις διάβρωσης. Γίνεται διάκριση μεταξύ κορεσμένου και ακόρεστου, ενώ η στάθμη των υπόγειων υδάτων παίζει καθοριστικό ρόλο.
- Ο βαθμός αερισμού είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας, με την συγκέντρωση του O₂ να μειώνεται με την αύξηση του βάθους στο υπέδαφος. Σε ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη, η συγκέντρωση O₂ έχει προφανώς σημαντική επίδραση στον ρυθμό διάβρωσης ως αποτέλεσμα της συμμετοχής του στην καθοδική αντίδραση. Ωστόσο, με την παρουσία ορισμένων μικροβίων

¹ Τα **χλωριόντα** είναι από τα κύρια συστατικά (ανιόντα) του νερού, προσδίδουν σε αυτό τη γνωστή αλμυρή γεύση, ανάλογα και με τη συγκέντρωση των υπολοίπων αλάτων και κυρίως του νατρίου (Wikipedia).

(όπως τα βακτήρια που μειώνουν τα θειικά άλατα), ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να είναι πολύ υψηλός, ακόμη και υπό αναερόβιες συνθήκες. Είναι επίσης γενικά αποδεκτό ότι οι ρυθμοί διάβρωσης σε διαταραγμένο έδαφος, με μεγαλύτερη διαθεσιμότητα O_2 , είναι σημαντικά υψηλότεροι από ό,τι σε αδιατάρακτο.

- Ο δείκτης οξύτητας ή αλκαλικότητας (pH) των εδαφών παρουσιάζουν εύρος από 5 έως 8 μονάδες. Σε αυτό το εύρος, το pH γενικά δεν θεωρείται καθοριστικός παράγοντας του ρυθμού διάβρωσης. Τα πιο όξινα εδάφη προκαλούν, προφανώς σοβαρότερη απειλή για το μέταλλο. Η οξύτητα του εδάφους προέρχεται από την έκπλυση ορυκτών, την αποσύνθεση όξινων φυτών (π.χ. βελόνες κωνοφόρων δέντρων), τα βιομηχανικά απόβλητα, την όξινη βροχή και ορισμένες μορφές μικροβιακής δραστηριότητας.
- Ειδική ηλεκτρική αντίσταση εδάφους (Soil resistivity): Δεδομένου ότι η ροή ιόντων συνδέεται άμεσα με τις αντιδράσεις διάβρωσης στο υπέδαφος, η υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους επιβραδύνει τις αντιδράσεις διάβρωσης. Η ειδική αντίσταση του εδάφους γενικά μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε H_2O , ενώ σε κάθε περίπτωση δεν αποτελεί μοναδική παράμετρο επηρεασμού της διάβρωσης. Επίσης η παρουσία υψηλής ειδικής αντίστασης από μόνη της, δεν εγγυάται την απουσία σοβαρής διάβρωσης. Σε κάθε περίπτωση, οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης κατά μήκος ενός αγωγού είναι εξαιρετικά ανεπιθύμητες, καθώς αυτό οδηγεί, κατά κανόνα, στο σχηματισμό μακρο-διαβρωτικών κυψελών.
- Δυναμικό οξειδοαναγωγής (Redox Potential): Το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι ουσιαστικά ένα μέτρο του βαθμού αερισμού στο έδαφος. Υψηλό δυναμικό υποδηλώνει υψηλό επίπεδο O_2 ενώ οι χαμηλές τιμές μπορεί να αποτελούν ένδειξη ότι οι συνθήκες ευνοούν την αναερόβια μικροβιακή δραστηριότητα.
- Χλωρίδια (Chlorides): Τα ιόντα χλωρίου είναι γενικά επιβλαβή, καθώς συμμετέχουν άμεσα στις αντιδράσεις ανοδικής διάλυσης των μετάλλων. Επιπλέον, η παρουσία τους μειώνουν την ειδική αντίσταση του εδάφους. Συναντώνται στα εδάφη ως αποτέλεσμα των υφάλμυρων υπόγειων υδάτων ή προέρχονται από εξωτερικές εγχύσεις ανάλογων διαλυμάτων.
- Θειικά άλατα (Sulfates): Σε σύγκριση με τη διαβρωτική επίδραση των ιόντων χλωρίου, τα θειικά άλατα θεωρούνται γενικά πιο καλοήθη ως προς τη διαβρωτική τους δράση προς τα μεταλλικά υλικά. Η παρουσία θεικών αλάτων αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τα μέταλλα, υπό την έννοια ότι μπορούν να μετατραπούν σε εξαιρετικά διαβρωτικά σουλφίδια².

² **Σουλφίδια, ή σουλφίδες**, (εκ του αγγλικού όρου sulfides), χαρακτηρίζονται τόσο οργανικές όσο και ανόργανες ενώσεις του θείου (S) με άλλα στοιχεία ή ρίζες. Έτσι τα σουλφίδια διακρίνονται σε οργανικά σουλφίδια και ανόργανα σουλφίδια, καλούμενα και σουλφίδια μετάλλων (Wikipedia).

- Μικροβιακοί παράγοντες (Microbiological factors): Η MIC αναφέρεται στο είδος της διάβρωσης που επηρεάζεται από την παρουσία και την δραστηριότητα των μικροοργανισμών ή/και προϊόντων που παράγονται μέσω του μεταβολισμού τους. Τα βακτήρια, οι μύκητες και άλλοι μικροοργανισμοί διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο διαβρωτικό χαρακτήρα του εδάφους, με καταγεγραμμένα εντυπωσιακά σε ταχύτητα και εύρος φαινόμενα διάβρωσης (Guo, 2012; Winston, 2008; Roberge, 2000).

2.3.3 Μέτρα – Πρακτικές αντιμετώπισης του φαινομένου

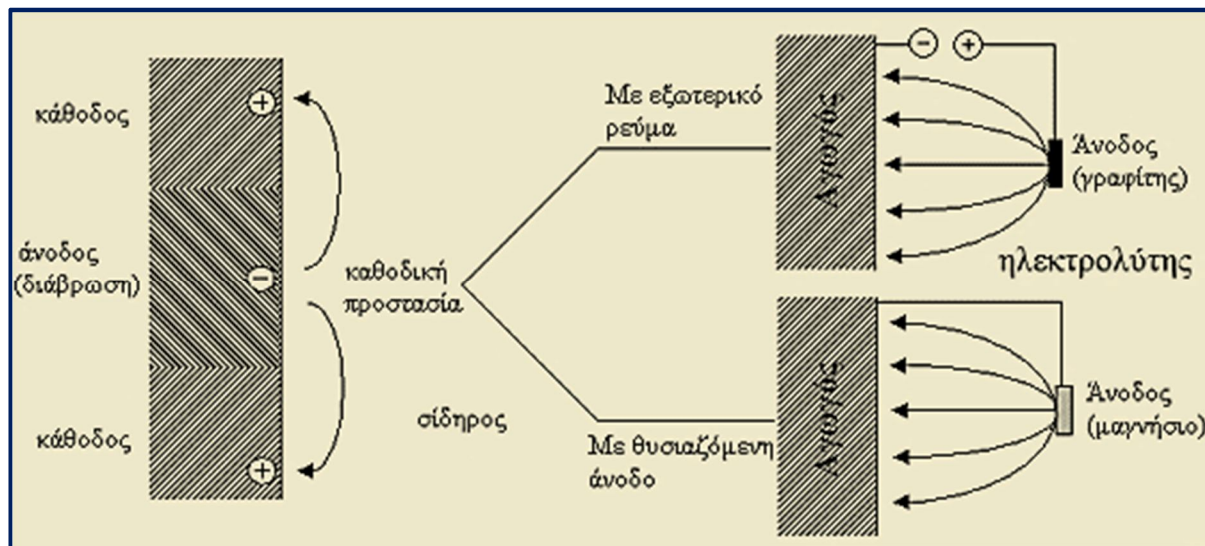
Η πολύ συχνά εμφανιζόμενη και σε ορισμένες περιπτώσεις καταστροφική απειλή της διάβρωσης για τους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, έχουν αναγκαστικά οδηγήσει σε λήψη μέτρων αντιμετώπισης και μετριασμού του φαινομένου. Σε προηγούμενη αναφορά έχουν καταγραφεί οι βασικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης οι οποίοι είναι το ηλεκτροχημικό προφίλ του περιβάλλοντος και διάφοροι μηχανικοί παράγοντες. Με γνώμονα τις παραμέτρους αυτές ταξινομούμε τις πρακτικές αναστολής του φαινομένου.

Η αρχή γίνεται με τον ορθό μηχανολογικό σχεδιασμό, ο οποίος περιλαμβάνει την:

- [1]. Σωστή χρήση των εφαρμοστέων προτύπων, των προδιαγραφών και διαδικασιών του έργου.
 - [2]. Μελέτη των υφιστάμενων στοιχείων και δεδομένων αντίστοιχων συστημάτων ΦΑ.
 - [3]. Επιλογή κατάλληλων υλικών, μεθόδων προστασίας, ελέγχου και παρακολούθησης της διάβρωσης.
 - [4]. Επιλογή κατάλληλων μεθόδων παρακολούθησης της διάβρωσης, της συμπεριφοράς των υλικών κατασκευής, του διαβρωτικού περιβάλλοντος και την αποτελεσματικότητα των μέτρων πρόληψης.
- Η επιλογή των υλικών (κράματα, πολυμερή ή σύνθετα υλικά) κατασκευής των αγωγών μεταφοράς αποτελεί εξίσου σημαντικό τομέα, επιλέγοντας με αυστηρά κριτήρια τα κατάλληλα υλικά προσαρμοσμένα στο προς εγκατάσταση περιβάλλον. Ιδανικό υλικό για την κατασκευή των αγωγών μεταφοράς που να μην προσβάλλεται το από τη διάβρωση, δεν υπάρχει. Παρά ταύτα η εμπεδωμένη πρακτική έχει αναδείξει πρώτους σε προτίμηση τους ανοξειδωτους χάλυβες και τα κράματα με βάση το νικέλιο ως υλικά ανθεκτικότερα στη διάβρωση, σε σχέση με τον ανθρακούχο χάλυβα. Αν και ο ανοξειδωτος χάλυβας είναι ανθεκτικότερος στη διάβρωση, ωστόσο οι ανοξειδωτοι χάλυβες και τα κράματα νικελίου παρουσιάζουν ευαισθησία στις διαβρώσεις τύπου βελονισμού (pitting), χαραγής (crevice) και ρηγματώσεων (Stress Corrosion Cracking-SCC).
 - Η χρήση προστατευτικών επιστρώσεων βασίζεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια του μετάλλου πρέπει να απομονωθεί από ένα επιθετικά διαβρωτικό περιβάλλον. Οι επιστρώσεις αυτές διακρίνονται ανάλογα με τη φύση του υλικού επίστρωσης, σε οργανικές, ανόργανες και μεταλλικές. Οι οργανικές επιστρώσεις μπορεί να είναι χρώματα, πολυμερή υλικά, γράσο και

άλλα παραφινικά μείγματα. Οι ανόργανες επιστρώσεις μπορεί να είναι σμάλτο, κεραμικά (μεταξύ των οποίων το τσιμέντο) και το γυαλί. Στις μεταλλικές επιστρώσεις χρησιμοποιείται μέταλλο ή κράμα μετάλλου.

- Η επιρροή της χημείας του περιβάλλοντος επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους όπως η έγχυση αναστολέων διάβρωσης, η χρήση βιοκτόνων, ο έλεγχος του pH, τεχνικές απομάκρυνσης του H₂O και χημικών ενώσεων από το ΦΑ. Οι αναστολείς διάβρωσης καταλαμβάνουν σημαντικό ρόλο στην πρόληψη και τον περιορισμό της εξάπλωσης της διάβρωσης στα συστήματα ΦΑ. Οι πρώτοι αναστολείς ήταν αμίνες που χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο ελέγχου της διάβρωσης σε αγωγούς μεταφοράς ΦΑ από το 1940.
- Η καθοδική προστασία συγκαταλέγεται ως μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ελέγχου της εξωτερικής διάβρωσης της επίστρωσης των υπόγειων αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Πρακτικά εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού στον αγωγό για να διακοπεί η κίνηση των ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται καθοδικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού, με αποτέλεσμα ο αγωγός να λειτουργεί ως κάθοδος, γεγονός που συνεπάγεται τον περιορισμό της κίνησης των ηλεκτρονίων. Επιπλέον, η καθοδική προστασία οδηγεί στην ανάπτυξη αποθέσεων που προστατεύουν τον χάλυβα, λόγω της αλκαλικής του φύσης. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συστημάτων καθοδικής προστασίας, τα συστήματα μέσω εξωτερικής επιβαλλόμενης πηγής συνεχούς ρεύματος και τα συστήματα με χρήση θυσιαζόμενων ανόδων. Με την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου (μέσω εξωτερικής πηγής) η επιφάνεια του αγωγού συνδέεται με τον αρνητικό πόλο μέσω εξωτερικής πηγής συνεχούς ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω αδρανούς ηλεκτροδίου (συνήθως ηλεκτρογραφίτη). Ο αγωγός λειτουργεί σαν κάθοδος, γεγονός που συνεπάγεται τον περιορισμό στην κίνηση των ηλεκτρονίων άρα και στο μετριασμό της διάβρωσης. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη εναποθέσεων που προστατεύουν το χάλυβα, δεδομένου ότι είναι αλκαλικής φύσης. Στη δεύτερη μέθοδο η επιφάνεια του αγωγού πολώνεται διαφορετικά. Πιο συγκεκριμένα η επιφάνεια του αγωγού συνδέεται αγώγιμα με μεταλλική επιφάνεια (άνοδος), όπως το μαγνήσιο, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό γαλβανικό στοιχείο του οποίου η άνοδος με την πάροδο του χρόνου διαβρώνεται (γι' αυτό και χρησιμοποιείται ο όρος θυσιαζόμενη άνοδος), ενώ η επιφάνεια του αγωγού προστατεύεται. Στην Εικόνα 2.2 που ακολουθεί, απεικονίζεται σχηματικά η λειτουργία των δυο προαναφερθέντων μεθόδων.



Εικόνα 2.2: Σχηματική Απεικόνιση λειτουργίας των δυο μεθόδων (εξωτερικού ρεύματος και θυσιαζόμενης ανόδου) Καθοδικής Προστασίας (Υφαντής, 2008)

Επίσης η καθοδική προστασία εφαρμόζεται στις εξωτερικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη. Οι υψηλές θερμοκρασίες, οι κατεστραμμένες επιστρώσεις, η μικροβιακή προσβολή, και το ξηρό έδαφος είναι ανασταλτικοί παράγοντες εφαρμογής της μεθόδου. Για την μέθοδο αυτή ακολουθεί αναλυτική αναφορά στην Παράγραφο 3.10 του Κεφάλαιο 3 (Winston, 2008; Groysman, 2017; Roberge, 2000).

2.4 Η έννοια της Διαχείρισης Κινδύνου στους Αγωγούς Φυσικού Αερίου

Τα συστήματα μεταφοράς ΦΑ και ειδικότερα οι υποδομές των αγωγών μεταφοράς, λόγω της μεγάλης σημαντικότητάς τους πρέπει να είναι απαλλαγμένοι το δυνατόν από τους περισσότερους κινδύνους που θα μπορούσαν να προκαλέσουν καταστροφικά αποτελέσματα σε πολλά επίπεδα.

Οι απειλές για την ασφάλεια των αγωγών ΦΑ κατηγοριοποιούνται σε:

- Ελαττώματα υλικού και κατασκευής (ελαττωματικές συγκολλήσεις, μηχανικές κατασκευαστικές βλάβες)
- Μηχανικές βλάβες στη φάση της κατασκευής και της συντήρησης
- Ανθρωποκεντρικές παρεμβάσεις (δολιοφθορές, τρομοκρατικές ενέργειες ή ατυχήματα από τρίτους)
- Σφάλματα στη λειτουργία
- Μηχανισμούς διάβρωσης
- Τυχαία γεγονότα (σεισμοί, κατολισθήσεις, ακραία καιρικά φαινόμενα)

Βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι υπάρχουν εν δυνάμει κίνδυνοι σε όλο των κύκλο ζωής των συστημάτων αγωγών μεταφοράς. Επομένως θα πρέπει να σχεδιάζονται και να υλοποιούνται όλα εκείνα τα απαραίτητα μέτρα πρόληψης και καταστολής. Είναι ξεκάθαρο ότι ο σωστός σχεδιασμός, η παρακολούθηση και η ορθή διαχείριση της λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς

ΦΑ αποκτούν στρατηγική σημασία και είναι πρώτης προτεραιότητας (Vairo, 2020; Kishawy, 2009).

2.5 Η Διάβρωση ως Παράγοντας Κινδύνου για Αγωγούς Φυσικού Αερίου

Η διάβρωση ως εγγενής φυσική διαδικασία συνήθως χαρακτηρίζεται από την υποβάθμιση του μετάλλου και από την αλλοίωση των χημικών χαρακτηριστικών του, κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Αναδεικνύεται ως καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την αξιοπιστία των αγωγών καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας τους, δεν μπορεί να αποφευχθεί και είναι μη αναστρέψιμη. Η υποβάθμιση είναι αναπόφευκτο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός αγωγού. Τα μέταλλα από την φύση τους παρουσιάζουν την τάση να υποβαθμίζονται ενεργειακά, γεγονός που οδηγεί στο φαινόμενο της διάβρωσης ως αποτέλεσμα της οξειδωσης. Ως εκ τούτου ζητούμενο είναι μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των υλικών και του περιβάλλοντος, προκειμένου να περιοριστεί όσο πιο αποτελεσματικά γίνεται το φαινόμενο.

Θεμελιώδεις κλάδοι της επιστήμης της διάβρωσης είναι αυτοί της ηλεκτροχημείας και της μεταλλουργίας. Ενώ η ηλεκτροχημεία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των υλικών μέσω της μελέτης της διάβρωσης, η μεταλλουργία προσφέρει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών και των κραμάτων τους, λειτουργώντας ως μέσο για την καταπολέμηση της υποβάθμισής τους. Ο μηχανισμός διάβρωσης και ο ρυθμός προσβολής από αυτή, εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο, όπως η παρουσία αέρα και H_2O , η χημική ταυτότητα του εδάφους κ.α.

Η διαχείριση του φαινομένου επικεντρώνεται στο σωστό σχεδιασμό, στην αρτιότητα εκτέλεσης του έργου, στην αξιολόγηση των επερχόμενων κινδύνων και το συνεχή έλεγχο. Η συνεχής επιθεώρηση και η παρακολούθηση του φαινομένου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της ακεραιότητας των αγωγών και στον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων. Η συλλογή δεδομένων κατά την παρακολούθηση και επιθεώρηση των αγωγών χρησιμεύει στη βελτίωση της διαδικασίας ελέγχου διευκολύνοντας την πρόβλεψη για την κατάρτιση του κατάλληλου σχεδίου αντιμετώπισης. Αποτελεσματική προσέγγιση στη διαχείριση της διάβρωσης συνεπάγεται ολοκληρωμένη αξιολόγηση των κινδύνων και εν συνεχεία λήψη κατάλληλων μέτρων παρακολούθησης, ελέγχων και προληπτικών ενεργειών για τον μετριασμό του φαινομένου.

Τα ατυχήματα που προκαλούνται από διάβρωση σε αγωγούς ΦΑ μπορούν να έχουν σοβαρές συνέπειες για την ανθρώπινη ζωή, τα περιουσιακά στοιχεία και το περιβάλλον. Συχνά εξελίσσεται απροσδόκητα και πέρα από τη σφαίρα των αναμενόμενων προβλέψεων (Marsh, 2008).

2.6 Διαχείριση Ασφάλειας Αγωγών Φυσικού Αερίου

Η ευρύτητα των κινδύνων που απειλούν το σύστημα μεταφοράς ΦΑ είναι μεγάλης έκτασης και έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση Συστημάτων Ασφαλείας τα οποία εφαρμόζονται στο έπακρο ενώ

παράλληλα βελτιώνονται και εξειδικεύονται συνεχώς. Πρόκειται για διαδικασία που αποσκοπεί στην αξιολόγηση και τον μετριασμό των κινδύνων του Συστήματος Μεταφοράς, προκειμένου να μειωθούν τόσο η πιθανότητα όσο και οι συνέπειες των συμβάντων.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύσσονται ή βελτιώνονται τεχνικές χύτευσης των μετάλλων και κατασκευής των αγωγών από εξειδικευμένες πλέον εταιρείες της βιομηχανίας. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν νέους αγωγούς έχουν στη διάθεσή τους μια σειρά από υλικά και επιστρώσεις που δεν ήταν διαθέσιμες τα προηγούμενα χρόνια. Η πρόοδος στη μεταλλουργία δίνει στους κατασκευαστές αγωγών τη δυνατότητα να τελειοποιούν τα κράματα ώστε να ανταποκρίνονται στις υψηλές απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Στο πεδίο της ανέγερσης τηρούνται αυστηρά πρωτόκολλα μελετών και κανόνες διασφαλίζοντας τον περιορισμό των πιθανών κινδύνων. Το αυστηρό πρόγραμμα επιθεωρήσεων στο στάδιο της κατασκευής και κατά την διάρκεια της λειτουργίας του Συστήματος Μεταφοράς προλαμβάνει ανεπιθύμητα φαινόμενα και αστοχίες τόσο του εξοπλισμού όσο και της απρόσκοπτης λειτουργίας του συστήματος. Η σωστή επιθεώρηση θεωρείται το κλειδί πολλές φορές για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι κάθε Σύστημα Μεταφοράς είναι μοναδικό, κατά συνέπεια και το αντίστοιχο Σύστημα Ασφαλείας πρέπει να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί βασιζόμενο στα μοναδικά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του (Marsh, 2008).

2.7 Ανασκόπηση κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αναφορά τους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, με αναφορές στα Συστήματα Μεταφοράς, την κατασκευή των αγωγών και το σημαντικό ρόλο του εδάφους όπου και εγκαθίστανται. Ακολουθώς πραγματοποιείται γενική εισαγωγή του φαινομένου της διάβρωσης, του τρόπου λειτουργίας και τα επιμέρους είδη του φαινομένου. Επίσης καταγράφεται λεπτομερείς αναφορά στις επιμέρους πτυχές του φαινομένου της διάβρωσης για τους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς. Ακολουθεί ανάλυση σε σχέση με τα θέματα διαχείρισης κινδύνων και συστημάτων ασφαλείας που αφορούν τα Συστήματα Μεταφοράς ΦΑ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΑΓΩΓΩΝ

ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

3.1 Δράση του Υδρογόνου

3.1.1 Περιγραφή του φαινομένου και γενεσιουργά αίτια

Ένα από τα βασικά κριτήρια στην επιλογή του μετάλλου για την κατασκευή των αγωγών, των υποδομών και του εξοπλισμού στη βιομηχανία του ΦΑ είναι η ικανότητά του να ανταπεξέρχεται ικανοποιητικά στην επίδραση του H_2 . Γενικότερα ο βαθμός επίδρασης του H_2 εξαρτώνται κυρίως από την ευαισθησία του υλικού και τη χημική σύσταση του περιβάλλοντος.

Η δράση του H_2 αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες διάβρωσης των αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Το H_2 απορροφάται από το μέταλλο όταν στον περιβάλλοντα χώρο υπάρχουν ή παράγονται ποσότητες από αυτό. Η εναπόθεση και η εισχώρηση του H_2 ξεκινά από το στάδιο της παραγωγής και διαμόρφωσης του μετάλλου, για την κατασκευή των αγωγών και συνήθως απορροφάτε κατά την παραγωγή του χάλυβα. Στο στάδιο αυτό το H_2 προέρχεται συνήθως από την υγρασία της ατμόσφαιρας και από τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία του κράματος.

Επίσης μπορεί να παρεισφρήσει κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων και να εισαχθεί μέσω ατμοσφαιρικής ή επιφανειακής μόλυνσης. Καθώς το διαμορφωμένο και συγκολλημένο πλέον τμήμα του αγωγού στο οποίο έχει εγκλειστεί H_2 ψύχεται, γίνεται υπερκορεσμένο και το H_2 διαχέεται σε αυτό.

Το H_2 μπορεί επίσης να απορροφηθεί από το μέταλλο με την εφαρμογή του συστήματος της καθοδικής προστασίας. Πιο συγκεκριμένα όταν το pH του περιβάλλοντος είναι χαμηλό, μέρος του αναγόμενου H_2 δεν σχηματίζει μόριο, αλλά διαχέεται στο μέταλλο με την μορφή ατόμων (ατομικό H_2). Αυτό μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της ηλεκτρολυτικής επιμετάλλωσης μετάλλων, δηλαδή του γαλβανισμού. Ουσίες όπως αρσενικό, αντιμόνιο, θείο, σελήνιο, και ιόντα κυανίου εμποδίζουν τα άτομα H_2 να σχηματίσουν μόριο και ονομάζονται καθοδικά δηλητήρια. Τα καθοδικά δηλητήρια διευκολύνουν τη μόλυνση διατηρώντας το H_2 σε ατομική μορφή και διαχέεται ευκολότερα στο μέταλλο. Περιβάλλοντα που περιέχουν υδρόθειο, το οποίο περιέχει τόσο H_2 όσο και στοιχεία καθοδικών δηλητηρίων, κρίνονται ως ιδιαίτερα επικίνδυνα για τα κράματα των μετάλλων.

Στην περίπτωση εκείνη που ο χάλυβας βρίσκεται σε περιβάλλον H_2 παρουσία υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, μπορεί επίσης να προκληθεί προσβολή από H_2 . Το H_2 απορροφάτε από τον χάλυβα και παρόλο που φαινομενικά δεν διαφαίνεται κάποια αστοχία, πολλές φορές χάνεται η αντοχή και την ολκιμότητά του μετάλλου.

Η διείδυση επίσης του H_2 ενισχύεται από τις υψηλές θερμοκρασίες, παρά το ότι η πλειονότητα των φαινομένων διάβρωσης συμβαίνει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Οι βασικοί λόγοι για την συσσώρευση H_2 η οποία τελικά οδηγεί σε φαινόμενα διάβρωσης συνοψίζονται παρακάτω:

[1]. Κύριοι εξωτερικοί παράγοντες

- Ο βαθμός οξύτητα του περιβάλλοντος
- Η περιεκτικότητα σε H_2S

[2]. Μεταλλουργικοί παράγοντες

- Ευαίσθητη μικροδομή του μετάλλου
- Παρουσία καθοδικών δηλητηρίων
- Απουσία θερμικής προετοιμασίας μετά τη συγκόλληση PWHT (Post Weld Heat Treatment)

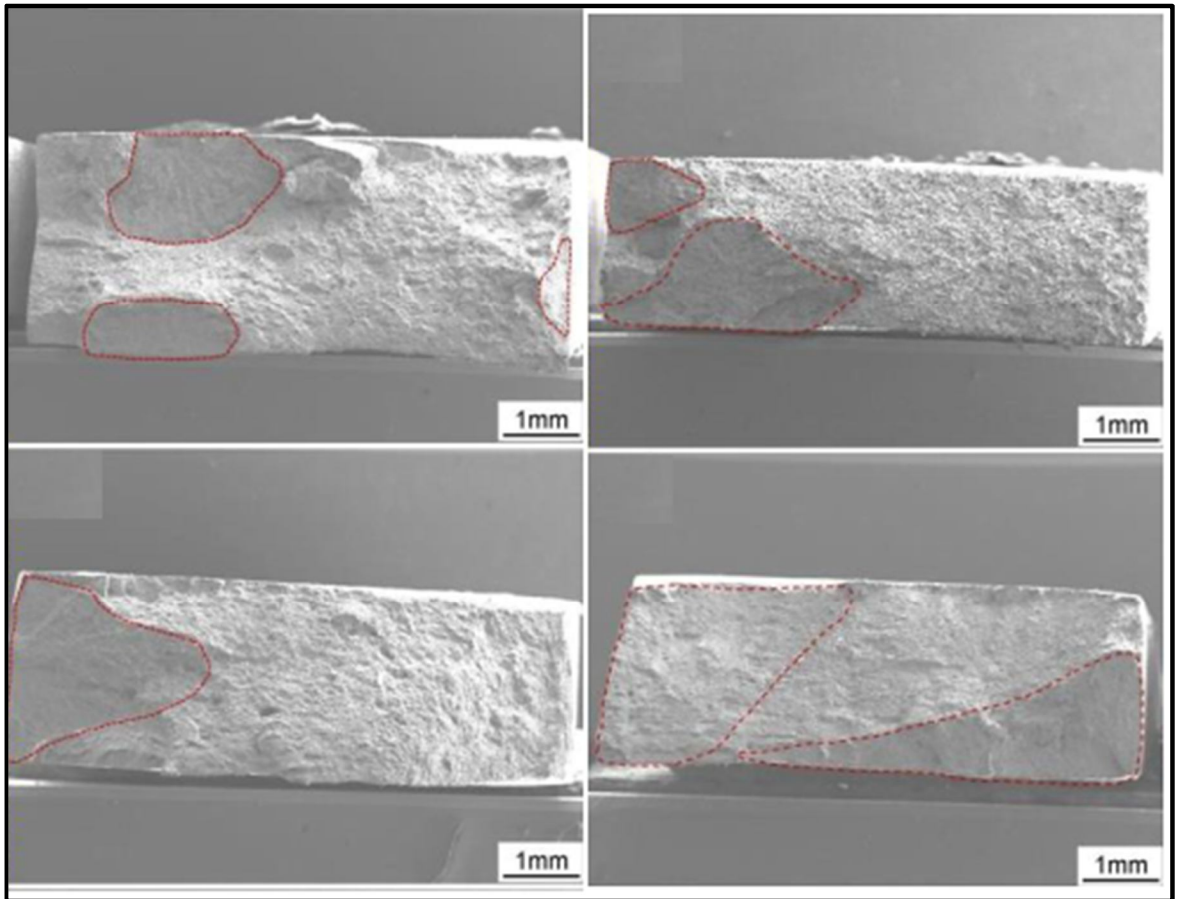
[3]. Εγκλείσματα στο χάλυβα

- Θειούχα εγκλείσματα
- Εγκλείσματα οξειδίων

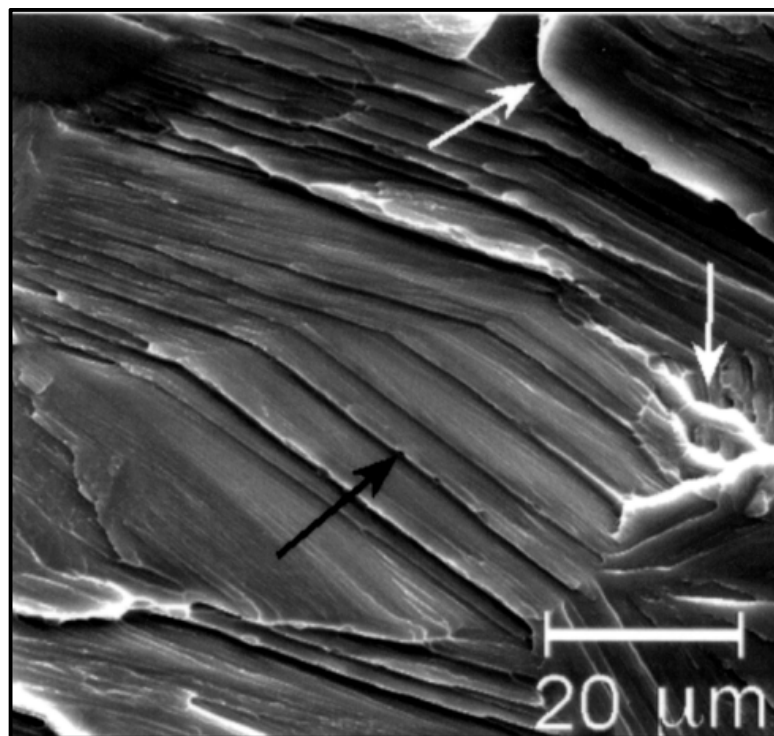
3.1.2 Επιπτώσεις στους αγωγούς μεταφοράς

Ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης μεταξύ H_2 και μετάλλου, η προκληθείσα διάβρωση εκδηλώνεται με διάφορους τρόπους. Η εισχώρηση δηλαδή του H_2 στο μέταλλο πραγματοποιείται με μηχανισμούς οι οποίοι καταγράφονται παρακάτω.

- [1]. Ψαθυροποίηση λόγω Υδρογόνου (Embrittlement): Η Ψαθυροποίηση οφείλεται στο γεγονός ότι η περίσσεια του διαλυμένου H_2 διασκορπίζεται με τη μορφή εγκλεισμάτων σε πόρους ή μικρορωγμές και λόγω της υψηλής πίεσης από εσωτερικές ή εξωτερικές δυνάμεις οδηγεί σε ρηγματώσεις του μεταλλικού πλέγματος. Η πίεση του αερίου H_2 δημιουργεί ένα είδος νιφάδων (flakes) στο μέταλλο, προκαλώντας ευθραυστότητα. Παρόμοιο φαινόμενο μπορεί να συμβεί όταν ο χάλυβας συγκολλάτε σε περιβάλλον που περιέχει H_2 , το οποίο μπορεί να εισαχθεί μέσω της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας ή επιφανειακής μόλυνσης ή και από το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης. Στην περίπτωση αυτή είναι πιθανό στη επιφάνεια θραύσης του μετάλλου να δημιουργηθούν κηλίδες οι οποίες προσομοιάζουν σε “μάτι ψαριού” (fish eye), με αποτέλεσμα η περιοχή γύρω από τη συγκόλληση να παρουσιάζει θρυμματισμούς. Στις Εικόνες 3.1 και 3.2 που ακολουθούν, απεικονίζονται μεταλλικές επιφάνειες που έχουν υποστεί ψαθυροποίηση. Επίσης στην Εικόνα 3.3 απεικονίζονται κηλίδες τύπου “μάτι ψαριού”.



Εικόνα 3.1: Δείγματα Ψαθυροποίησης μεταλλικών επιφανειών (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) (Paravinasam, 2014)

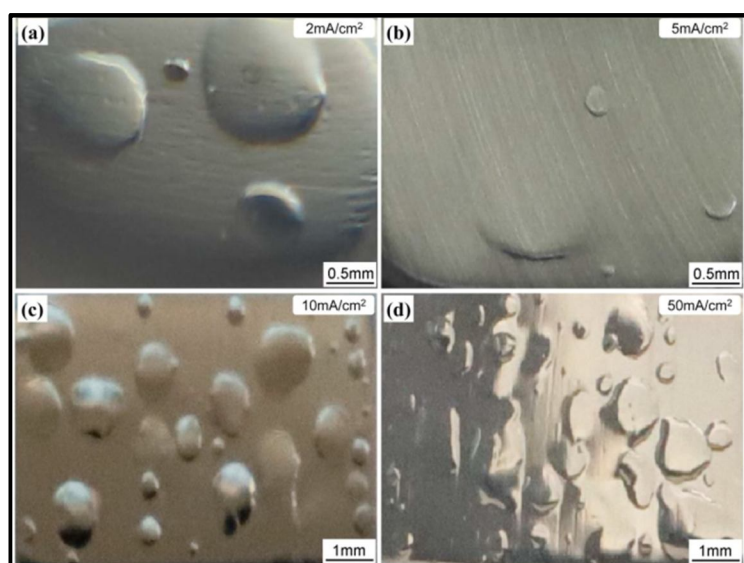


Εικόνα 3.2: Δείγμα Ψαθυροποίησης σε χαλύβδινο αγωγό (Woodtli, 1999)



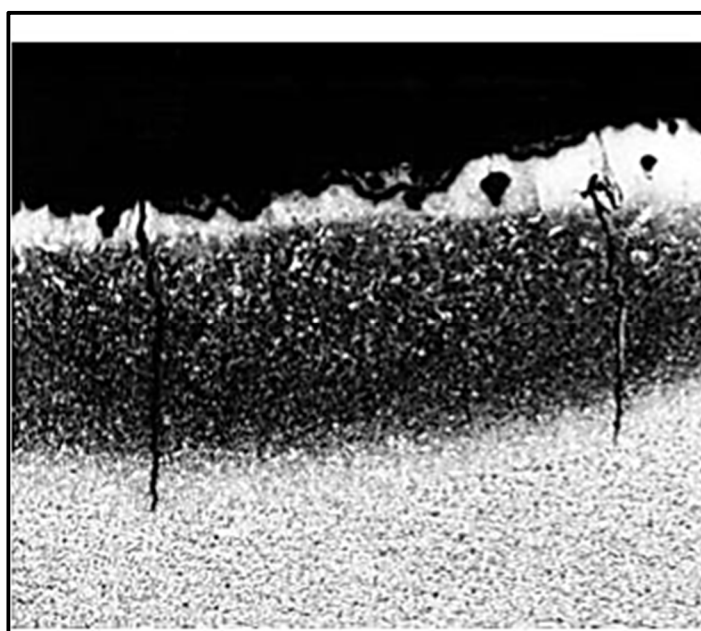
Εικόνα 3.3: Μορφολογία κηλίδων τύπου “μάτι ψαριού” (Whiteley, 2015)

Φλύκταινες λόγω Υδρογόνου (Hydrogen Blistering): Όταν τα άτομα του H_2 διαχέονται στο χάλυβα σχηματίζουν φλύκταινες ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου. Η πίεση του αερίου σε αυτές τις κυψέλες δημιουργεί υψηλές πιέσεις τοπικά, οι οποίες προκαλούν ρωγμές. Οι φλύκταινες εμφανίζονται συχνά όταν η ρωγμές αυτές δεν μπορούν να εξαπλωθούν στην επιφάνεια του μετάλλου ώστε να εκτονωθούν, οπότε υπάρχει πιθανότητα ανύψωσης και διόγκωσης του εξωτερικού στρώματος του μετάλλου. Ακόμα και οι προστατευτικές επιστρώσεις των αγωγών είναι ευάλωτες στην δημιουργία φλυκταινών λόγω H_2 , ειδικά όταν το καθοδικό δυναμικό δεν ελέγχεται σωστά. Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως καθοδική αποκόλληση, ευνοείται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της επικάλυψης του αγωγού και των ιόντων υδροξειδίου που παράγονται κατά την αναγωγή του H_2O . Σε υψηλό καθοδικό δυναμικό, οι επιστρώσεις υφίστανται επιταχυνόμενη διείδυση νερού στα άκρα, η οποία κορυφώνεται με την εμφάνιση θυλάκων H_2 ως εκ τούτου και φλυκταινών. Στην Εικόνα 3.4 απεικονίζονται τυπικές μορφές φλυκταινών H_2 .



Εικόνα 3.4: Τυπικές μορφές φλυκταινών H_2 (Avery, 2001)

[2]. Εργοδιάβρωση λόγω υψηλής συγκέντρωσης σε θειικά ανιόντα (Sulphide Stress Cracking):
Στην πραγματικότητα εντάσσεται στο φαινόμενο της ψαθυροποίησης και πρόκειται για την η διαδικασία κατά την οποία το μέταλλο γίνεται εύθραυστο ή σπάει πιο εύκολα λόγω απώλειας της ικανότητα ολκιμότητάς του. Εμφανίζεται όταν πραγματοποιούνται αντιδράσεις με υδρόθειο και παράγονται σουλφίδια μετάλλων και ατομικό H_2 . Τα στοιχεία αυτά διαχέονται στο μεταλλικό πλέγμα προκαλώντας υψηλές εσωτερικές τάσης, ασυνέχειες, ή εγκλείσματα H_2 με αποτέλεσμα την ευθραυστότητα και πιθανή ρηγμάτωση. Τα κράματα μετάλλων (κράματα σιδήρου και χάλυβα υψηλής αντοχής) τα οποία υπό κανονικές συνθήκες είναι όλκιμα, παρουσιάζουν συχνότερα τον κίνδυνο εμφάνισης του φαινομένου αυτού σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών. Στην Εικόνα 3.5 απεικονίζονται τέτοιου είδους ρωγμές λόγω εργοδιάβρωσης (Avery, 2001; Ohaeri, 2008; Elboujdaini, 2008; Papavinasam, 2014).



Εικόνα 3.5: Φαινόμενο εργοδιάβρωσης λόγω θεικών ανιόντων (Avery, 2001)

3.2 Δράση των Μικροοργανισμών

3.2.1 Περιγραφή του φαινομένου και γενεσιουργά αίτια

Η MIC ή ευρύτερα γνωστή ως διάβρωση επηρεαζόμενη από μικροβιακά αίτια, είναι εξαιρετικά σημαντική για τη βιομηχανία του ΦΑ λόγω της συχνότητας των φαινομένων διάβρωσης για τα οποία ευθύνεται. Στην προσπάθεια να δοθεί ένας ορισμός για το εν λόγω φαινόμενο, καταγράφεται ως ηλεκτροχημική διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί μπορούν να πυροδοτήσουν, να διευκολύνουν και να επιταχύνουν την αντίδραση διάβρωσης μέσω της αλληλεπίδρασης τριών κύριων “πρωταγωνιστών” που συνθέτουν το σύστημα αποτελούμενο από το μέταλλο, το διάλυμα και τους μικροοργανισμούς.

Οι βασικές κατηγορίες των μικροοργανισμών που ευθύνονται για το είδος της διάβρωσης αυτής είναι:

- Τα βακτήρια που μειώνουν τα θειικά άλατα (Sulphate Reducing Bacteria - SRB): Τα SRB βακτήρια περιλαμβάνουν διάφορες ομάδες βακτηρίων που ανάγουν τα θειικά σε θειούχα άλατα και παράγουν ανθρακικά που αυξάνουν το pH που περιβάλλοντος. Μπορεί να δημιουργήσουν ευνοϊκές συνθήκες όταν οι μεταλλικές κατασκευές εκτίθενται σε H₂O που περιέχει θειικά άλατα αλληλοεπιδρώντας με το μέταλλο δημιουργώντας στρώμα μοριακού H₂ στην επιφάνεια του μετάλλου. Είναι οι πιο δημοφιλείς από τους μικροοργανισμούς στην ανάπτυξη του φαινομένου της MIC.
- Τα βακτήρια που παράγουν οξύ (Acid Producing Bacteria - APB): Τα APB παράγουν σημαντικές ποσότητες οργανικών και ανόργανων οξέων, όπως νιτρικό, θειικό, νιτρώδες και ανθρακικό οξύ. Η παρουσία αυτών των βακτηρίων καθώς και η προαναφερθείσα κατηγορία βακτηρίων SRB αποτελούν τους βασικότερους μηχανισμούς ανάπτυξης της MIC.
- Οι μύκητες: Εμφανίζονται τόσο στην ατμόσφαιρα όσο και στον υδροφόρο ορίζοντα και αυξάνουν την οξύτητα του περιβάλλοντος παράγοντας οξικό, οξαλικό και κιτρικό οξύ, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διάβρωσης.
- Βακτήρια: Τα βακτήρια που εμπλέκονται στη MIC μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το σχήμα και την εμφάνισή τους, τη θερμοκρασία, ακόμη και με την κατανάλωση O₂. Θα μπορούσαν να είναι αερόβια ή αναερόβια, ωστόσο τα αναερόβια βακτήρια θεωρούνται η βασική αιτία της MIC και αναπτύσσονται στο υγρό έδαφος και το H₂O.
- Βακτήρια οξειδωσης θειικών αλάτων: Είναι τα βακτήρια που οξειδώνουν τα θειικά άλατα, είναι αερόβια στη φύση τους, που σημαίνει ότι χρειάζονται O₂ για τον μεταβολισμό τους. Αναπτύσσονται παρουσία χαμηλών τιμών pH και σε περιβάλλοντα όπως τα στερεά, τα εδάφη και το H₂O που περιέχει θειούχα ορυκτά.
- Βακτήρια αναγωγής μετάλλων: Θα μπορούσαν να είναι αερόβια ή αναερόβια στο περιβάλλον. Ανάγουν αδιάλυτες ενώσεις σιδήρου σε διαλυτά ιόντα σιδήρου. Λόγω της χημικής τους δραστηριότητας, επιδρούν στην αφαίρεση του προστατευτικού στρώματος των μετάλλων.
- Βακτήρια οξειδωσης μετάλλων: Είναι κοινώς γνωστά ως βακτήρια οξειδωσης σιδήρου, ανάγουν τα σιδηρούχα ιόντα σε ιόντα σιδήρου, είναι αερόβια στη φύση τους και απαιτούν χαμηλό επίπεδο O₂ για το μεταβολισμό τους. Η συσσώρευσή τους προκαλούν οξείδωση μεταλλικών επιφανειών και προάγουν τη διάβρωση με την εναπόθεση καθοδικά αντιδραστικών οξειδίων σιδήρου και μαγγανίου.

Ενώ η θεμελιώδης ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης παραμένει ίδια στην περίπτωση της MIC, όμως η συμμετοχή των μικροοργανισμών την αναβαθμίζει δίνοντάς της διακριτά χαρακτηριστικά, με σημαντικότερο την αλλοίωση της διεπιφάνειας μετάλλου-διαλύματος μέσω του σχηματισμού

βιοϋμενίου (βιοφίλμ³). Το βιοφίλμ είναι ένα λεπτό στρώμα που δημιουργείται από τα βακτήρια όταν προσκολλώνται στις μεταλλικές επιφάνειες. Η διάρκεια του σχηματισμού βιοφίλμ μπορεί να κυμαίνεται από λίγα λεπτά έως μερικές ώρες, ανάλογα με τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες είναι βυθισμένο το μέταλλο.

Η διαδικασία σχηματισμού βιοφίλμ ξεκινά με την αρχική ανάπτυξη ενός φιλμ προετοιμασίας, κατά τη διάρκεια του οποίου τα βακτήρια υπάρχουν στην πλαγκτονική τους κατάσταση. Στη συνέχεια, τα βακτήρια ξεκινούν τη διαδικασία σχηματισμού αποικιών στο φιλμ προετοιμασίας, μεταβαίνοντας σε άμισχα βακτήρια μέσω της έκκρισης εξωπολυσακχαριτών⁴. Αυτές οι ουσίες προσκολλούν τα βακτηριακά κύτταρα στην επιφάνειά τους, με αποτέλεσμα τη συνεχή αναπαραγωγή τους στη μεταλλική επιφάνεια, εγκλωβίζοντας έτσι αριθμό σωματιδίων με αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους του βιοφίλμ. Επιπλέον, η στενή συνύπαρξη μεταξύ αποικιών διαφόρων ειδών βακτηρίων οδηγεί σε μεταβολές των ηλεκτροχημικών συνθηκών εντός του βιοφίλμ, εκτός από το αυξημένο πάχος του. Η μεταβολή της ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς του συστήματος βιοφίλμ-μέταλλο χαρακτηρίζεται από ένα φαινόμενο γνωστό ως εξευγενισμός. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του δυναμικού διάβρωσης και ενισχύει ως εκ τούτου την ευπάθεια στο φαινόμενο της διάβρωσης.

3.2.2 Επιπτώσεις στους αγωγούς μεταφοράς

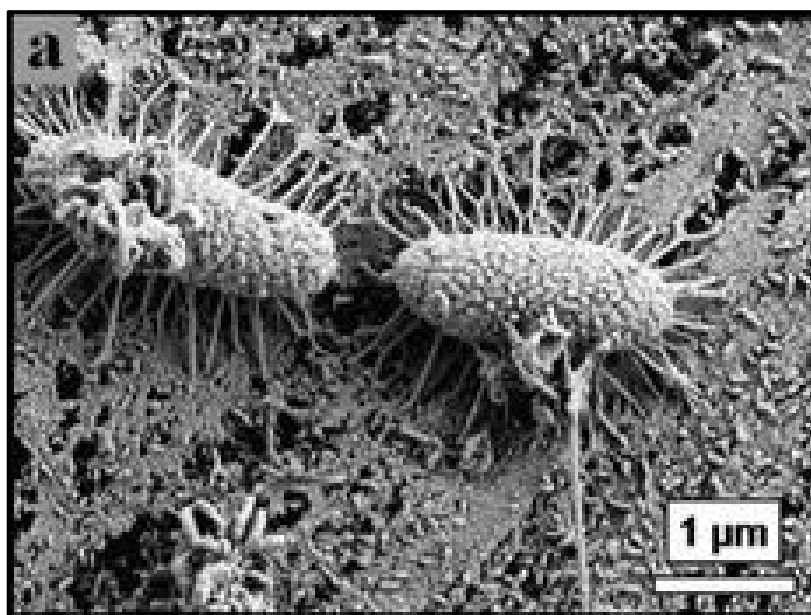
Η MIC δεν παράγει μόνο τοπική διάβρωση. Αντιθέτως, μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση χαραγής (crevice) ή βελονισμού (pitting) ακόμη και σε ρωγμώδη διάβρωση. Σε κάθε περίπτωση κύρια επίδραση των βακτηρίων υπό αερόβιες συνθήκες αυξάνει την πιθανότητα έναρξης τοπικής διάβρωσης. Η πιθανότητα εμφάνισης αυτού του είδους διάβρωσης στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, αυξάνεται με την παρουσία διαθέσιμων θρεπτικών ουσιών, H₂O και ηλεκτρονιοδεκτών. Οι εναλλασσόμενες συγκεντρώσεις υγρασίας και O₂ θα επηρεάσουν επίσης την ανάπτυξη των βακτηριακών πληθυσμών. Παρά τους πολυάριθμους μηχανισμούς που έχουν

³ **Βιοφίλμ (Biofilm):** είναι ένα είδος βιολογικής μεμβράνης η οποία αποτελείται από αποικίες βακτηρίων που συγκεντρώνονται αναπτύσσοντας μικροβιολογικές διεργασίες. Η παρουσία τους είναι ανεπιθύμητη, λόγω του ότι συμβάλλουν στη διάβρωση με διάφορους τρόπους. Ο απλούστερος είναι η διαφορά στη συγκέντρωση O₂ ανάλογα με το πάχος του βιοφίλμ. Εκτός από αυτή την επίδραση, το βιοφίλμ επιτρέπει την ελεύθερη συσσώρευση όξινων μεταβολικών προϊόντων κοντά στην επιφάνεια του μετάλλου, τα οποία επιταχύνουν τη διάβρωση (Wikipedia).

⁴ Εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες ή αλλιώς **εξωπολυσακχαρίτες** αποτελούνται κυρίως από πρωτεΐνες και σάκχαρα, αλλά και από χουμικές ενώσεις, νουκλεϊκά οξέα, λιπίδια και άλλα κυτταρικά συστατικά. Είναι πολύπλοκα μόρια υψηλού μοριακού βάρους και συγκεκριμένα μεγάλα πολυμερή μονοσακχαριτών, αποτελούμενα από 3 ή 4 μονομερή. Διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τύπο του επαναλαμβανόμενου μονοσακχαρίτη, το μήκος της αλυσίδας, τον τύπο του δεσμού που συνδέει τα απλά σάκχαρα και τον βαθμό διακλάδωσης. Οι επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες (μονοσακχαρίτες) ενώνονται μεταξύ τους με γλυκοζιτικούς δεσμούς και ένα σάκχαρο μπορεί να ενωθεί με περισσότερα από δύο σάκχαρα, δημιουργώντας έτσι πολύ μεγάλες μακρομοριακές αλυσίδες με σύνθετα μόρια (Wikipedia).

καταγραφεί οι περισσότερες αστοχίες έχουν αποδοθεί στην παρουσία και τις δραστηριότητες των βακτηρίων τύπου SRB και APB.

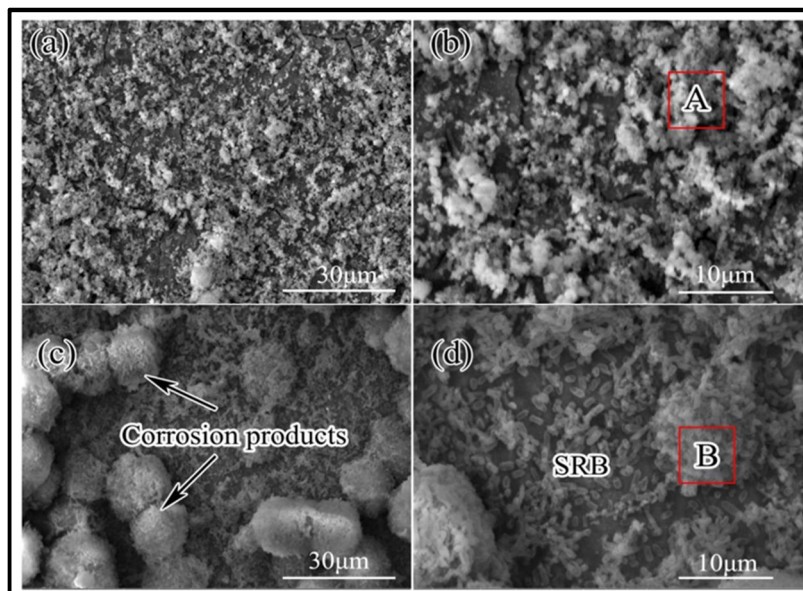
Όσον αφορά τα βακτήρια τα SRB, αποτελούνται από ποικιλόμορφη ομάδα βακτηρίων και αναπτύσσονται σε υπόγεια περιβάλλοντα. Είναι αναερόβια και συντηρούνται από οργανικά θρεπτικά συστατικά και γενικά απαιτούν πλήρη απουσία O_2 για να λειτουργήσουν αποτελεσματικότερα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σε πλούσια με O_2 υδάτινα αποθέματα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που έχουν υποστεί επεξεργασία με χλώριο και άλλα οξειδωτικά μέχρι να βρουν "ιδανικό" περιβάλλον που να υποστηρίζει το μεταβολισμό και τον πολλαπλασιασμό τους. Στην Εικόνα 3.6 που ακολουθεί απεικονίζεται ομάδα SRB βακτηριακών κυττάρων.



Εικόνα 3.6: Βακτηριακά κύτταρα τύπου SRB (Lahiri, 2017)

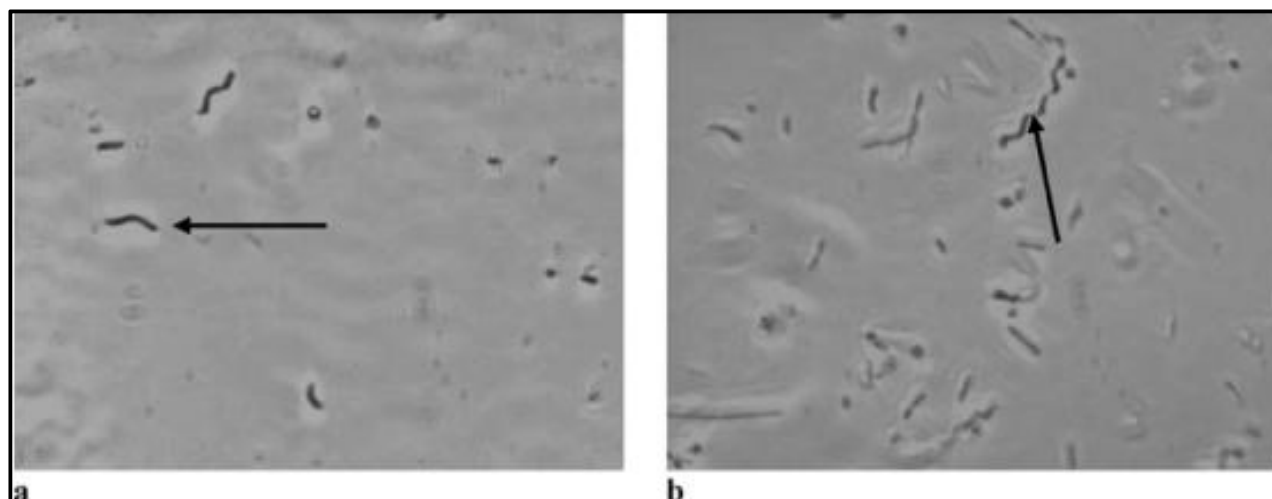
Οι συγκεντρώσεις τους συσχετίζονται με τη ποσότητα θεικών αλάτων στα υπόγεια ύδατα ενώ οι τιμές του "ευνοϊκού" pH κυμαίνεται από 6 έως 12 μονάδες. Επίσης μπορούν να μεταλλάσσονται για να προσαρμόζονται με διάφορες τιμές του pH και αναπτύσσονται στο έδαφος, στο γλυκό ή στο θαλασσινό H_2O υπό αναερόβιες συνθήκες. Ελλείπει O_2 , η μεταβολική δραστηριότητά τους προκαλεί συσσώρευση σουλφιδίων κοντά σε μεταλλικές επιφάνειες.

Είναι σχεδόν πάντα παρόντα σε σημεία διάβρωσης επειδή βρίσκονται πλούσια στο έδαφος, στα επιφανειακά ρεύματα και γενικά στις παραθαλάσσιες αποθέσεις. Το βασικό σύμπτωμα που συνήθως υποδεικνύει τη συμμετοχή τους στη διαδικασία διάβρωσης των σιδηρούχων κραμάτων, είναι η τοπική διάβρωση με παρουσία μαύρων θειούχων προϊόντων διάβρωσης. Στην Εικόνα 3.7 που ακολουθεί παρατίθενται προϊόντα διάβρωσης από SRB βακτήρια μετά από επώαση δυο(περίπτωση a, b της Εικόνας 3.7) ημερών και δεκατεσσάρων (περίπτωση c, d της Εικόνας 3.7) ημερών.



Εικόνα 3.7: Προϊόντα διάβρωσης από SRB βακτήρια μετά από δυο(a,b) και δεκατέσσερις(c,d) ημέρες επώασης (Lahiri, 2017)

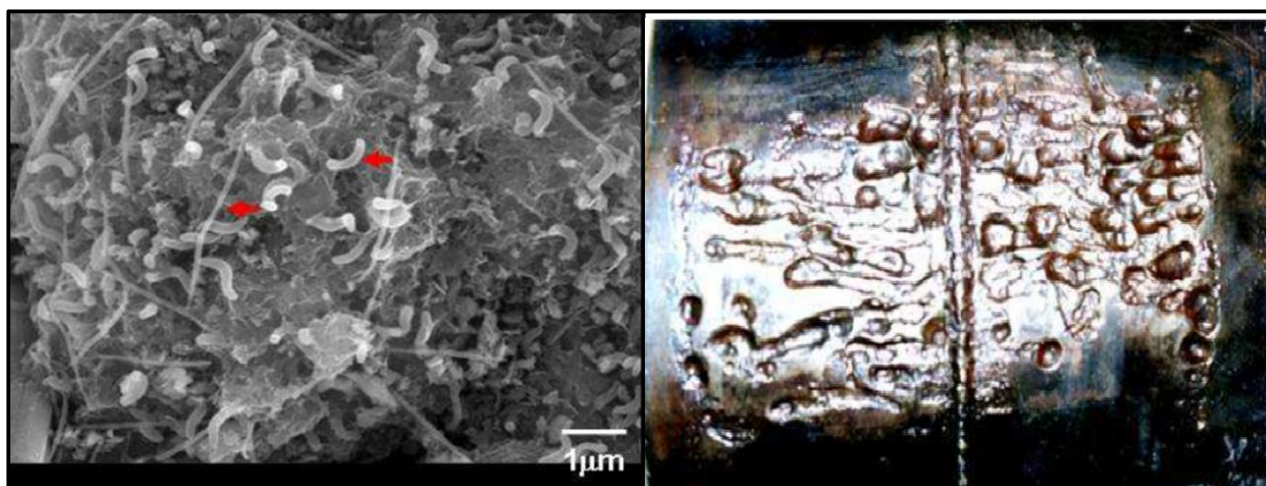
Όσον αφορά τα βακτήρια APB μπορούν να παραχθούν τόσο από βακτήρια όσο και από μύκητες. Τα περισσότερα από τα τελικά προϊόντα του μεταβολισμού της κοινότητας αυτού του είδους των μικροβίων είναι λιπαρά οξέα μικρής αλυσίδας, τα οποία είναι πολύ επιθετικά προς τον ανθρακούχο χάλυβα και γίνονται επίσης ιδιαίτερα επιθετικά όταν συγκεντρώνονται κάτω από άλλη συνορεύουσα αποικία βακτηρίων. Στην Εικόνα 3.8 απεικονίζεται ομάδα στελεχών APB βακτηρίων.



Εικόνα 3.8: Στελέχη που παράγουν οξύ (APB) σε (a) νηματοειδή και (b) σπειροειδή μορφή (Javaherdashti, 2008)

Αυτός ο τύπος επίθεσης επιταχύνεται με την προσθήκη χλωριόντων. Τα προϊόντα διάβρωσης που προκύπτουν είναι πλούσια σε χλωρίδια έχουν μεγαλύτερο όγκο και είναι λιγότερο σταθερά. Επίσης μπορούν να παράγουν επιθετικά ανόργανα οξέα όπως το θεικό οξύ. Οι μικροοργανισμοί στο έδαφος παράγουν υψηλές συγκεντρώσεις CO₂, το οποίο διαλύεται στα υπόγεια ύδατα με αποτέλεσμα την παραγωγή ανθρακικού οξέος. Το διάλυμα ανθρακικού οξέος είναι πολύ διαβρωτικό για τους χάλυβες των αγωγών και μπορεί να οδηγήσει σε γενική προσβολή, προσβολή

με διάβρωση ακόμη και ρωγμώδη διάβρωση. Στην Εικόνα 3.9 που ακολουθεί παρατίθενται προϊόντα διάβρωσης από APB βακτήρια σε χαλύβδινο αγωγό.



Εικόνα 3.9: Προϊόντα διάβρωσης από APB βακτήρια σε χαλύβδινο αγωγό (Javaherdashti, 2008)

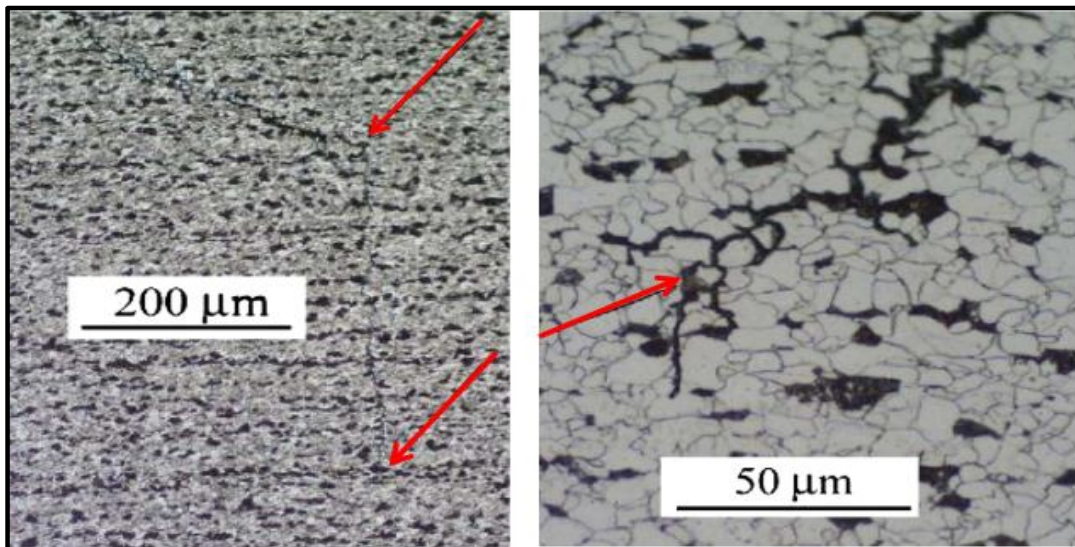
Εκτός των ανωτέρω δημοφιλέστερων βακτηρίων και αντίστοιχων μηχανισμών διάβρωσης, καταγράφεται επίσης και η Εναπόθεση Μετάλλων. Οι μικροοργανισμοί στην προκυμμένη περίπτωση επηρεάζουν τη διάβρωση δημιουργώντας διαφορεικά κύτταρα αερισμού στην επιφάνεια του μετάλλου και καθορίζουν τη θέση των αποικιών μικροοργανισμών. Οι οργανισμοί που αναφέρονται συχνότερα ως υπεύθυνοι για την πρόκληση κυψελών διαφορεικού αερισμού είναι εκείνοι οι οργανισμοί που είναι ικανοί να εναποθέτουν οξείδια σιδήρου και μαγγανίου στην επιφάνεια του αγωγού (Khan, 2021; Papavinasam, 2014; Lahiri, 2017).

3.3 Συνδυασμένη Δυναμοδιάβρωση

3.3.1 Περιγραφή του φαινομένου και γενεσιουργά αίτια

Εξίσου σημαντική κατηγορία διαβρώσεων είναι SCC, δηλαδή η διάβρωση λόγω τάσεων οι οποίες αναπτύσσονται και αποτελούν μια μορφή μηχανικής βλάβης που εμφανίζεται σε αγωγούς μεταφοράς ΦΑ. Στην πραγματικότητα είναι το φαινόμενο της ρηγμάτωσης που προκύπτει ως αποτέλεσμα των συνδυασμένων επιδράσεων ενός διαβρωτικού περιβάλλοντος και της εφαρμογής εφελκυστικών τάσεων.

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία αυτού του τύπου διάβρωσης σε αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, ανεξάρτητα από τα επίπεδα pH, είναι η παρουσία κηλίδων ή παράλληλων ρωγμών στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Πολλαπλές αποικίες μπορούν δυνητικά να υπάρχουν σε ένα ή και περισσότερα σημεία σύνδεσης του αγωγού. Οι ρωγμές βρίσκονται σε στενή γειτνίαση μεταξύ τους και παρουσιάζουν ένα εύρος διαστάσεων τόσο ως προς το μήκος όσο και ως προς το βάθος. Στην Εικόνα 3.10, παρατίθεται ενδεικτική απεικόνιση μεταβολής της μορφολογίας και του μεγέθους ρωγμής διάβρωσης.



Εικόνα 3.10: Αλλαγή της μορφολογίας και εξάπλωση της ρωγμής διάβρωσης (Ossai, 2014)

Η συνένωση των ρωγμών είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μεγαλύτερων και πιο εκτεταμένων ρωγμών, οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί τελικά να οδηγήσουν σε ρήξη. Στην περίπτωση που οι ρωγμές παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα, υπάρχει η πιθανότητα να διαδοθούν σε όλο το τοίχωμα και να οδηγήσουν σε διαρροή, πριν αποκτήσουν μήκος ικανό να προκαλέσει ρήξη.

Στην πραγματικότητα καταγράφονται δύο γνωστές μορφές διάβρωσης, αυτή που προκαλείται λόγω υψηλού pH και χαμηλού ή σχεδόν ουδέτερου pH, με πολλές ομοιότητες μεταξύ των δύο αυτών μορφών. Και στις δυο περιπτώσεις εμφανίζονται ως αποικίες πολλαπλών παράλληλων ρωγμών που είναι γενικά κάθετες στη διεύθυνση της υψηλότερης τάσης στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Αυτές οι ρωγμές μπορεί να ποικίλλουν σε βάθος και μήκος και αναπτύσσονται με δύο τρόπους. Αυξάνονται σε βάθος και μήκος και τείνουν να συνενώνονται ή να συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν μεγαλύτερες ρωγμές. Κάποια στιγμή αυτές οι ρωγμές μπορεί να φτάσουν σε έναν κρίσιμο συνδυασμό βάθους και μήκους που μπορεί να οδηγήσει σε ρήξη. Μια διαρροή θα συμβεί εάν μια ρωγμή μεγαλώσει μέσα στο τοίχωμα του σωλήνα πριν φτάσει σε κρίσιμο μήκος για την πρόκληση ρήξης. Επίσης οι ρωγμές κρίσιμου μεγέθους δεν χρειάζεται να διαπεράσουν πλήρως το τοίχωμα του σωλήνα για να συμβεί η ρήξη, δηλαδή μια ρηχή ρωγμή μπορεί να φτάσει σε μήκος που γίνεται κρίσιμο. Η αντοχή και η ολκιμότητα του εναπομείναντος τοιχώματος καθορίζει το κρίσιμο μέγεθος στο οποίο η συμπεριφορά της ρωγμής αλλάζει, από έναν αργά αυξανόμενο μηχανισμό διάβρωσης σε μια εξαιρετικά ταχεία εύθραυστη ή όλκιμη υπερφόρτιση.

Όσον αφορά την εμφάνιση αυτού του τύπου διάβρωσης, είναι απαραίτητο να πληρούνται ταυτόχρονα τρεις προϋποθέσεις:

- Ύπαρξη εφελκυστικής δύναμης
- Υλικό που είναι επιρρεπές σε ρωγμές διάβρωσης λόγω τάσης και
- Παρουσία επιθετικού περιβάλλοντος που ευνοεί τον σχηματισμό ρωγμών.

Η εκδήλωση αυτού του είδους διάβρωσης κατά κύριο λόγο αναπτύσσεται στην εσωτερική επιφάνεια των αγωγών και αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή του φαινομένου. Σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και παρουσία των παρακάτω παραγόντων δημιουργούνται οι συνθήκες πρόκλησης ρωγμών διάβρωσης. Οι βασικοί αυτοί παράγοντες είναι:

- Χημικές ουσίες κρίσιμης σημασίας
- Μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα
- Υδρόθειο και υγρό περιβάλλον.
- Υδροκυανικό οξύ

Οι πιθανοί κίνδυνοι που προκύπτουν από τη διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων είναι αρκετά σπάνια και παρατηρείται κυρίως σε αγωγούς που λειτουργούν πάνω από τις συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Παράγοντες που συμβάλλουν σημαντικά στην εμφάνιση και ανάπτυξη αυτού του τύπου διάβρωσης είναι οι:

- [1]. Μεταλλουργία: Το φαινόμενο της ρηγμάτωσης μπορεί να επηρεαστεί από μεταλλουργικούς παράγοντες, όπως η σύνθεση και η μικροδομή του μετάλλου. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται συνήθως τις τελευταίες πέντε δεκαετίες, στερούνται ορισμένων στοιχείων που υπάρχουν στους χάλυβες άνθρακα-μαγγανίου που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές, οι οποίοι δεν έχουν συσχετιστεί με περιπτώσεις ρηγμάτωσης τέτοιου τύπου
- [2]. Η διαδικασία κατασκευής των αγωγών: Η επικρατούσα μέθοδος κατασκευής των αγωγών για την μεταφορά του ΦΑ είναι αυτή με ραφές συγκόλλησης. Οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων χάλυβα που χρησιμοποιούνται σε επίπεδο μικροδομής του υλικού καταγράφει βελτιωμένη συμπεριφορά στους παράγοντες που προκαλούν την SCC. Το γενικότερο πλαίσιο καταγράφει συνεχή ανάπτυξη βελτιωμένων διαδικασιών κατασκευής, καθώς και αυξανόμενη τάση για την προμήθεια αγωγών υψηλότερης ποιότητας
- [3]. Οι συνθήκες λειτουργίας των αγωγών: Σε προηγούμενη αναφορά η συγκεκριμένη ρηγμάτωση απαιτεί την ταυτόχρονη εκπλήρωση τριών συνθηκών: ύπαρξη εφελκυστικής δύναμης, υλικό που είναι επιρρεπές σε ρωγμές διάβρωσης λόγω τάσης και παρουσία επιθετικού περιβάλλοντος που ευνοεί τον σχηματισμό ρωγμών. Η έναρξη ρωγμών δεν λαμβάνει χώρα κάτω από ένα ορισμένο κατώτατο επίπεδο τάσεων, γνωστό ως κατώτατο όριο εφελκυστικής τάσης. Ο ακριβής καθορισμός της οριακής τάσης αποδεικνύεται κυμαίνεται συνήθως από 40% και πάνω του ορίου διαρροής, ανάλογα με την έκταση της διακύμανσης της τάσης.
- [4]. Επίστρωση Προστασίας: Ο τύπος και η κατάσταση της επίστρωσης, οι οποίες μπορούν να επηρεαστούν από παράγοντες όπως η διαδικασία εγκατάστασης, τα μέτρα ποιοτικού ελέγχου και οι καιρικές συνθήκες κατά την εγκατάσταση, επηρεάζουν σημαντικά τη ρηγμάτωση λόγω

διάβρωσης υπό τάση. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν η επίστρωση εμφανίζει τάσεις αποκόλλησης, όπου η επικάλυψη διαχωρίζεται από το σωλήνα χωρίς να σπάσει, ή όταν αναπτύσσει ασυνέχειες οι οποίες αναφέρονται σε ρωγμές ή κενά στην επικάλυψη.

- [5]. Οι συνθήκες εδάφους: Έχει καταγραφεί ότι η αλατότητα και τα ποσοστά νατρίου του εδάφους έχουν παρατηρηθεί σε διάφορους τύπους εδάφους, συμβάλλουν στην πυροδότηση του φαινομένου. Επίσης μικρές ποσότητες ηλεκτρολυτών ανακαλύφθηκαν κάτω από αποκολλημένες επιστρώσεις σε κοντινή απόσταση με περιοχές όπου εντοπίστηκαν ρωγμές διάβρωσης λόγω τάσης.

3.3.2 Επιπτώσεις στους αγωγούς μεταφοράς

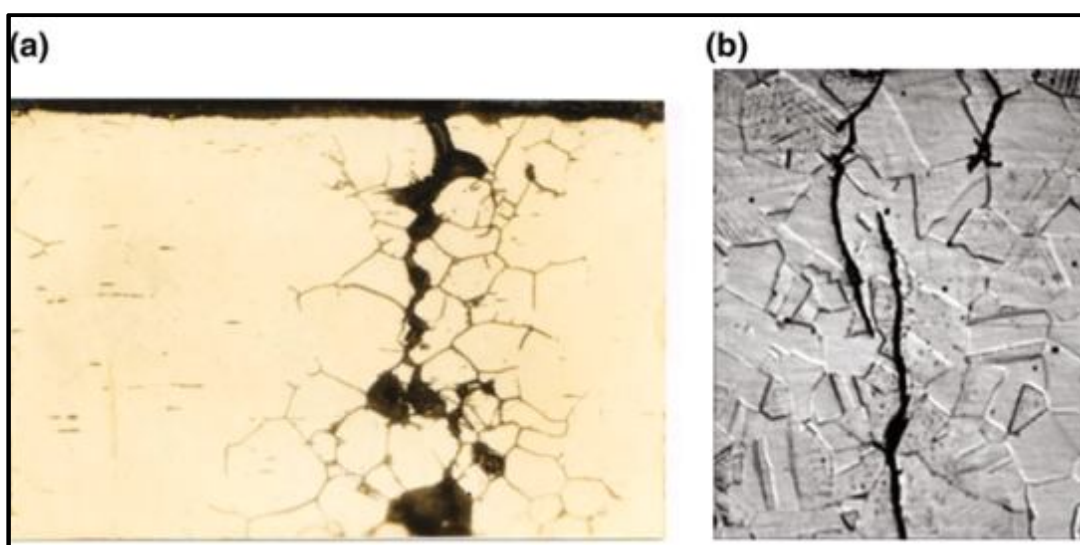
Η ρηγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό τάση είναι φαινόμενο που εμφανίζεται ως αποτέλεσμα των συνδυασμένων επιδράσεων της εφελκυστικής τάσης και της έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η ρηγμάτωση στο μέταλλο βρίσκεται εντός του εύρους που οριοθετείται από την ξηρή ρηγμάτωση και το κατώφλι κόπωσης⁵ του εν λόγω υλικού. Οι εφελκυστικές τάσεις μπορούν να εκδηλωθούν είτε ως άμεσα εφαρμοζόμενες τάσεις είτε ως παραμένουσες τάσεις στο μέταλλο. Οι παραμένουσες τάσεις προκαλούνται κυρίως μέσω διαδικασιών κατασκευής, όπως η ψυχρή παραμόρφωση και διαμόρφωση, η συγκόλληση, η θερμική επεξεργασία, η μηχανική κατεργασία και η λείανση, ενώ η σημασία αυτών των τάσεων συχνά υποτιμώνται. Οι παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν από τις διεργασίες συγκόλλησης έχουν τείνουν να προσεγγίζουν το όριο διαρροής. Η συσσώρευση υποπροϊόντων διάβρωσης σε κλειστές περιοχές μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μηχανικές τάσεις και σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Η ρηγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό τάση εκδηλώνεται συνήθως σε συγκεκριμένους συνδυασμούς κραμάτων, περιβάλλοντος και συνθηκών καταπόνησης. Ειδικότερα, η έρευνα έχει αποδείξει ότι η εμφάνιση αυτού του είδους διάβρωσης σε κράματα αλουμινίου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό των κόκκων του μεταλλικού πλέγματος.

Συνήθως, ένα σημαντικό τμήμα της επιφάνειας παραμένει ανεπηρέαστο, ενώ λεπτές ρωγμές διαπερνούν το μέταλλο. Εντός της μικροδομής, οι ρωγμές μπορεί να παρουσιάζουν είτε ενδοκοκκική είτε διακοκκική μορφολογία. Στο τέλος της παραγράφου στην Εικόνα 3.11, παρατίθενται ενδεικτικές απεικονίσεις των δυο αυτών μορφών διάβρωσης. Από μακροσκοπική άποψη, οι ρωγμές παρουσιάζουν σημαντική ευθραυστότητα. Επιπλέον το είδος αυτό της διάβρωσης αποτελεί έναν από τους σοβαρότερους τύπους διάβρωσης όχι μόνο λόγω των καταστροφικών

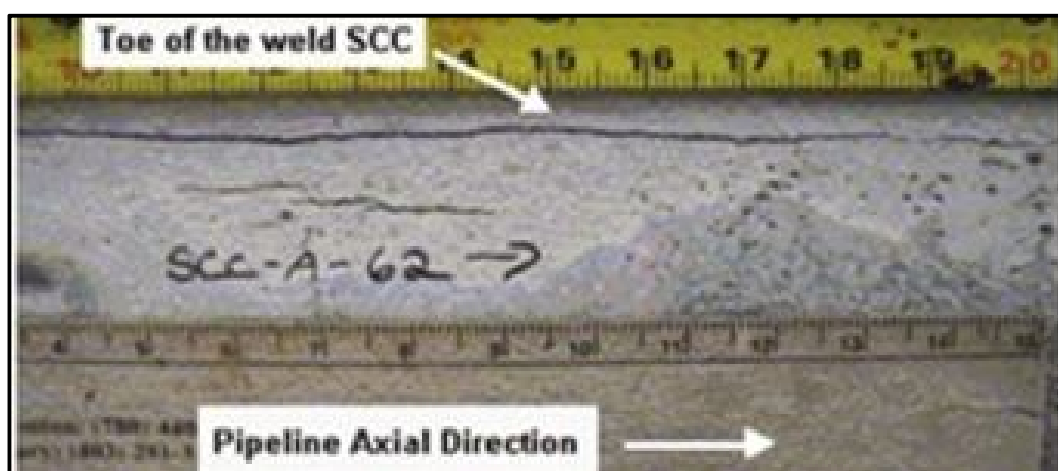
⁵ **Κατώφλι Κόπωσης**: Με τον όρο αυτό περιγράφεται η διαδικασία όπου προοδευτικά επέρχονται μόνιμες αλλαγές στη δομή του μετάλλου αρχικά στη μικροσκοπική και μετέπειτα στη μακροσκοπική του δομή. Στο οριακό αυτό σημείο προκαλούνται ρωγμές που σταδιακά αυξάνονται και είναι τελικά υπεύθυνες για την αστοχία ή την θραύση του (Wikipedia).

αποτελεσμάτων αλλά και πολλές φορές εκδηλώνεται χωρίς προηγούμενη προειδοποιητική ένδειξη αστοχίας. Στο τέλος της παραγράφου στην Εικόνα 3.12, παρατίθεται τυπική περίπτωση διάβρωσης υπό τάση.

Στην βιομηχανία, τα υλικά που επιλέγονται για την υψηλή αντοχή τους είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε προβλήματα ρωγμών διάβρωσης όταν εκτίθενται σε συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες που θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητά τους. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι ευάλωτοι και παρουσιάζουν ευπάθεια στην παρουσία ιόντων χλωρίου, ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις. Έχει πλέον εμπεδωθεί ότι οι ανοξειδωτοι χάλυβες δεν είναι αδιαπέραστοι από τη διάβρωση και μπορούν να παρουσιάσουν αυξημένη ευπάθεια σε τοπικές βλάβες λόγω αυτού του είδους διάβρωσης (Ossai, 2014; Lahiri, 2017; Cernova, 2015; Roberge, 2000; Winston, 2008; Baker, 2004).



Εικόνα 3.11: Τυπικές μορφές (a) Ενδοκοκκικής και (b) Διακοκκικής ρηγμάτωσης ανοξειδωτου χάλυβα (Lahiri, 2017)



Εικόνα 3.12: Τυπική περίπτωση διάβρωσης υπό τάση (Lahiri, 2017)

3.4 Άλλοι τύποι Διάβρωσης

Το φαινόμενο της διάβρωσης, λόγω της ευρύτητας και του πολυπαραγοντικού χαρακτήρα που παρουσιάζει ως αντικείμενο επιστημονικής μελέτης, μπορεί να ταξινομηθεί λαμβάνοντας υπόψη

διαφορετικά κριτήρια. Σε προηγούμενες ενότητες της παρούσας εργασίας έγινε εκτενείς αναφορά στις τρεις βασικότερες μορφές διάβρωσης οι οποίες απασχολούν τα υπόγεια δίκτυα μεταφοράς ΦΑ. Εκτός των ανωτέρω, παρακάτω καταγράφονται:

A. Είδη Διάβρωσης ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν

- [1]. Ηλεκτροχημική διάβρωση (electrochemical corrosion): Το είδος της διάβρωσης που συναντάται συχνότερα είναι αυτό που χαρακτηρίζεται από την παρουσία δυναμικού μεταξύ ενός μετάλλου και του περιβάλλοντος, καθώς και την παρουσία τοπικών γαλβανικών στοιχείων στην επιφάνεια του μετάλλου με διαφορετικό δυναμικό. Ένα χαρακτηριστικό της ηλεκτροχημικής πορείας αυτής της διάβρωσης είναι η μεταφορά φορτίων, όπως ιόντων και ηλεκτρονίων, μέσω της οριακής επιφάνειας του μετάλλου προς το διαβρωτικό περιβάλλον, καθώς και η δημιουργία διαφοράς δυναμικού και ροής ρεύματος.
- [2]. Μηχανική διάβρωση (Mechanical Corrosion): Με καθαρά μηχανικό τρόπο και συγκεκριμένα με την τριβή προκαλείται φθορά της επιφάνειας με απομάκρυνση ποσοτήτων μετάλλου.
- [3]. Χημική διάβρωση (Chemical Corrosion): Στην περίπτωση αυτή γίνεται προσβολή του μετάλλου και αλλοίωση της επιφάνειας λόγω χημικών αντιδράσεων. Κύριο χαρακτηριστικό της μορφής αυτής διάβρωσης είναι ότι η οξειδοαναγωγική δράση με την αντίστοιχη μετακίνηση των ηλεκτρονίων. Βάση των συνθηκών μπορεί να εξελιχθεί σε ηλεκτροχημική αντίδραση, γι' αυτό και η διάκρισή τους είναι δύσκολη. Το αποτέλεσμα της χημικής διάβρωσης είναι συνήθως η ομοιόμορφη απομείωση της επιφάνειας του μετάλλου.
- [4]. Βιολογική διάβρωση MIC: έχει προηγηθεί αναλυτική αναφορά στην Παράγραφο 3.2.
- [5]. Προσβολή από H₂ HIC: έχει προηγηθεί αναλυτική αναφορά στην Παράγραφο 3.1.

B. Είδη Διάβρωσης ανάλογα με την Μορφή Εμφάνισης

- [1]. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (Uniform Corrosion or General Corrosion): Αποτελεί το πιο κοινό είδος διάβρωσης. Κύριο χαρακτηριστικό είναι η χημική ή ηλεκτροχημική δράση που προχωρά ομοιόμορφα στο σύνολο της επιφάνειας, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ομοιόμορφου και περίπου ισοπαχούς στρώματος προϊόντος διάβρωσης, ενώ τα προϊόντα διάβρωσης παραμένουν στην επιφάνεια. Εμφανίζεται συνήθως όταν το μέταλλο είναι σε επαφή με οξύ ή διάλυμα, αλλά και σε ξηρή ατμόσφαιρα.
- [2]. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion): Πρόκειται για τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης ή για πιο εκλεκτική τοπική διάβρωση. Σε αυτό το είδος διάβρωσης αναπτύσσεται τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης. Υπάρχουν πολλές αιτίες ανάπτυξης αυτού του είδους διάβρωσης όπως η διαφορά συγκέντρωσης O₂, θερμοκρασίας, ταχύτητα ροής και γενικότερα κάθε διαφορά που εμφανίζεται στις συνθήκες του περιβάλλοντος.
- [3]. Διάβρωση χαραγής (Crevice Corrosion): Μια υφιστάμενη σχισμή στη μεταλλική επιφάνεια μπορεί να αποτελέσει συχνά αιτία έντονης εντοπισμένης διάβρωσης χαραγής. Ο βασικός

μηχανισμός είναι ουσιαστικά ο ίδιος όπως στη γαλβανική διάβρωση αλλά στην περίπτωση της διάβρωσης χαραγής η κατευθυντήρια δύναμη είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των περιοχών του ίδιου του μετάλλου που εκτίθεται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και όχι τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων που εκτίθενται στο ίδιο περιβάλλον.

- [4]. Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (Galvanic or Bimetallic Corrosion): Μεταξύ δύο σε επαφή ανόμοιων μετάλλων που βρίσκονται σε διαβρωτικό ή γενικά αγώγιμο περιβάλλον υφίσταται διαφορά δυναμικού που προκαλεί ροή ηλεκτρονίων. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης του λιγότερο ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου (άνοδος) και την ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού (κάθοδος). Αυτή η μορφή διάβρωσης επιτίθεται συνήθως στα σημεία σύνδεσης των μετάλλων.
- [5]. Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular Corrosion): Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι αρκετά διαδεδομένος τρόπος υποβάθμισης του μετάλλου που παρατηρείται στα κράματα όταν εκτίθενται σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Εμφανίζεται στα όρια του κρυσταλλικού πλέγματος των μεταλλικών κόκκων, όπου σχηματίζονται τοπικά γαλβανικά στοιχεία.
- [6]. Εκλεκτική προσβολή (Selective attack, leaching): Εκλεκτική διάβρωση είναι η απομάκρυνση ενός μόνο στοιχείου από ετερογενές στερεό κράμα. Εμφανίζεται μόνο σε κράματα όπου δύο ή περισσότερα μέταλλα δημιουργούν στερεό διάλυμα. Κατά τη διαβρωτική διαδικασία, διαλύεται μόνο το λιγότερο ευγενές μέταλλο, ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή αλλά με μεγάλη μείωση της μηχανικής του αντοχής. Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων εξαρτάται από τη σύνθεσή τους και αυξάνει με τη συγκέντρωση του ευγενέστερου συστατικού.
- [7]. Ρηγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (SCC): έχει προηγηθεί αναλυτική αναφορά στην Παράγραφο 3.3.

Γ. Τύποι διάβρωσης που επηρεάζονται από μηχανικούς παράγοντες

- [1]. Βιολογική ή Μικροβιακή Διάβρωση (MIC): έχει προηγηθεί αναλυτική αναφορά στην Παράγραφο 3.2.
- [2]. Ατμοσφαιρική διάβρωση (Atmospheric Corrosion): Οι κυριότεροι παράγοντες με την μεγαλύτερη επιρροή στη διαβρωτική ικανότητα της ατμόσφαιρας είναι ο χρόνος έκθεσης των επιφανειών στην υγρασία, το ποσοστό χλωριούχων και το ποσοστό των βιομηχανικών ρύπων. Λόγω παρουσίας O_2 η διάβρωση των περισσότερων μετάλλων στα ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα υπό την παρουσία ηλεκτρολύτη, επιταχύνουν την ανάπτυξη και εξάπλωση του φαινομένου.
- [3]. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής (Stray Current Corrosion): Η διαδικασία της διάβρωσης μπορεί να επιταχυνθεί από την παρουσία πηγών συνεχούς ρεύματος που παράγουν ρεύματα γείωσης. Το φαινόμενο του διαφυγόντος ρεύματος προσπίπτουν πολλές φορές στην επιφάνεια

των υπόγειων αγωγών, πυροδοτώντας φαινόμενα διάβρωσης. (Perez, 2016; Κωνσταντινίδης, 2013; Υφαντής, 2008).

3.5 Στοιχεία από τη Διεθνή Εμπειρία

3.5.1 Στοιχεία από την Ευρώπη

Εκτός της διάβρωσης με τα γνωστά καταστρεπτικά αποτελέσματα, εντοπίζονται επιπλέον και άλλου είδους αστοχίες, η αντιμετώπιση των οποίων στο σύνολό τους αποτελούν πρωταρχική σημασία για τη βιομηχανία του ΦΑ. Στα πλαίσια καταγραφής και παρακολούθησης των αστοχιών των συστημάτων μεταφοράς ΦΑ, έχει δημιουργηθεί μια ομάδα δεκαπέντε μεγάλων διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς ΦΑ στη Δυτική Ευρώπη, η λεγόμενη Ευρωπαϊκή Ομάδα Δεδομένων Περιστατικών Αγωγών Φυσικού Αερίου (EGIG: European Gas Pipeline Incident Data Group). Έργο της ομάδας αυτής είναι η συλλογή δεδομένων που αφορά τις προαναφερθείσες αστοχίες που καταγράφονται διαχρονικά στα συστήματα μεταφοράς ΦΑ στη Δυτική Ευρώπη και λειτουργεί από το 1982. Η συγκέντρωση των στοιχείων αυτών αποσκοπεί στην δημιουργία μιας ευρείας βάσης δεδομένων για στατιστική χρήση, δίνοντας μια πιο ρεαλιστική εικόνα της συχνότητας και πιθανότητας εμφάνισης των συμβάντων. Σημειώνεται ότι από τον Οκτώβριο του 2023 και ο ΔΕΣΦΑ (Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου) συμμετέχει στην ομάδα αυτή.

Σύμφωνα με την ενδέκατη (11^η) Αναφορά, την τελευταία στην σειρά η οποία έχει εκδοθεί από τον Δεκέμβριο του 2020, προκύπτουν ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία και παρατίθενται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Για την καλύτερη κατανόηση των στατιστικών στοιχείων που ακολουθούν, καταγράφονται ορισμένες παραδοχές και προσδιορισμοί που έχουν γίνει για τα στοιχεία αυτά. Πιο συγκεκριμένα η Αναφορά θεωρεί για:

Τα μεγέθη των διαρροών:

- Μικρή Οπή: διάμετρος της οπής μικρότερη ή ίση με 2cm
- Οπή: διάμετρος της οπής μεγαλύτερη από 2cm και μικρότερη από τη διάμετρο του αγωγού
- Ρωγμή: διάμετρος μεγαλύτερη από τη διάμετρο του αγωγού

Τις Εξωτερικές παρεμβολές:

- Δραστηριότητες που προκάλεσαν το συμβάν (π.χ. εκσκαφές, πασσαλόμπηξη, εργασίες πεδίου).
- Ο εξοπλισμός που εμπλέκεται στο συμβάν (π.χ. μπουλντόζα, εκσκαφέας).
- Τα εγκατεστημένα προστατευτικά μέτρα (π.χ. περίβλημα, μανδύες).

Τη Διάβρωση:

- Τοποθεσία εμφάνισης (π.χ. εσωτερική, εξωτερική, άγνωστης αιτίας).
- Είδος (π.χ. γενική, διάβρωση, ρωγμές).

Την Αστοχία Κατασκευής / Υλικού:

- Το είδος της αστοχίας (λόγω κατασκευής ή υλικού).
- Οι λεπτομέρειες της αστοχίας (π.χ. σκληρό σημείο, πλαστικοποίηση, συγκόλληση στο πεδίο ή άγνωστο).
- Ο τύπος του στοιχείου του αγωγού (π.χ. ευθεία, καμπύλη πεδίου).

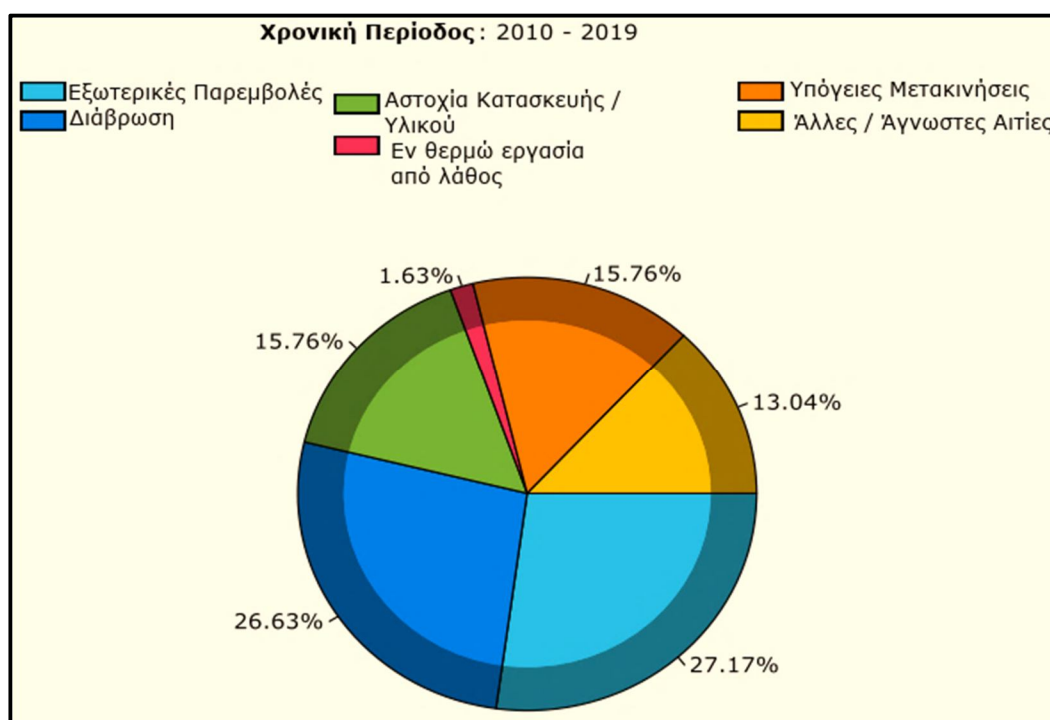
Τις Υπόγειες Μετακινήσεις:

- Το είδος της κίνησης στο έδαφος (π.χ. θραύση αναχώματος, διάβρωση, πλημμύρα, κατολίσθηση, εξόρυξη, διάβρωση της κοίτης του ποταμού, διάβρωση της όχθης του ποταμού ή άγνωστο).

Άλλες και Άγνωστες αιτίες:

- Τα επιμέρους αίτια, όπως σφάλματα σχεδιασμού, φυσικές καταστροφές(π.χ. κεραυνοί) και σφάλμα λόγω αστοχίας συντήρησης.

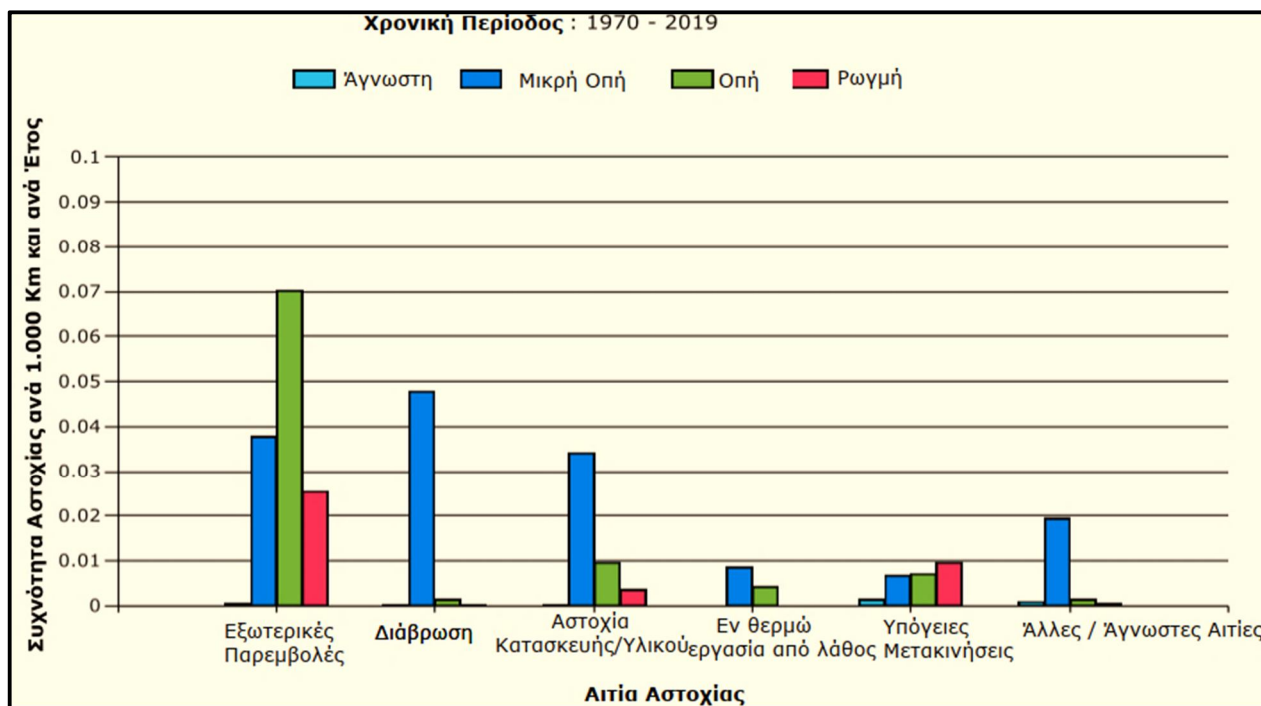
Σύμφωνα με την εν λόγω Αναφορά και πιο συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 3.1, για τη χρονική περίοδο από το 2010 έως το 2019, καταγράφονται τα ποσοστά κατανομής συμβάντων σε υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ αναλόγως των αιτιών εκδήλωσης.



Διάγραμμα 3.1: Κατανομή Συμβάντων ανά αίτια εκδήλωσης των συμβάντων (EGIG, 2020)

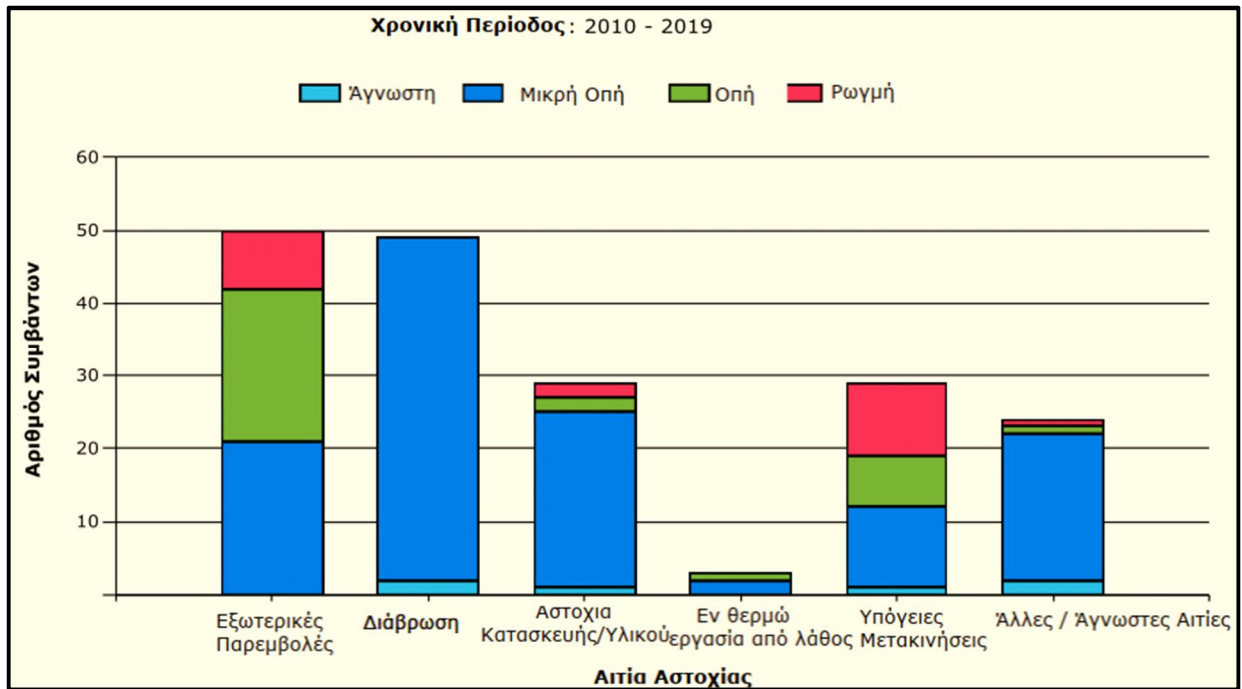
Είναι ξεκάθαρο τα τελευταία δέκα χρόνια, οι εξωτερικές παρεμβολές, η διάβρωση, οι αστοχίες στην κατασκευή και υλικών καθώς και οι Υπόγειες Μετακινήσεις αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των αστοχιών στους αγωγούς μεταφοράς. Σύμφωνα με την Αναφορά το φαινόμενο της διάβρωσης δεν κατέχει την πρωτιά στα γενεσιουργά αίτια πρόκλησης συμβάντων.

Στο Διάγραμμα 3.2 για την χρονική περίοδο από το 1970 έως το 2019, καταγράφεται η συχνότητα(περιστατικά ανά 1.000km και έτος) εμφάνισης αστοχιών σε σχέση με το μέγεθος διαρροής και των αιτιών εκδήλωσης. Επίσης η γενική τάση στην κατανομή των μεγεθών διαρροής παρέμεινε η ίδια. Δηλαδή η διαρροή κατά κύριο εμφανίζεται με την μορφή μικρών ή μεγαλύτερων οπών και αισθητά σε μικρότερη συχνότερη με τη μορφή ρωγμών. Οι εξωτερικές παρεμβολές προκαλούν κατά κύριο λόγο οπές και σημαντικό αριθμό ρωγμών. Παράλληλα η διάβρωση στατιστικά οφείλεται για την εμφάνιση σχεδόν αποκλειστικά μικρών οπών.



Διάγραμμα 3.2: Συχνότητα εμφάνισης αστοχιών σε σχέση με το μέγεθος διαρροής και των αιτιών εκδήλωσης (EGIG, 2020)

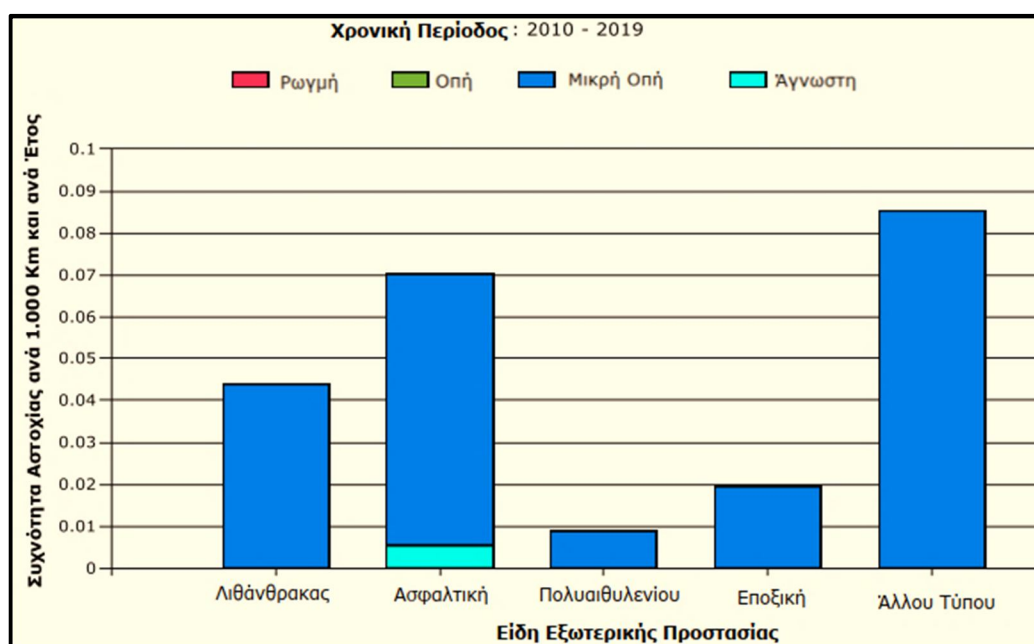
Στο Διάγραμμα 3.3 για την χρονική περίοδο από το 2010 έως το 2019, καταγράφεται ο αριθμός συμβάντων ανά αιτία εμφάνισης αστοχιών.



Διάγραμμα 3.3: Αριθμός συμβάντων ανά αιτία εμφάνισης (EGIG, 2020)

Είναι σαφές ότι τα συμβάντα λόγω διάβρωσης και εξωτερικών παρεμβολών, αποτελούν τα πιο συχνά αίτια εμφάνισης των συμβάντων. Ωστόσο, τα συμβάντα λόγω διάβρωσης δεν οδηγούν πάντα σε ρωγμές, αλλά ως επί το πλείστον σε μικρές οπές. Τέλος τα συμβάντα λόγω υπόγειων μετακινήσεων του εδάφους μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές λόγω παρουσίας μεγάλων δυνάμεων που απελευθερώνονται στην επιφάνεια των αγωγών.

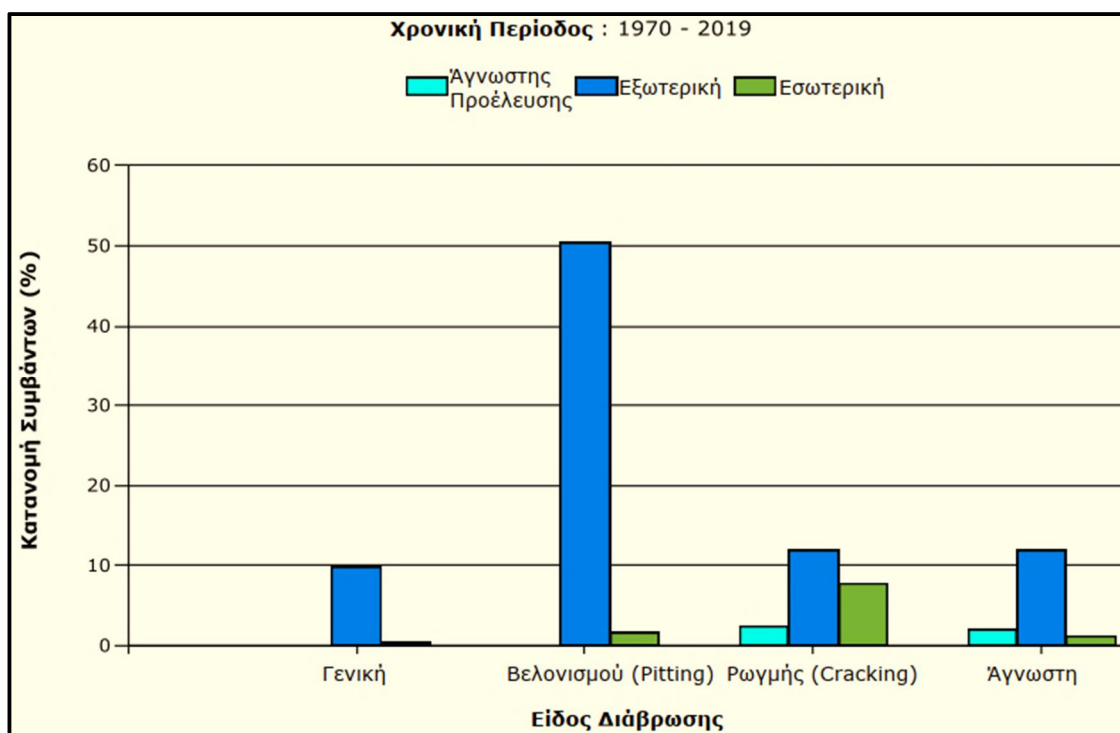
Στο Διάγραμμα 3.4 για την χρονική περίοδο από το 2010 έως το 2019, καταγράφεται η συχνότητα (περιστατικά ανά 1.000km αγωγού και έτος) εμφάνισης αστοχιών σε σχέση με το είδος της εξωτερικής προστασίας (μόνωσης) των αγωγών.



Διάγραμμα 3.4: Συχνότητα εμφάνισης αστοχιών σε σχέση με το είδος εξωτερικής προστασίας (EGIG, 2020)

Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρείται ότι εκτός των μικρών οπών δεν εμφανίζεται σχεδόν ποτέ άλλου είδους αστοχία. Επίσης οι ανθεκτικές επιστρώσεις αγωγών φαίνεται να είναι αυτή του πολυαιθυλενίου και η εποξική με τα χαμηλότερα ποσοστά εμφάνισης αστοχιών.

Τέλος στο Διάγραμμα 3.5 για την χρονική περίοδο από το 1970 έως το 2019, καταγράφεται η Κατανομή Συμβάντων ανά είδος διάβρωσης και το σημείο εμφάνισής της. Είναι ξεκάθαρο ότι η εξωτερική διάβρωση ευθύνεται κατεξοχήν για τα συμβάντα που εμφανίζονται, ανεξαρτήτως του είδους αστοχίας. Επίσης τα υψηλότερα ποσοστά συμβάντων οφείλονται στην διάβρωση τύπου βελονισμού και τις ρωγμές. Τέλος η εξωτερική διάβρωση σε σχέση με την εσωτερική προκαλεί πολλαπλάσια συμβάντα (EGIG, 2020).



Διάγραμμα 3.5: Κατανομή Συμβάντων ανά είδος διάβρωσης (EGIG, 2020)

3.5.2 Στοιχεία από την Αμερική

Μια εξίσου σημαντική βάση δεδομένων προέρχεται από την Υπηρεσία Ασφάλειας Αγωγών και Επικίνδυνων Υλικών (PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration) του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ. Αποστολή της υπηρεσίας αυτής είναι να προστατεύει τους ανθρώπους και το περιβάλλον προωθώντας την ασφαλή μεταφορά ενέργειας και άλλων επικίνδυνων υλικών του κλάδου της Χημικής Βιομηχανία. Τα δεδομένα αφορούν τα συμβάντα που εκδηλώθηκαν στους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ για την περίοδο από το 2002 έως το 2020.

Για την καλύτερη κατανόηση των στατιστικών στοιχείων που ακολουθούν, καταγράφονται ορισμένες παραδοχές που έχουν γίνει από τους δημιουργούς της βάσης δεδομένων και αφορά την οριοθέτηση των αιτιών αστοχιών που παρατίθενται. Πιο συγκεκριμένα η Αναφορά θεωρεί για:

- [1]. Τις άλλες αιτίες
 - Αιτίες που δεν σχετίζονται με τις υποκατηγορίες αναφοράς
- [2]. Τη διάβρωση
 - Εξωτερική
 - Εσωτερική
 - Χωρίς να έχει καθοριστεί
- [3]. Τις εκσκαφές
 - Κατά την διάρκεια εγκατάστασης του αγωγού
 - Κατά την διάρκεια συντηρήσεων
 - Από λάθος περιοίκων
- [4]. Την λάθος λειτουργία
 - Λάθος Λειτουργία χειριστών μηχανημάτων
 - Λάθος στην εγκατάσταση εξοπλισμού
 - Υπερχείλιση εξοπλισμού
 - Άλλες λάθος ενέργειες στην φάση της λειτουργίας
- [5]. Την αστοχία υλικών / συγκόλλησης
 - Τραυματισμός σωληνοαγωγών
 - Ελλαττωματικά σωληνουλικά(εξαρτήματα)
 - Ρωγμές λόγω φυσικών φαινομένων
 - Αστοχίες συνδέσεων αγωγών
 - Αστοχίες υπόλοιπου εξοπλισμού (π.χ βανοστάσια, συμπιεστές)
- [6]. Τις φυσικές καταστροφές
 - Σεισμικές Δονήσεις
 - Ακραία καιρικά φαινόμενα
- [7]. Τις άλλες εξωτερικές καταστροφές
 - Ηλεκτρικές παρεμβολές
 - Πυρκαγιά
 - Τρομοκρατικές ενέργειες

Στο Διάγραμμα 3.6 για την χρονική περίοδο από το 2003 έως το 2022, καταγράφονται τα ποσοστά αστοχιών σε σχέση με τις αιτίες που έχουν προκληθεί.



Διάγραμμα 3.6: Συμβάντα ανά αιτία πρόκλησης για την περίοδο 2003-2022 (PHMSA, 2023)

Στην πρώτη θέση των αιτιών με διαφορά, βρίσκεται η αστοχία υλικών και συγκολλήσεων, με δεύτερη τη διάβρωση. Ακολουθούν ως αιτίες αστοχιών τα λάθη στην λειτουργία και οι εκσκαφές. Στην κατανομή αυτή συνηγορούν και τα στοιχεία από την βάση δεδομένων της EGIG (Διαγράμματα 3.1 και 3.2). Επίσης στο Διάγραμμα 3.7 που ακολουθεί καταγράφονται τα συμβάντα ανά είδος διάβρωσης για την περίοδο 2003-2009. Φαίνεται ότι η εσωτερική διάβρωση υπερτερεί της εξωτερικής ως βασική αιτία πρόκλησης συμβάντων. Επίσης για την περίοδο από το 2003 έως το 2009, καταγράφεται σημαντικός αριθμός διαβρώσεων (10%) χωρίς διαχωρισμό για το εάν πρόκειται για περιπτώσεις λόγω εσωτερικής ή εξωτερικής διάβρωσης (PHMSA, 2023).

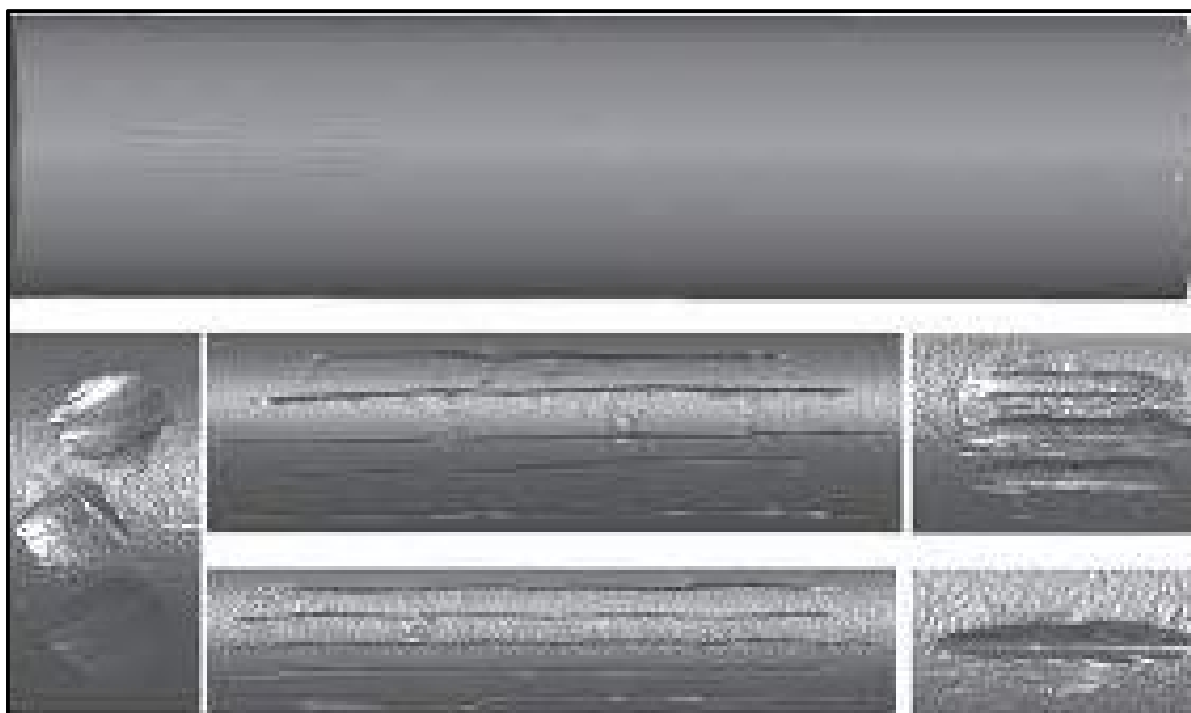


Διάγραμμα 3.7: Συμβάντα ανά είδος διάβρωσης για την περίοδο 2003-2009 (PHMSA, 2023)

3.6 Τύποι και Κατηγορίες Αστοχιών

Οι αγωγοί ως γνωστόν σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σύμφωνα με κανόνες και αυστηρά πρότυπα, ώστε να διασφαλίζεται στο μέγιστο δυνατό η ορθή λειτουργία και ακεραιότητά τους. Παρά ταύτα εμφανίζονται σε πολλές περιπτώσεις σφάλματα ή αστοχίες οφειλόμενα σε ένα ευρύτατο φάσμα γενεσιουργών αιτιών. Ο χρόνος, το περιβάλλον και ο ανθρώπινος παράγοντας είναι μερικές από τις κυριότερες αιτίες των αστοχιών. Στην παρούσα φάση γίνεται σύντομη αναφορά στους πιο συχνά εμφανιζόμενους τύπους αστοχιών στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ.

- [1]. Απώλεια μετάλλου του Αγωγού (metal loss): Οι αστοχίες λόγω απώλειας μετάλλου εμφανίζονται όταν το τοίχωμα του σωλήνα λεπταίνει λόγω εσωτερικής ή εξωτερικής διάβρωσης. Η εξωτερική διάβρωση αποτελεί μια από τις κύριες απειλές για την ακεραιότητα ενός αγωγού. Οι αγωγοί είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν σε εσωτερικές πιέσεις πολύ υψηλότερες από την πίεση λειτουργίας τους. Η λεγόμενη "πίεση σχεδιασμού" είναι παράγοντας που καθορίζει το πάχος του τοιχώματος του σωληνοαγωγού. Καθώς το μέταλλο υποχωρεί από το τοίχωμα του σωλήνα, το πάχος του τοιχώματος μειώνεται σταδιακά, μειώνοντας παράλληλα και την "πίεση σχεδιασμού". Αυτό συμβαίνει συνήθως στο κάτω μέρος του σωλήνα και σε χαμηλά σημεία του αγωγού, όπου τα ιζήματα και το H₂O μπορούν να καθιζάνουν από το μεταφερόμενο προϊόν. Ενδεικτικές περιπτώσεις απώλειας μετάλλου απεικονίζονται στην Εικόνα 3.13 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.13: Ενδεικτικές περιπτώσεις απώλειας μετάλλου (Gopal, 2020)

- [2]. Ρωγμές (Cracks): Οι ρωγμές είναι επίπεδες ασυνέχειες στον αγωγό που προκαλείται από μια γραμμική ρήξη, η οποία συνήθως ορίζεται από το μήκος, το βάθος και την ακτίνα της ρίζας

της και εμφανίζονται είτε στο σώμα του αγωγού ή και σε σημεία όπου τμήματα του σωλήνα συγκολλούνται μεταξύ τους. Οι μηχανικές βλάβες προερχόμενες από τις ρωγμές, είναι από τις πιο συχνές αστοχίες. Οι αιτίες πρόκλησης μπορεί να είναι η διάβρωση, ο ανθρώπινος παράγοντας ή και περιβαλλοντικές συνθήκες. Για την περίπτωση ρωγμών λόγω διάβρωσης έχει προηγηθεί εκτενείς αναφορά στην Παράγραφο 3.3 της εργασίας. Ενδεικτικές περιπτώσεις ρωγμών απεικονίζονται στην Εικόνα 3.14 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.14: Ρωγή σε αγωγό μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020)

- [3]. Χτυπήματα και Βαθουλώματα (Dents & Gouges): Τα χτυπήματα και τα βαθουλώματα προκαλούνται συνήθως από τον βαρύ εξοπλισμό που εκτελεί εργασίες στο πεδίο κοντά στον αγωγό και μπορούν επίσης να προκληθούν από πέτρες που έρχονται σε επαφή με το τοίχωμα του σωλήνα. Οποιαδήποτε παραμόρφωση του τοιχώματος του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του προφίλ πίεσης στη θέση της παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα την πιθανότητα αστοχίας του αγωγού. Επίσης οι μηχανικές βλάβες αυτού του τύπου καταστρέφουν πολλές φορές τις επιστρώσεις των αγωγών επιταχύνοντας φαινόμενα διάβρωσης. Ενδεικτικές περιπτώσεις Χτυπημάτων και Βαθουλωμάτων απεικονίζονται στις Εικόνες 3.15 και 3.16 που ακολουθούν.

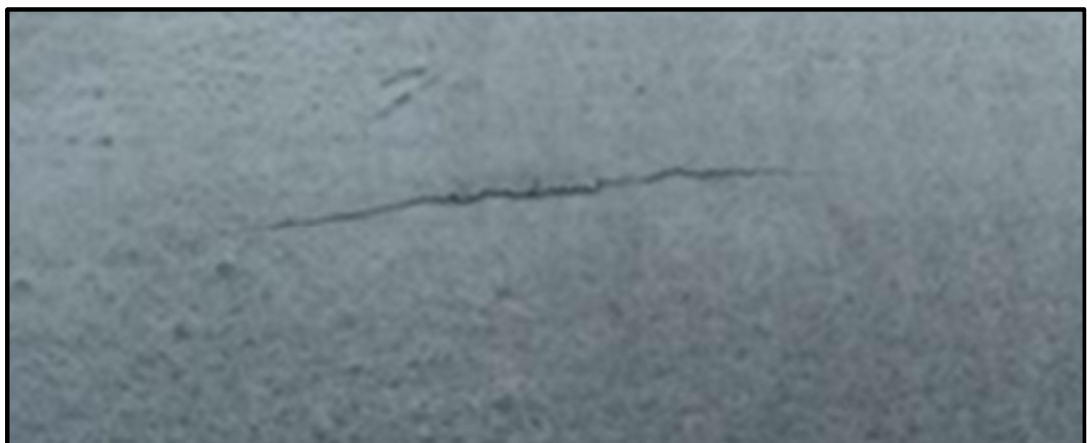


Εικόνα 3.15: Χτύπημα σε αγωγό μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020)



Εικόνα 3.16: Βαθούλωμα σε αγωγό μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020)

- [4]. Κατασκευαστικές αστοχίες (Manufacturing Defects): Με τον όρο "κατασκευαστική αστοχία" καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα αστοχιών στο σώμα του σωλήνα (ελάσματα, εγκλείσματα, ραφές, εγχοπές, χτυπήματα, κ.λπ.). Κατά συνέπεια, δεν είναι πάντα εύκολο μια δεδομένη αστοχία να χαρακτηριστεί ως κατασκευαστική αστοχία ή απώλεια μετάλλου ή και ρωγμή. Ενδεικτική περίπτωση κατασκευαστικής αστοχίας απεικονίζεται στην Εικόνα 3.17 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.17: Κατασκευαστική αστοχία στο σώμα αγωγού μεταφοράς ΦΑ (Gopal, 2020)

- [5]. Αστοχία Συγκόλλησης (Welding Defect): Οι μεταλλουργικές, φυσικές και χημικές μεταβολές που προκαλούνται σημειακά, κατά την φάση της συγκόλλησης, είναι δυνατόν να προκαλέσουν αστοχίες. Είναι επίσης πιθανές περιπτώσεις ομοιόμορφης διάβρωσης στο μέταλλο βάσης και στο μέταλλο συγκόλλησης ή διάβρωσης του μετάλλου βάσης και μη επηρεασμού του μετάλλου συγκόλλησης. Προκαλείται επίσης μείωση της αντοχής στη διάβρωση, στο τόξο της συγκόλλησης, όταν δεν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα και δεν ακολουθούνται τα πρωτόκολλα που ορίζουν οι κώδικες. Ενδεικτική περίπτωση αστοχίας συγκόλλησης απεικονίζεται στην Εικόνα 3.18 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.18: Διάβρωση λόγω αστοχίας συγκόλλησης (Mwiks, 2020)

- [6]. Περιβαλλοντικές αστοχίες (Environmental Defects): Είναι μορφές αστοχιών που εκδηλώνονται στα συστήματα αγωγών μεταφοράς και ευθύνονται περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως οι ακραίες καιρικές συνθήκες, σεισμικά φαινόμενα ή και κατολισθήσεις. Οι αστοχίες λόγω καιρικών συνθηκών επιδρούν στους αγωγούς με πολλούς τρόπους προκαλώντας μηχανικές βλάβες και διαβρώσεις. Σε γενικές γραμμές οι σωληνώσεις μικρότερης διαμέτρου είναι πάντα πιο ευάλωτες λόγω του εγγενώς μικρότερου πάχους των τοιχωμάτων. Ενδεικτική περίπτωση αστοχίας(εκτεταμένη διάβρωση) λόγω καιρικών συνθηκών απεικονίζεται στην Εικόνα 3.19 που ακολουθεί (Gopal, 2020; Mwiks, 2020; Coshman, 2004; Vishnuvardhan, 2023; Palmer-Jones, 2008).



Εικόνα 3.19: Εκτεταμένη διάβρωση λόγω καιρικών φαινομένων (Gopal, 2020)

Οι αστοχίες μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν, με πιο πρακτική προσέγγιση σε δυο (2) μεγάλες κατηγορίες, αυτή της βλάβης με διαρροή και χωρίς διαρροή ΦΑ. Πιο συγκεκριμένα:

Βλάβη με διαρροή ΦΑ

- Ρήξη: Μετά από ρήξη του τοιχώματος του αγωγού, θα πρέπει άμεσα να διακοπεί η λειτουργία του και να επισκευαστεί με αντικατάσταση με τμήμα νέου σωλήνα. Επίσης αναλόγως της έκτασης της βλάβης και μετά από γνωμοδότηση των ειδικών υπάρχει η δυνατότητα να επισκευαστεί με ειδικό χιτώνιο τοποθετούμενο στο σημείο της αστοχίας. Η χρήση σφιγκτήρα διαρροής ως προσωρινή επισκευή μπορεί να εξεταστεί για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που θα τεθεί εκτός λειτουργίας.

Βλάβη χωρίς διαρροή ΦΑ

- Αστοχίες στην Εξωτερική Επίστρωση (coating): Οι ζημιές στα εξωτερικά τοιχώματα των σωλήνων επισκευάζονται με τη αντικατάσταση του τμήματος της κατεστραμμένης επίστρωσης, χωρίς την διακοπή λειτουργίας του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να απαιτηθεί μείωση της πίεσης του δικτύου πριν από την εφαρμογή της νέας επίστρωσης στα πλαίσια ασφάλειας των εργασιών επισκευής στην περιοχή.
- Μηχανική βλάβη: Οι μηχανικές βλάβες επισκευάζονται με τη χρήση συγκολλημένου χιτωνίου ή με την αποκοπή του κατεστραμμένου τμήματος.
- Μετατόπιση: Η μετατόπιση του αγωγού μπορεί να απαιτήσει την εμπλοκή και γνωμοδότηση συμβούλου για την υποβολή πρότασης αποκατάστασης προσαρμοσμένη στις ιδιαίτερες συνθήκες της βλάβης. Συνήθως απαιτείται αποκοπή και αντικατάσταση του τμήματος του αγωγού, με διακοπή της λειτουργίας του.

- Απώλεια στήριξης: Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η εγκατάσταση νέας στήριξης. Στην περίπτωση που έχει ταυτόχρονα πληγεί, θα πρέπει να αποκοπεί και να αντικατασταθεί τμήμα του αγωγού, με διακοπή της λειτουργίας του.

Οι εργασίες αυτές εμπεριέχουν δυο πολύ βασικά στοιχεία για τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς ΦΑ τα οποία είναι το κόστος αποκατάστασης και ο απαιτούμενος χρόνος αποκατάστασης στην περίπτωση που θα απαιτηθεί να διακοπεί η παροχή του προϊόντος προς τους πελάτες. Ως εκ τούτου η αποκατάσταση των αστοχιών σε αγωγούς ΦΑ είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και σοβαρή υπόθεση. Η δυσκολία έγκειται στο ότι τις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται υπό έντονη πίεση χρόνου, με τις απαιτούμενες προδιαγραφές εργασιών και υλικών να τηρούνται στο έπακρο, συνυπολογίζοντας τα κόστη από την τυχόν διακοπή της λειτουργίας του αγωγού. Επομένως οι αποφάσεις των διορθωτικών ενεργειών προκύπτουν εφόσον έχουν ληφθεί υπόψιν όλοι οι παράμετροι του προβλήματος.

3.7 Τεχνολογίες Επιθεώρησης

Σε συνέχεια της καταγραφής στοιχείων από την διεθνή εμπειρία τα οποία συναντώνται στα υπόγεια δίκτυα μεταφοράς ΦΑ στην παρούσα φάση παρατίθεται το πλαίσιο που αφορά τις επιθεωρήσεις. Δηλαδή οι έλεγχοι οι οποίοι διενεργούνται σε όλα τα στάδια, από την κατασκευή του σωληνοαγωγών μέχρι και την λειτουργία του δικτύου μεταφοράς ΦΑ. Ακολουθεί λεπτομερής αναφορά για τις επιθεωρήσεις αυτές ανά φάση υλοποίησης του έργου.

3.7.1 Στη φάση κατασκευής των σωληνοαγωγών

Πρώτο στάδιο είναι η κατασκευή των αγωγών από εξειδικευμένες εταιρείες της χαλυβουργίας. Οι αγωγοί ελέγχονται για να διασφαλιστεί ότι πληρούν τα βιομηχανικά πρότυπα σχεδιασμού και ασφάλειας καθώς και την κείμενη νομοθεσία. Σχεδιάζονται ειδικά για την προβλεπόμενη θέση εγκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές και τα δεδομένα του έργου, πριν ξεκινήσει η παραγωγική διαδικασία. Στη γραμμή παραγωγής πλέον οι επιθεωρήσεις και οι έλεγχοι οι οποίοι διενεργούνται από το πρώιμο στάδιο της επεξεργασίας του κράματος μετάλλου έως και την παράδοση των αγωγών στον εργολάβο, ενδεικτικά διενεργούνται:

[1]. Έλεγχος Πρώτων Υλών:

- Οπτικός έλεγχος πρώτων υλών κράματος μετάλλου
- Χημικές αναλύσεις κραμάτων μετάλλου

[2]. Επιθεώρηση & Δοκιμή Αγωγών:

- Έλεγχος εργασιών παραγωγής και συγκόλλησης
- Επιθεώρηση με υπερήχους της πλαστικοποίησης
- Διαστασιολογικοί έλεγχοι
- Έλεγχος πιστοποιητικών βαθμονόμησης των μηχανών εφελκυσμού και κρούσης

[3]. Δοκιμή Τελικού Προϊόντος Αγωγού:

- Χημική ανάλυση
- Δοκιμή εφελκυσμού για το βασικό μέταλλο και τη συγκόλληση
- Δοκιμή κρούσης για το βασικό μέταλλο και τη συγκόλληση
- Δοκιμές σκληρότητας
- Δοκιμή αντοχής στην κάμψη
- Δοκιμή πεπλατυσμού
- Έλεγχος θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας
- Βαθμονόμηση εξοπλισμού διενέργειας ελέγχων υπερήχου
- Επιθεώρηση με υπερήχους της ζώνης συγκόλλησης (ανά σωλήνα)
- Υδροστατικός έλεγχος (κάθε σωλήνα ξεχωριστά)
- Οπτικός έλεγχος όλων των παραμέτρων (κάθε σωλήνα ξεχωριστά)

[3]. Εφαρμογή στρώματος επίστρωσης προστασίας(μόνωση): Οι εφαρμοζόμενες επιστρώσεις προστασίας μπορούν να είναι διαφόρων τύπων. Μια από αυτές είναι η εποξειδική επίστρωση δύο συστατικών. Η εφαρμογή στον αγωγό πραγματοποιείται αφήνοντας τα άκρα χωρίς επίστρωση για να είναι δυνατή η συγκόλληση. Οι έλεγχοι στο στάδιο αυτό αφορούν ελέγχους:

- Οπτικούς για τυχόν αστοχίες
- Ομοιομορφίας της επίστρωσης
- Αντοχής στη διάβρωση
- Πρόσφυσης της επίστρωσης
- Έλεγχος Σκληρότητας της επίστρωσης
- Τραχύτητας της επίστρωσης

Βασικά πρότυπα και κώδικες που χρησιμοποιούνται στο στάδιο της κατασκευής παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Κωδικός	Ονομασία
EN 334	Gas pressure regulators for inlet pressures up to 100 bar
ISO 9712	Non-Destructive Testing. Qualification and certification of NDT personnel
ISO 16826	Non-Destructive Testing. Ultrasonic testing. Examination for discontinuities perpendicular to the surface
ISO 16810	Non-Destructive Testing – Ultrasonic Testing General principles
ISO 17638	Non-Destructive examination of welds. Magnetic particle examination of welds
ISO 17636-1	Non-Destructive testing of welds. Radiographic testing. X- and gamma-ray techniques with film
EN 1503-1	Valves Materials for bodies, bonnets and covers - Part 1: Steels specified in European standards
EN 10204	Inspection Documents for metallic products
ISO 3138	Petroleum and natural gas industries-Steel pipe for pipeline transportation systems

Πίνακας 3.1: Πρότυπα και Κώδικες στην φάση κατασκευής των αγωγών

(DESFA:DSF-SPC-QAC-005, 2021; DESFA:DSF-SPC-PIP-001, 2021; DESFA: DSF-SPC-PIP-002, 2021; DESFA:DSF-SPC-PIP-012, 2021; DESFA:DSF-SPC-PIP-006, 2021).

3.7.2 Στη φάση της εγκατάστασης των σωληνοαγωγών

Ακολούθως της κατασκευής, έπεται η εγκατάσταση των σωληνοαγωγών στο πεδίο από τον εγκαταστάτη εργολάβο. Στην φάση αυτή διενεργούνται έλεγχοι όπως αναφέρονται κάτωθι.

- [1]. Σχεδιασμός – Κανονιστική Συμμόρφωση: Στο στάδιο αυτό εξετάζεται όλο το κανονιστικό πλαίσιο στο οποίο υπάγεται το έργο. Παράλληλα συντελείται ο βασικός σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες τεχνικοοικονομικές συνιστώσες της επένδυσης και περιβαλλοντικά δεδομένα και περιορισμούς. Ως κύρια εξερχόμενα τις διεργασίας αυτής είναι:
 - Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές των αγωγών και του εξοπλισμού
 - Η όδευση του αγωγού
 - Οι επιβαλλόμενες επιθεωρήσεις ανά στάδιο κατασκευής και
 - Η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε)
- [2]. Προετοιμασία Πεδίου: Για την προετοιμασία της εγκατάστασης του αγωγού, πρέπει αρχικά να καθαριστεί η επιλεγμένη διαδρομή του αγωγού. Οι εργασίες ανέγερσης ενδέχεται να απαιτούν τη χρήση προσωρινών χώρων εργασίας που βρίσκονται εκτός του δικαιώματος διέλευσης. Εκτός των εργασιών καθαρισμού και διαμόρφωσης για την προετοιμασία της διαδρομής, διενεργούνται επιθεωρήσεις και έλεγχοι που αφορούν:
 - Τον έλεγχο της διαδρομής
 - Αναλύσεις υπεδάφους
 - Δοκιμαστικές τομές κ.α.
- [3]. Παράταξη αγωγών παράλληλα στην διαδρομή όδευσης: Στο στάδιο αυτά τα τμήματα του αγωγού μεταφέρονται από τον χώρο αποθήκευσης και τοποθετούνται κατά μήκος της διαδρομής διέλευσης. Οι έλεγχοι που διενεργούνται στο στάδιο αυτό συνοψίζονται σε:

- Έλεγχο του εξοπλισμού ανύψωσης και εκσκαφής (πιστοποιητικά, μητρώα συντήρησης κλπ.)
 - Επαλήθευση και επανέλεγχος των πιστοποιητικών των αγωγών
 - Οπτικό έλεγχος για την σωστό τάπωμα των ανοιχτών άκρων
 - Οπτικό έλεγχος για τυχόν ζημιές(χτυπήματα, βαθουλώματα κ.α.) στους αγωγούς
- [4]. Κάμψη αγωγών: Η κάμψη διενεργείται σε μεμονωμένα του αγωγούς προκειμένου να συνάδει με την διαδρομή η οποία έχει επιλεγεί. Η διαδικασία πραγματοποιείται με ειδικές μηχανές κάμψης και οι σχετικοί έλεγχοι που πραγματοποιούνται στο στάδιο αυτό είναι:
- Έλεγχος των σχεδίων για την επιλογή των τμημάτων που θα στεφθούνε
 - Συγκέντρωση δεδομένων σχετικά με την οριζόντια-κατακόρυφη απόκλιση που απαιτείται για την εκτέλεση εργασιών κάμψης
 - Οπτικοί και διαστασιολογικοί έλεγχοι πριν και μετά την κάμψη
 - Σήμανση, ιχνηλασιμότητα και υποβολή εκθέσεων
- [5]. Διάνοιξη τάφρων – Εκσκαφές: Κατά μήκος της οδού διέλευσης σκάβεται τάφρος σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουν προκύψει από την μελέτη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτούνται γεωτρήσεις και ελεγχόμενες ανατινάξεις για την απομάκρυνση μεγάλων βράχων και φυσικών εμποδίων. Κατόπιν οι σωληνοαγωγοί τοποθετούνται στην τάφρο, ευθυγραμμίζονται και είναι έτοιμα για τις συγκολλήσεις. Οι σχετικοί έλεγχοι που πραγματοποιούνται στο στάδιο αυτό είναι:
- Οπτικός έλεγχος της όδευσης πριν την έναρξη των εκσκαφών
 - Επιθεώρηση εκσκαφής της τάφρου (διαστασιολογικοί έλεγχοι)
- [6]. Συγκολλήσεις: Στη συνέχεια, οι σωληνοαγωγοί συγκολλούνται μεταξύ τους, χειροκίνητα ή με την βοήθεια ρομποτικών μηχανών συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις ελέγχονται βάση αυστηρών προδιαγραφών και λαμβάνονται οι σχετικές εγκρίσεις. Τα στάδια των ελέγχων που διενεργούνται όσον αφορά την φάση των συγκολλήσεων είναι τα ακόλουθα:
- Έλεγχος τεκμηρίωσης
 - Πιστοποίηση διαδικασιών συγκόλλησης
 - Ιχνηλασιμότητα συγκολλήσεων
 - Προετοιμασία χάρτη συγκολλήσεων
 - Οπτικός έλεγχος
 - Μη Καταστροφικές Δοκιμές (Οπτικός έλεγχος, Έλεγχοι υπερήχων και Έλεγχος Ραδιογραφιών)
 - Ανασκόπηση τεκμηρίωσης
 - Αξιολόγηση διαδικασιών συγκόλλησης
 - Έλεγχος αναλωσίμων και εξοπλισμού συγκόλλησης

- Καθαρισμός και προετοιμασία μετώπου συγκόλλησης
- Έλεγχος και δοκιμή σκληρότητας όπου απαιτείται.

[8]. Υδροστατικός Έλεγχος: Το στάδιο αυτό αποτελεί την σημαντικότερη δοκιμή στην οποία υπόκειται το δίκτυο του αγωγού. Τα βασικά ρευστά με τα οποία γεμίζει υπό πίεση ο αγωγός για την διενέργεια αυτής της δοκιμής, είναι ο αέρας ή το H₂O. Ωστόσο, οι μέθοδοι του υδροστατικού ελέγχου κατηγοριοποιούνται σε δύο τυποποιημένες κατηγορίες, την υδραυλική και πνευματική δοκιμή. Στην υδραυλική δοκιμή πίεσης χρησιμοποιείται H₂O ενώ, στην πνευματική μη εύφλεκτο αέριο ή ατμοσφαιρικός αέρας. Οι υδραυλικές δοκιμές παραμένουν ιδανικές για περιπτώσεις υψηλότερης πίεσης λόγω του σχετικά υψηλότερου βαθμού ασφάλειάς τους. Αντίθετα, η πνευματική δοκιμή παραμένει η καταλληλότερη μέθοδος για δοκιμές χαμηλότερων πιέσεων. Με τον παραπάνω έλεγχο διασφαλίζεται η απουσία διαρροών είτε λόγω προβλήματος στις συγκολλήσεις είτε λόγω αστοχίας υλικών ή εξοπλισμού (βάνες, κ.α.), δηλαδή ολοκληρώνεται η τελική πιστοποίηση και παραδίδεται ο αγωγός προς χρήση. Τα κύρια πρότυπα και κώδικες που εφαρμόζονται κατά την διάρκεια του υδροστατικού ελέγχου παρατίθενται στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί.

Κωδικός	Ονομασία
EN 1776	Gas supply systems - Natural gas measuring stations - Functional requirements
EN 12186	Gas supply systems - Gas pressure regulating stations for transmission and distribution Functional requirements
EU Directive 2014/68/EU	Pressure Equipment Directive (PED)
EN 1594	Gas supply systems - Pipelines for maximum operating pressure over 16 bar – Functional requirements
EN 13445	Unfired pressure vessels
ISO 9606-1	Qualification test of welders - Fusion welding
ISO 9863	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of thickness at specified pressures

Πίνακας 3.2: Πρότυπα και Κώδικες για τον Υδροστατικό έλεγχο

[9]. Εργασίες Επιχωμάτωσης: Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η επιχωμάτωση για την κάλυψη της τάφρου του αγωγού και περιλαμβάνει στρώση, επιχωμάτωση και επίχωση της τάφρου, καθώς και τοποθέτηση προειδοποιητικής ταινίας κατά μήκος της όδευσης του αγωγού. Τέλος η διαδικασία ολοκληρώνεται με το τελευταίο στάδιο της επιχωμάτωσης με την φυτική γη.

(DESFA:DSF-SPC-PIP-004, 2021; DSF-SPC-PIP-011,2021; DSF-SPC-PIP-012, 2021; DSF-SPC-PIP-013, 2021; DSF-SPC-PIP-014, 2021; DSF-SPC-PIP-015, 2021; DSF-SPC-PIP-016, 2021; DSF-SPC-PIP-017, 2021; DSF-SPC-PIP-022, 2021; DSF-SPC-PIP-023, 2021; DSF-SPC-CIV-005, 2021)

3.7.3 Στη φάση της Λειτουργίας του Έργου

Στο σημείο αυτό το έργο έχει πλέον παραδοθεί και έχει τεθεί σε λειτουργία. Οι τακτικοί έλεγχοι στους οποίους υπόκειται το εν λειτουργία τμήμα του υπόγειου αγωγού είναι:

- Έλεγχος της ορθής λειτουργίας και τον ενδείξεων της Καθοδικής Προστασίας
- Υπέργειος οπτικός έλεγχος της διαδρομής του αγωγού
- Έλεγχος λειτουργίας των βαλβιδοστασιών
- Εσωτερικός έλεγχος με τις ξεστροπαγίδες (έλεγχος συγκολλήσεων, τυχόν διαρροών, αστοχίες του μετάλλου, φαινόμενα διάβρωσης κλπ.) (Larson, 2001).

3.8 Πρόληψη

Είναι σαφές ότι για την διατήρηση της ακεραιότητας του αγωγού η βιομηχανία του αερίου έχει αναπτύξει πρωτόκολλα ενεργειών που περιλαμβάνουν επιθεωρήσεις, προγράμματα συντηρήσεων και ενέργειες για την αντιμετώπιση των αστοχιών που κατά καιρούς προκύπτουν. Υπάρχει επίσης ο βασικός τομέας της πρόληψης, η οποία δεν είναι τίποτα άλλο από ένα σύνολο δράσεων και πρακτικών για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης αστοχιών στο σύστημα μεταφοράς ΦΑ. Η πρόληψη εμπεριέχει σύνολο ενεργειών οι οποίες κινούνται στις παρακάτω κατευθύνσεις:

- Σχεδιασμός και κατασκευή: Η διασφάλιση της ακεραιότητας του αγωγού ξεκινά με το σωστό σχεδιασμό, την τήρηση των τεχνικών απαιτήσεων και την κατανόηση των δεδομένων του έργου. Στην κατεύθυνση αυτή συμβάλουν με θετικό πρόσημο η ανάπτυξη των κατασκευαστικών πρακτικών και οι εξελιγμένες τεχνολογίες επιθεώρησης.
- Λειτουργία και συντήρηση: Μόλις ο αγωγός τεθεί σε λειτουργία, η συνεχής παρακολούθηση των λειτουργικών και δομικών παραμέτρων του έργου διασφαλίζει τον εντοπισμό τυχόν παραλήψεων και πιθανών εστιών κινδύνου.
- Εκπαίδευση και κατάρτιση: Ο τομέας της τεχνικής κατάρτισης και εκπαίδευσης θεωρούνται ζητήματα πρώτης προτεραιότητας για τους υπεύθυνους διαχείρισης του συστήματος μεταφοράς. Παράλληλα θεμελιώδους σημασίας έχει αποδεχθεί η σωστή ενημέρωση και κατάρτιση των περιόικων για την αποφυγή αστοχιών λόγω άγνοιας (Larsson, 2014).

3.9 Αποκατάσταση Αστοχιών

3.9.1 Αξιολόγηση και μέθοδοι αποκατάστασης

Οι κύριες αιτίες αστοχιών στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, ως επί το πλείστον είναι οι εξωτερικές παρεμβάσεις και η διάβρωση. Οι πιο σοβαρές αστοχίες, όπως για παράδειγμα οι ρωγμές στα τοιχώματα, απαιτούν άμεση αντιμετώπιση και επισκευή ή αντικατάσταση τμήματος του αγωγού, σε εξαιρετικές περιπτώσεις ακόμα και εγκατάλειψη ολόκληρου του δικτύου. Φυσικά υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις, λιγότερο σοβαρές, παραδείγματος χάριν ο εντοπισμός σημειακής

διάβρωσης, ή ο εντοπισμός ενός βαθουλώματος κ.τ.λ. Στις περιπτώσεις αυτές η αντιμετώπιση της αστοχίας αξιολογείται και λαμβάνονται τα κατάλληλα για την περίπτωση, μέτρα αποκατάστασης. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να υπάρχει διαδικασία αξιολόγησης των ευρημάτων που θα επιτρέπει στον διαχειριστή να εντοπίζει έγκαιρα τις αστοχίες, να τις αξιολογεί και να προβαίνει στις κατάλληλες ενέργειες αποκατάστασης.

3.9.2 Επιλογή μεθόδου επισκευής-αποκατάστασης

Η προαναφερθείσα διαδικασία αξιολόγησης της αστοχίας είναι αυτή η οποία θα οδηγήσει τον χρήστη στην επιλογή της ενδεδειγμένης ενέργειας, καλύπτοντας όλο το φάσμα των πιθανών σεναρίων βλαβών και αστοχιών. Η συνήθεις τακτική που ακολουθείται για την επιλογή της κατάλληλης διορθωτικής ενέργειας είναι με γνώμονα την ύπαρξη ή μη διαρροής ΦΑ. Πιο συγκεκριμένα:

[1]. Σε περίπτωση Αστοχίας με διαρροή

- Εμφάνιση εκτεταμένων ρωγμών: Μετά από εμφάνιση εκτεταμένης ρωγμής, παύει η λειτουργία του αγωγού, αφαιρείται το κατεστραμμένο τμήμα και αντικαθίσταται με νέο.
- Εμφάνιση μικρών διαρροών: Μετά από διαρροή, το τμήμα αυτό του αγωγού θα απομονωθεί και θα επισκευαστεί με χιτώνιο (sleeve) ή με αποκοπή και αντικατάσταση του κατεστραμμένου τμήματος με νέο. Γίνεται χρήση σφικτήρα διαρροής ως προσωρινή επισκευή έως ότου προγραμματιστεί η μόνιμη επισκευή και αποκατάσταση.

[2]. Σε περίπτωση αστοχίας χωρίς διαρροή

- Εμφάνιση διαβρωτικών φαινομένων: Οι βλάβες στα τοιχώματα των αγωγών επισκευάζονται με τη χρήση συγκολλητών χιτωνίων(welded sleeve), σύνθετου περιτυλίγματος(composite wrap) ή με την αφαίρεση του τμήματος που έχει υποστεί βλάβη και αντικατάσταση με νέο. Μπορεί να απαιτηθεί, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλείς εργασία αποκατάστασης, η μείωση της πίεσης λειτουργίας του αγωγού ακόμη και η διακοπή λειτουργίας του αναλόγως την περίπτωση.
- Εμφάνιση μηχανικής βλάβης: Οι μηχανικές βλάβες επισκευάζονται συνήθως με τη χρήση συγκολλητών χιτωνίων (welded sleeve), ή με την αφαίρεση του τμήματος που έχει υποστεί βλάβη και αντικατάσταση με νέο.
- Μετατόπιση του αγωγού: Η μετατόπιση του αγωγού απαιτεί απαραίτητα κατάλληλες μελέτες πριν την οποιαδήποτε επέμβαση. Συνήθως το τμήμα το οποίο έχει υποστεί την αστοχία, αφαιρείται και αντικαθίσταται με νέο.
- Απώλεια στήριξης του αγωγού: Όταν ο αγωγός έχει χάσει τη στήριξή του, συνήθως κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση νέας στήριξης, με παράλληλο έλεγχο προκυμμένου να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των συγκολλήσεων και οι καλές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου.

- Εμφάνιση βλάβης στο βαλβιδοστάσιο: Η βλάβη αυτού του είδους επιδιορθώνεται με την χρήση βαλβίδων απομόνωσης για την παράκαμψη της λειτουργίας και τον εξαερισμό του αγωγού. Κατόπιν οι βάνες αντικαθίστανται και ο αγωγός επανέρχεται εκ νέου σε λειτουργία (Palmer-Jones, 2008).

3.10 Καθοδική Προστασία

3.10.1 Γενικά - Αρχή Λειτουργίας της Μεθόδου

Η διάβρωση, ως αιτία αστοχιών στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά με την εφαρμογή συστημάτων Καθοδικής Προστασίας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ευρύτερα για την προστασία μεταλλικών κατασκευών από χάλυβα και ο μολύβδο, ενώ χρησιμοποιείται σε πληθώρα βιομηχανικών εγκαταστάσεων όπως σε υπεράκτιες πλατφόρμες πετρελαίου, αιολικά πάρκα και αλλού.

Στην Παράγραφο 2.2.2 σημειώθηκε ότι το φαινόμενο της διάβρωσης λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στις περιοχές ανόδου μιας μεταλλικής επιφάνειας, ενώ η κάθοδος μπορεί να είναι είτε άλλες περιοχές του ίδιου μετάλλου είτε ένα ξεχωριστό μέταλλο σε επαφή με τις δυο περιοχές εντός ηλεκτρολυτικού περιβάλλοντος. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου έγκειται στην σύνδεση εξωτερικής ανόδου με την μεταλλική επιφάνεια του υπό προστασία αγωγού, οπότε με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος η επιφάνεια του αγωγού αποκτά καθοδικό δυναμικό με συνέπεια την προστασία από την διάβρωση.

Από ηλεκτροχημική άποψη, οι σχετιζόμενες με τη διάβρωση ανοδικές αντιδράσεις περιορίζονται με την μείωση του δυναμικού του μετάλλου, επιτρέποντας έτσι μόνο καθοδικές αντιδράσεις. Η καθοδική προστασία επιτυγχάνεται με την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (Impressed Current Technique) ή με την τεχνική των θυσιαζόμενων ανοδίων (Sacrificial Anodes Technique).

Τέλος σημειώνεται ότι προκειμένου σε ένα έργο μεταφοράς ΦΑ με υπόγειους αγωγούς μεταφοράς να εγκατασταθεί το Σύστημα Καθοδικής Προστασίας θα πρέπει:

- Αρχικά να προηγηθεί αντίστοιχη Μελέτη Καθοδικής Προστασίας στη φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού του έργου
- Να διασφαλιστούν όλες τις απαιτούμενων αδειοδοτήσεις και κατόπιν
- Να εγκατασταθεί το Σύστημα Καθοδικής Προστασίας.

3.10.2 Τεχνική Επιβαλλόμενου Ρεύματος

Για την εφαρμογή της τεχνικής επιβαλλόμενου ρεύματος απαιτείται εξωτερική πηγή παροχής συνεχούς ρεύματος. Ο αρνητικός πόλος συνδέεται με την μεταλλική επιφάνεια του αγωγού και αποτελεί την κάθοδο του κυκλώματος. Ο θετικός πόλος της πηγής, διαμέσου ανοδικού στοιχείου, εγκαθίσταται στο περιβάλλοντα χώρο του αγωγού, δηλαδή στο έδαφος. Με τον τρόπο αυτό

δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ της καθόδου (μεταλλικού αγωγού) και της αδρανούς ανόδου (έδαφος). Η εν λόγω διαφορά δυναμικού πρέπει να είναι τόσο αρνητική ώστε να αποτρέπει την ηλεκτροχημική αντίδραση που προκαλεί τη διάβρωση. Δηλαδή το ρεύμα που ρέει από την κάθοδο προς την άνοδο παρέχει προστατευτικό στρώμα ηλεκτρονίων που εμποδίζει την ηλεκτροχημική αντίδραση.

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα αυτό πρέπει να υπερνικήσει αυτό που προέρχεται από το φαινόμενο της διάβρωσης και προϋπάρχει. Η κατάλληλη τιμή του εφαρμοζόμενου ρεύματος προσδιορίζεται με την βοήθεια των λεγόμενων ηλεκτροδίων αναφοράς, με την βοήθεια των οποίων πραγματοποιείται η μέτρηση του φυσικού δυναμικού.

Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανοδικών στοιχείων είναι το σιδηροπυρίτιο (FeSi). Επίσης όλα τα ανοδικά στοιχεία πρέπει απαραίτητα να είναι της ίδιας χύτευσης, ενώ ο χρόνος ζωής του προσδιορίζεται στα τριάντα (30) περίπου έτη. Επίσης η εξωτερική πηγή παροχής συνεχούς ρεύματος, κατά βάση είναι μετασχηματιστής εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα με τάση εξόδου από 0 έως 5V και ένταση ρεύματος από 0 έως 1A. Στον πίνακα ελέγχου του μετασχηματιστή υπάρχουν όργανα χειρισμού και μετρήσεων, προκειμένου να επιτυγχάνονται οι επιθυμητές τιμές έντασης ρεύματος και διαφοράς δυναμικού. Οι βασικές μετρήσεις οι οποίες αφορούν την εφαρμοζόμενη μέθοδο Επιβαλλόμενου Ρεύματος και παρακολουθούνται στενά στα πλαίσια της αποτελεσματικής λειτουργίας του συστήματος είναι οι:

- Διαφορά δυναμικού μεταξύ του αγωγού και ηλεκτροδίου αναφοράς και
- Η επαγόμενη τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος στον αγωγό και η
- Διαφορά δυναμικού εντός του αγωγού

Το σύστημα Καθοδικής Προστασίας που χρησιμοποιεί την τεχνική αυτή εφαρμόζεται συνήθως σε μεγάλης έκτασης συστήματα σωληνώσεων ή όταν το μέγεθος της δομής είναι μεγάλο ή ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι επιστρώσεις προστασίας των αγωγών κρίνονται λιγότερο αποτελεσματικές. Στην Εικόνα 3.20, στο τέλος της παραγράφου, παρατίθεται σχηματικό διάγραμμα της εν λόγω τεχνικής.

3.10.3 Τεχνική θυσιαζόμενων ανοδίων

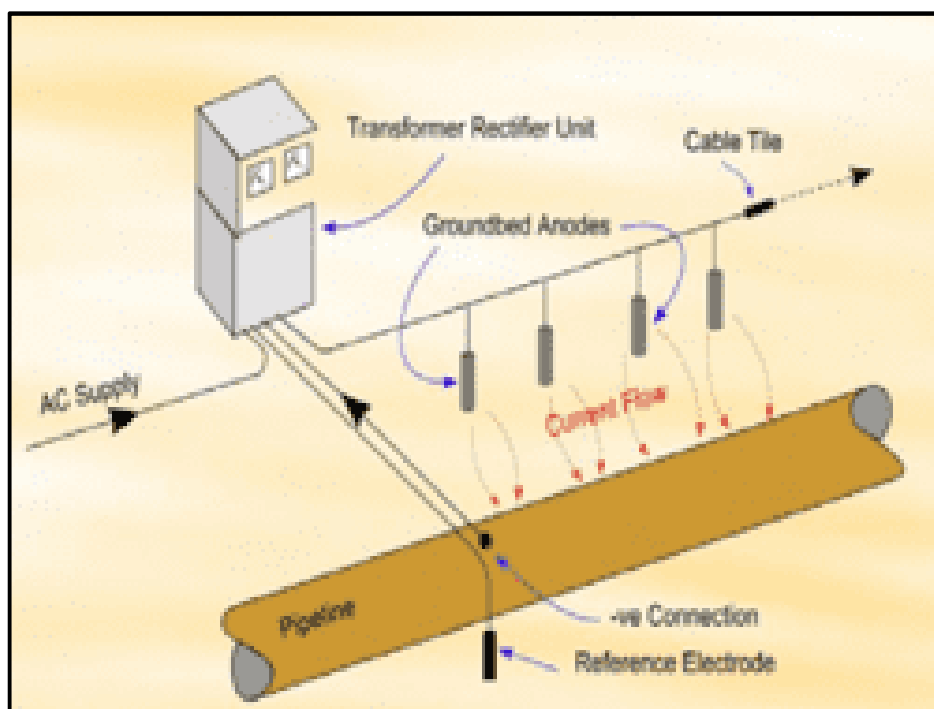
Κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, επιλέγεται κομμάτι μετάλλου ηλεκτροχημικά ενεργό (γαλβανική άνοδος), τοποθετείται στον περιβάλλοντα χώρο του υπόγειου αγωγού και συνδέεται με την μεταλλική επιφάνειά του. Η επιλογή των γαλβανικών ανόδων γίνεται λόγω του ότι έχουν περισσότερο αρνητικό δυναμικό απ' ό,τι η μεταλλική επιφάνεια του αγωγού, επομένως δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων από τη γαλβανική άνοδο προς την επιφάνεια του αγωγού. Με τον

τρόπο αυτό το σύστημα στην πραγματικότητα διαβρώνει την γαλβανική άνοδο(θυσιαζόμενη) και ως εκ τούτου προστατεύεται η μεταλλική επιφάνεια του αγωγού.

Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανοδικών στοιχείων είναι το μαγνήσιο ή ο ψευδάργυρος. Επίσης και στην τεχνική αυτή όλα τα ανοδικά στοιχεία πρέπει απαραίτητα να είναι της ίδιας χύτευσης, ενώ ο χρόνος ζωής του προσδιορίζεται και εδώ στα τριάντα (30) περίπου έτη.

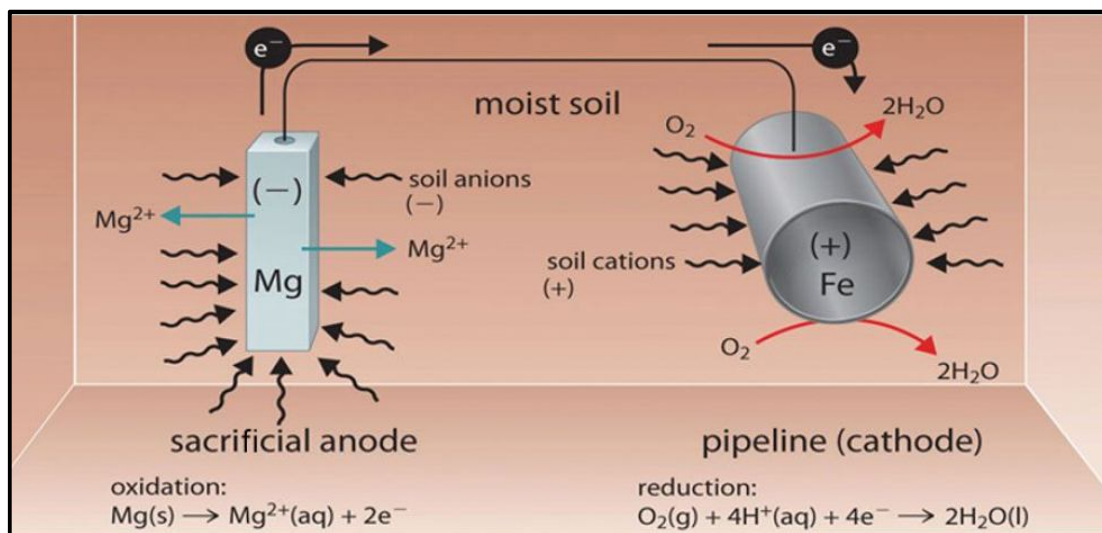
Τα συστήματα Καθοδικής Προστασίας που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική συνήθως εφαρμόζονται σε κατασκευές με περιορισμένη επιφάνεια που εκτίθεται στο έδαφος και οι οποίες μπορούν να απομονωθούν ηλεκτρικά από συστήματα γείωσης.

Στην Εικόνα 3.21, στο τέλος της παραγράφου παρατίθεται σχηματικό διάγραμμα της εν λόγω τεχνικής (DESFA: DSF-SPC-CPR-001, 2021; DESFA: DSF-SPC-CPR-002, 2021; Κορτίνας, 2018; Turnbull, 2020).



Εικόνα 3.20: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής Επιβαλλόμενου Ρεύματος

(<https://www.materialsperformance.com/news/2020/08/kbr-awards-cp-specialist-support-contract-to-fims-international>)



Εικόνα 3.21: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής Θυσιαζόμενων Ανοδίων (<https://pressbooks-dev.oer.hawaii.edu/chemistry/chapter/corrosion/>)

3.11 Κώδικες και Κανονισμοί

Για τον σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς ΦΑ, την εγκατάσταση του έργου, τις προληπτικές και διορθωτικές ενέργειες και τις συντηρήσεις, υπάρχουν ενδεδειγμένα και με μεγάλη λεπτομέρεια Διεθνή Πρότυπα και κανονισμοί. Καλύπτουν όλο το παραπάνω φάσμα, υποχρεώνοντας τους εμπλεκόμενους για την πιστή και απαρέγκλιτη τήρησή τους. Τα πιο γνωστά από αυτά προέρχονται από τον ASME(American Society for Testing and Materials), την EN(European Norms) και τον DNV(Det Norske Veritas). Για πρακτικούς λόγους γίνεται χρήση της διεθνούς ονοματολογίας η οποία είναι η αγγλική γλώσσα. Πιο αναλυτικά:

- [1]. ASTM (American Society for Testing and Materials): Η Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός στον οποίο παραγωγοί, χρήστες, καταναλωτές και εκπρόσωποι της αμερικανικής κυβέρνησης και της ακαδημαϊκής κοινότητας αναπτύσσουν εθελοντικά πρότυπα για υλικά, προϊόντα, συστήματα και υπηρεσίες. Τα πιο σχετικά από αυτά που αφορούν τη θεματολογία της παρούσας εργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί.

Κωδικός	Ονομασία
ASME B31G	Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines
ASME B31.8	Gas Transmission and Distribution Piping Systems
ASME B31.8S	Managing System Integrity of Gas Pipelines
ASME B36.10M	Welded and Seamless Wrought Steel Pipe

Πίνακας 3.3: Διεθνή Πρότυπα ASME

[2]. EN (European Norms): Τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, που μερικές φορές αποκαλούνται και “ευρονόρμες”, είναι πρότυπα τεχνικής φύσεως τα οποία έχουν επικυρωθεί από Ευρωπαϊκούς Οργανισμούς Τυποποίησης. Αποτελούν βασική συνιστώσα της ενιαίας ευρωπαϊκής αγοράς και είναι ζωτικής σημασίας για τη ανάπτυξη και λειτουργία του τομέα των συστημάτων μεταφοράς ΦΑ. Τα πιο σχετικά από αυτά που αφορούν τη θεματολογία της παρούσας εργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 3.4.

Κωδικός	Ονομασία
EN 12068	Cathodic protection - External organic coatings for the corrosion protection of buried or immersed steel pipelines used in conjunction with cathodic protection, tapes and shrinkable materials
EN 12474	Cathodic protection for submarine pipelines
EN 12495	Cathodic protection for fixed steel offshore structures
EN 12499	Internal cathodic protection of metallic structures
EN 12501 parts 1 and 2	Protection of metallic materials against corrosion - Corrosion likelihood in soil
EN 12696	Cathodic protection of steel in concrete
EN 12954	Cathodic protection of buried or immersed metallic structures. General principles and application for pipelines
EN 13173	Cathodic protection for steel offshore floating structures
EN 13174	Cathodic protection for harbor installations
EN 13509	Cathodic protection measurement techniques
EN 13636	Cathodic protection of buried metallic tanks and related piping
EN 14505	Cathodic protection of complex structures
EN 15112	External cathodic protection of well casing
EN 15589-1	Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems — Part 1: On-land pipelines

Πίνακας 3.4: Ευρονόρμες για την μεταφορά του ΦΑ

[3]. DNV (Det Norske Veritas): Αποτελεί ανεξάρτητο Εμπειρογνώμονα σε θέματα διασφάλισης και διαχείρισης κινδύνων, παρέχοντας στα ενδιαφερόμενα μέρη αξιόπιστες την απαραίτητη τεχνογνωσία, με εξειδίκευση στην ναυτιλιακή βιομηχανία, με έδρα την Νορβηγία. Τα πιο σχετικά πρότυπα από αυτά που αφορούν τη θεματολογία της παρούσας εργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 3.5 που ακολουθεί.

Κωδικός	Ονομασία
DNV-OS-F101	Submarine Pipeline Systems
DNV-RP-F101	Corroded pipelines
DNV-RP-F102:	Pipeline field joint coating and field repair of pipeline coating
DNV-RP-F103	Cathodic protection of submarine pipelines
DNV-RP-F105	Free spanning pipelines
DNV-RP-F106	Factory applied external pipeline coatings for corrosion control
DNV-RP-F107	Risk assessment of pipeline protection
DNV-RP-F108	Assessment of flaws in pipeline and riser girth welds
DNV-RP-F109	On-bottom stability design of submarine pipelines
DNV-RP-F110	Global buckling of submarine pipelines
DNV-RP-F111	Interference between trawl gear and pipelines

Πίνακας 3.5: Πρότυπα της DNV (Det Norske Veritas)

3.12 Ερωτήματα Έρευνας

Η διάβρωση ως μια από τις βασικότερες αιτίες πρόκλησης αστοχιών στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, τις τελευταίες δεκαετίες, αποτελεί πεδίο έρευνας και ανάπτυξης τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Ωστόσο, από τη βιβλιογραφική επισκόπηση και την αξιολόγηση της εμπειρικής γνώσης πάνω στην λειτουργία των αγωγών του ΔΕΣΦΑ στην Ελλάδα, αλλά και από τη διεθνή εμπειρία, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προκύπτει η εξής σειρά ερωτημάτων της έρευνας:

Ερώτημα 1^ο: Ποιος τρόπος οντολογικής απεικόνισης του φαινομένου της διάβρωσης θεωρείται κατάλληλος έτσι ώστε να επιτευχθεί η ορθή αποτύπωσή του και στη σωστή του διάσταση και να καταγραφούν τα βασικά γενεσιουργά αίτια;

Ερώτημα 2^ο: Πως μπορεί να επιτευχθεί ο εντοπισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης του φαινομένου της διάβρωσης; Δηλαδή, πως μπορεί να γίνει η εκτίμηση και επεξεργασία των πιθανοτήτων οι οποίες διέπουν την εμφάνιση των επιμέρους μορφών διάβρωσης;

Ερώτημα 3^ο: Πως μπορεί να εκπονηθεί μια μελέτη Ανάλυσης Κινδύνου που να εμφανίζει τη σύνδεση της πιθανότητας εμφάνισης ενός διαβρωτικού φαινομένου με τις συνεπαγόμενες επιπτώσεις (με όρους κόστους και χρόνου) σε έναν εγκατεστημένο αγωγό ΦΑ;

Η απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα δίνεται στη συνέχεια με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και την Μελέτη Περίπτωσης για υπόγειο αγωγό μεταφοράς ΦΑ.

3.13 Ανασκόπηση κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 3, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση τριών βασικών μορφών του φαινομένου της διάβρωσης και συγκεκριμένα του HIC, του MIC και του SCC. Καταγράφεται αναλυτικά ο τρόπος εκδήλωσης και δράσης των περιπτώσεων αυτών και οι επιπτώσεις που προκαλούν στους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ. Επιπλέον γίνεται αναφορά και σε άλλους λιγότερο δημοφιλείς τύπους διάβρωσης, ενώ καταγράφονται στατιστικά στοιχεία αγωγών μεταφοράς ΦΑ από την διεθνή εμπειρία. Επίσης γίνεται καταγραφή των τεχνολογιών επιθεώρησης στο στάδιο κατασκευής των σωληνοαγωγών, ανέγερσης και λειτουργίας του έργου. Ακολούθως παρουσιάζεται ο σημαντικός τομέας που αφορά την πρόληψη εμφάνισης διαβρωτικών φαινομένων με εκτενή αναφορά στην Καθοδική Προστασία, καθώς και μέθοδοι αποκατάστασης αστοχιών του δικτύου αγωγών μεταφοράς.

Επίσης παρατίθενται κώδικες και κανονισμοί οι οποίοι άπτονται των επιμέρους θεμάτων σχεδιασμού και λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς ΦΑ και αφορούν το φαινόμενο της διάβρωσης. Τέλος καταγράφονται τα βασικά ερωτήματα της έρευνας της εργασίας.

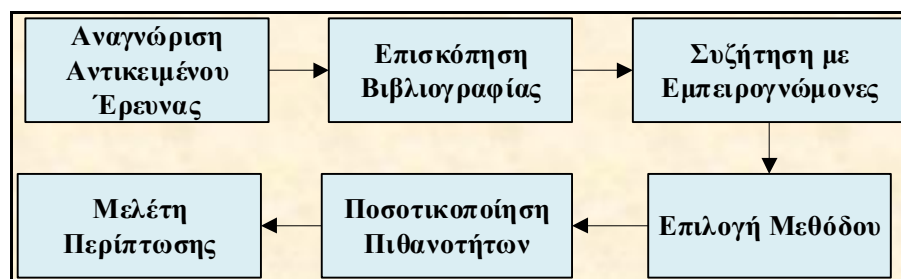
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Εισαγωγικό Πλαίσιο: Ακεραιότητα Αγωγών Φυσικού Αερίου

Μετά την κάλυψη των βασικών πτυχών του φαινομένου της διάβρωσης, μέσα από την βιβλιογραφική επισκόπηση και τα ερωτήματα έρευνας που έχουν τεθεί, ακολουθεί διερεύνηση της ακεραιότητας του συστήματος των υπόγειων αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Για τον διαχειριστή του συστήματος η ακεραιότητα των αγωγών αποτελεί μείζον θέμα τόσο κατά την διάρκεια της ανέγερσης του έργου όσο και στην φάση της λειτουργίας. Η ακεραιότητα του συστήματος πρακτικά εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη Λειτουργικότητα και Συντηρησιμότητα. Η Λειτουργικότητα περιλαμβάνει τις καλές πρακτικές σχεδιασμού και λειτουργίας με στόχο την ορθή λειτουργία σύμφωνα με τα εγχειρίδια, την τεχνογνωσία και την εμπειρία που έχει εμπειρωθεί. Η Συντηρησιμότητα είναι το πλαίσιο εκείνων των ενεργειών για την παρακολούθηση, τον εντοπισμό ή και την πρόβλεψη της αστοχίας και την θεραπεία της. Η προσήλωση, ταυτόχρονα και στις δυο αυτές πρακτικές, είναι απαραίτητη προκειμένου να διασφαλιστεί το βασικό ζητούμενο, το οποίο δεν είναι άλλο από την ακεραιότητα των υπόγειων δικτύων αγωγών μεταφοράς ΦΑ. Βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η αποκτηθείσα γνώση και εμπειρία πρέπει να καταγράφεται δομημένα και με συνέπεια. Επίσης με αιχμή του δόρατος την έρευνα και ανάπτυξη γίνεται αποτελεσματική, χρήσιμη, προάγει και αναβαθμίζει τις παρεχόμενες υπηρεσίες και την βελτίωση των υποδομών στο χώρο της βιομηχανίας του ΦΑ (Yuhua, 2004).

4.2 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Διερεύνησης

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο της διάβρωσης και των συνεπαγόμενων κινδύνων στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ. Η μεθοδολογία διερεύνησης του φαινομένου έχει να κάνει με τον προσδιορισμό των βημάτων εκείνων τα οποία θα προσφέρουν στον αναγνώστη ολοκληρωμένη εικόνα φωτίζοντας όλα τα απαραίτητα σημεία. Το διάγραμμα ροής που ακολουθείται στις περισσότερες περιπτώσεις, προκειμένου να καθοριστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, αποτυπώνονται στο παρακάτω Διάγραμμα 4.1.



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα Ροής για τον καθορισμό της μεθοδολογίας

Συγκεκριμένα:

- [1]. Η Αναγνώριση του Αντικειμένου της Έρευνας είναι το πρώτο βήμα για τον ακριβή προσδιορισμό της περιοχής που θα εστιάσει η έρευνα. Το αντικείμενο αυτό θα πρέπει να σχετίζεται με τα ευρύτερα επαγγελματικά ενδιαφέροντα και τους στόχους του ερευνητή και να αποτελέσει τη βάση της επιστημονικής μελέτης. Επίσης το αντικείμενο που θα επιλεγεί θα πρέπει να:
 - Καλύπτει το γνωσιακό πεδίο που υπάγεται
 - Εισάγει προβληματισμούς και νέες ή λιγότερο δημοφιλείς προσεγγίσεις
 - Επανεξετάζει τις υφιστάμενες διεργασίες του αντικειμένου και να εντοπίζει τυχόν ανεπάρκειες
- [2]. Η Επισκόπηση της Βιβλιογραφίας περιλαμβάνει τον συστηματικό εντοπισμό και ανάλυση των εμπλεκόμενων εγγράφων που περιέχουν πληροφορίες σχετικές με το υπό διερεύνηση αντικείμενο. Πρέπει να είναι εκτενής και διεξοδική και να αποσκοπεί στην απόκτηση λεπτομερούς γνώσης, κατανόησης και εμπέδωσης του υπό μελέτη θέματος. Ο σκοπός για τον οποίο διενεργείται αφορά:
 - Την καταγραφή του υφιστάμενου γνωσιολογικού υπόβαθρου για το αντικείμενο
 - Την καταγραφή προσεγγίσεων οι οποίες θα βοηθήσουν και θα βελτιώσουν την ερευνητική μελέτη.
 - Την εξοικείωση του ερευνητή με προηγούμενες μελέτες, γεγονός που διευκολύνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μελέτης και
 - Τον ακριβέστερο ορισμό και περιγραφή του αντικειμένου
- [3]. Η συζήτηση με τους Εμπειρογνώμονες θα αποτυπώσει την πολύτιμη γνώση και την εμπειρία των ειδικών στο υπό εξέταση αντικείμενο. Βασική τους αποστολή θα είναι ο προσδιορισμός και ανάλυση των αιτιών του αντικειμένου της έρευνας για την αποτελεσματικότερη διάγνωση επομένως και αντιμετώπιση του φαινομένου της διάβρωσης. Από την επικοινωνία αυτή θα προκύψουν επίσης και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της έρευνας.
- [4]. Η Επιλογή Απεικόνισης της μεθόδου διερεύνησης του αντικειμένου είναι η Ανάλυση Δέντρων Σφάλματος (Fault Tree Analysis - FTA). Είναι τεχνική που βασίζεται σε πιθανότητες και κατά την εφαρμογή της οποίας, ορίζεται ανεπιθύμητο κορυφαίο συμβάν για το οποίο διενεργείται ανάλυση κινδύνου με βάση τις πιθανότητες εμφάνισης των αιτιών που το προκαλούν. Δύο βασικά πλεονεκτήματα υποστηρίζουν την ευρεία χρήση της μεθόδου αυτής στη μηχανική συστημάτων. Το πρώτο είναι ότι η μοντελοποίηση του προβλήματος γίνεται μέσα από τον συνδυασμό ποιοτικής και ποσοτικής έρευνας, για τον προσδιορισμό του προβλήματος και των σχετικών αιτιών του. Επίσης η μέθοδος αυτή αναζητά συγκεκριμένους συνδυασμούς των βασικών αιτιών και των πιθανοτήτων τους, για την παροχή μιας πιο

συναινετικής ανάλυσης με σκοπό την βελτίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν.

- [5]. Η Ποσοτικοποίηση των Πιθανοτήτων αποτελεί εξίσου σημαντικό κομμάτι της μεθοδολογίας και είναι το αποτέλεσμα της συνδυασμένης ποιοτικής και ποσοτικής έρευνα προκυμμένου να αποδοθούν οι πιθανότητες εμφάνισης των αιτιών του φαινομένου της διάβρωσης. Ο συνδυασμός ποιοτικής και ποσοτικής έρευνας είναι μια ισχυρή προσέγγιση που επιτρέπει στους ερευνητές να αποκτήσουν βαθύτερη κατανόηση ενός ερευνητικού θέματος ή φαινομένου. Αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων και παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη και ολιστική ανάλυση.
- [6]. Η Μελέτη Περίπτωσης (Case Study) είναι η διερεύνηση συγκεκριμένων αστοχιών υπόγειου αγωγού μεταφοράς ΦΑ, με την βοήθεια της απεικονιστικής μεθόδου που έχει επιλεγεί και περιγράφεται παραπάνω. Δηλαδή για τον αγωγό, με την βοήθεια της FTA, διερευνώνται οι τρεις συνηθέστεροι τύποι διάβρωσης, οι αστοχίες οι οποίες προκαλούν, οι αντίστοιχες επιπτώσεις και πραγματοποιείται τέλος ανάλυση κινδύνων (Palmer, 2008; Spanidis, 2010).

4.3 Ο ρόλος των Εμπειρογνώμωνων

Η διαβούλευση με τους Εμπειρογνώμονες επί του θέματος και η ανάλυση των αιτιών αστοχιών γίνεται στο πλαίσιο υλοποίησης της επιλεγείσας μεθόδου για την διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης. Οι συμμετέχοντες καταθέτουν τη γνώση και την εμπειρία που διαθέτουν και μπορεί να προέρχονται από το μελετητικό χώρο (βασικός και λεπτομερείς σχεδιασμός), από το χώρο των εταιρειών επιθεωρήσεων (επιθεωρητές πεδίου, σωληνωλικών και εξοπλισμού), από τον χώρο της ανέγερσης (επιβλέποντες εργασιών, υπεύθυνοι εργοταξίων) και από τον χώρο του διαχειριστή του συστήματος (διεύθυνση έργου, υπεύθυνοι συντήρησης και συστημάτων καθοδικής προστασίας, κ.α.). Τα εξερχόμενα από την συζήτηση με τους Εμπειρογνώμονες καταγράφονται και σταχυολογούνται.

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια των αναγκών της Μελέτης Περίπτωσης της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις με τρία έμπειρα στελέχη από την ΑΣΠΡΟΦΟΣ Α.Ε και την ΔΕΣΦΑ. Η εταιρεία ΑΣΠΡΟΦΟΣ ως μέλος του Ομίλου της HELLENiQ ENERGY, λειτουργεί από το 1983 με κύριο αντικείμενο τη μελέτη των βιομηχανικών συστημάτων πετρελαίου και ΦΑ. Η εταιρεία ΔΕΣΦΑ λειτουργεί από το 2007, είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία, τη διαχείριση, την εκμετάλλευση, την ανάπτυξη και τις διασυνδέσεις του συστήματος ΦΑ στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα από την ΑΣΠΡΟΦΟΣ πραγματοποιήθηκε συνέντευξη με τον υπεύθυνο εργοταξίων της εταιρείας για τα έργα ΦΑ, με εμπειρία πλέον των είκοσι (20) ετών. Στο βιογραφικό του συμπεριλαμβάνονται η επίβλεψη έργων ΦΑ και η εκπόνηση μελετών όσον αφορά αποκαταστάσεις αστοχιών ή επεκτάσεις του δικτύου μεταφοράς ΦΑ. Ο δεύτερος Εμπειρογνώμονας προέρχεται επίσης από την εταιρεία ΑΣΠΡΟΦΟΣ, με εμπειρία πλέον των τριάντα (30) ετών στον σχεδιασμό

και μελέτη έργων ΦΑ, έχοντας συμμετάσχει ως επικεφαλής στα μεγαλύτερα έργα συστημάτων μεταφοράς ΦΑ όπως αυτό του Διαδριατικού Αγωγού Φυσικού Αερίου (Trans Adriatic Pipeline - TAP). Ο τρίτος Εμπειρογνώμονας με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις προέρχεται από την ΔΕΣΦΑ με εμπειρία πλέον των τριανταπέντε (35) ετών, στέλεχος το οποίο έχει διευθύνει πληθώρα έργων ανάπτυξης του δικτύου, επίβλεψης εργασιών στο πεδίο και γνωμοδότησης επί τεχνικών και κατασκευαστικών θεμάτων. Για λόγους προσωπικών δεδομένων δεν γίνεται αναφορά στα ονόματα των στελεχών με τα οποία πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις, πάρα ταύτα τα στοιχεία τους είναι στην διάθεση οποιουδήποτε ενδιαφερομένου.

Γενικότερα, η γνώμη των Εμπειρογνώμωνων θεωρείται θεμελιώδεις για την ανάπτυξη των βιομηχανικών συστημάτων του ΦΑ και βασίζεται στις γνώσεις και την πολύ-επίπεδη εμπειρία τους τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και πρακτικό επίπεδο (Singh, 2014).

4.4 Επιλογή απεικονιστικής μεθόδου: Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος

Η μέθοδος η οποία έχει επιλεγεί για την απεικόνιση του φαινομένου της διάβρωσης είναι η FTA. Είναι μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ανάλυση αξιοπιστίας και ασφάλειας βιομηχανικών συστημάτων. Ιστορικά η εταιρεία Bell Telephone Laboratories ανέπτυξε για πρώτη φορά την ιδέα το 1962 για τις ανάγκες της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ. Εφαρμόστηκε συγκεκριμένα για τις ανάγκες διερεύνησης αστοχιών του συστήματος καθοδήγησης πυραύλων τύπου Minuteman. Αργότερα υιοθετήθηκε και εφαρμόστηκε εκτεταμένα από την αεροπορική εταιρεία Boeing. Η FTA είναι μία από τις "τεχνικές ανάλυσης λογικής" που συναντώνται στην επιχειρησιακή έρευνα και στην αξιοπιστία των συστημάτων και αποτελεί μια από τις σημαντικότερες λογικές και πιθανολογικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος.

Ως μέθοδος πιθανολογικής αξιολόγησης κινδύνου χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των βασικών αιτιών των αστοχιών οι οποίες οδηγούν σε ένα ανεπιθύμητο συμβάν. Αναπαρίσταται με τον τρόπο αυτό η λογική σχέση των βασικών αιτιών που οδηγούν στο συμβάν για τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης αυτού του συμβάντος. Είναι μια λογική και διαγραμματική μέθοδος για την αξιολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης "κορυφαίου συμβάντος" που προκύπτει από αλληλουχίες σφαλμάτων και συμβάντων αστοχίας. Διαβάζεται από την κορυφή του δέντρου και προς τα κάτω, προκυμμένου να εντοπίσει τα βαθύτερα αίτια του κορυφαίου συμβάντος. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι οι διαφορετικές αιτίες αστοχιών μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους για να προκαλέσουν στο σύστημα αστοχία. Το δένδρο σφαλμάτων είναι χρήσιμο για την κατανόηση του τρόπου εμφάνισης ενός συμβάντος με λογικό τρόπο. Επιπλέον, επιτρέπει την εισαγωγή των πιθανοτήτων αστοχίας του συστήματος και με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της πιθανότητας εμφάνισής του (Taleb, 2021).

Με πιο τεχνικούς όρους, ένα δέντρο σφαλμάτων είναι μια διαγραμματική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ των αστοχιών σε επίπεδο συστατικών και ενός ανεπιθύμητου συμβάντος σε επίπεδο συστήματος, δηλαδή απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο οι αστοχίες διαδίδονται στο σύστημα για να προκαλέσουν μια αστοχία. Η FTA είναι ένα εργαλείο διαχείρισης κινδύνου που χρησιμοποιείται σε μελέτες αξιοπιστίας, αναλύσεις ασφάλειας και διερευνήσεις ατυχημάτων πολύπλοκων συστημάτων. Οι αστοχίες ονομάζονται “βασικά συμβάντα” του δέντρου και το ανεπιθύμητο συμβάν ονομάζεται “κορυφαίο συμβάν” του δέντρου σφαλμάτων.

Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα τις επιλεγείσας μεθόδου καταγράφεται ότι:

- Επιτρέπει τη χρήση αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με την αστοχία για την εκτίμηση του συνολικού κινδύνου
- Είναι απλό στην κατανόηση και εύκολο στην εφαρμογή
- Επεξεργάζεται ποιοτικές περιγραφές πιθανών προβλημάτων και συνδυασμό γεγονότων που προκαλούν συγκεκριμένες αστοχίες
- Ποσοτικοποιεί τις εκτιμήσεις των συχνοτήτων εμφάνισης πιθανών αστοχιών
- Προσανατολίζει τον μελετητή στην διατύπωση προτάσεων για τη μείωση των κινδύνων

Οι περιορισμοί τους οποίους παρουσιάζει είναι οι:

- Δεν είναι πάντα εύκολος ο προσδιορισμός όλων των πιθανών διαδρομών που οδηγούν στο κορυφαίο συμβάν
- Η κατασκευή δένδρων σφαλμάτων για μεγάλα συστήματα είναι μεγάλης έκτασης
- Οι συσχετισμοί μεταξύ βασικών συμβάντων δεν είναι εύκολο να μοντελοποιηθούν
- Συχνά απαιτείται η λήψη υποκειμενικών αποφάσεων (Altuwair, 2022).

Το δέντρο σφάλματος αναπτύσσεται ακολουθώντας τα παρακάτω βασικά βήματα:

Βήμα 1^ο: Καθορισμός του Κορυφαίου Συμβάντος: Αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί το “κορυφαίο συμβάν” του δέντρου για το οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Το συμβάν αυτό πρέπει να καθοριστεί επακριβώς καταγράφοντας τον τύπο της αστοχίας, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε και γενικά όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες που την οριοθετούν.

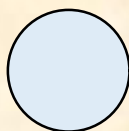
Βήμα 2^ο: Καθορισμός των Ενδιάμεσων Συμβάντων για το σχεδιασμό του δένδρου σφαλμάτων: Ακολούθως θα πρέπει να καθοριστούν τα “ενδιάμεσα συμβάντα”. Τα ενδιάμεσα συμβάντα αντιπροσωπεύουν τα βασικά αίτια της αστοχίας, τα οποία θα πρέπει να συνοδεύονται και αυτά από περεταίρω ανάλυση. Στη φάση αυτή ο μελετητής προκειμένου να καθοριστούν τα ανωτέρω, θα πρέπει να προσδιορίσει τα όρια των συνθηκών της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένου οροθετούνται:

- τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος τα οποία εν τέλει θα συμπεριληφθούν στην ανάλυση δέντρου και

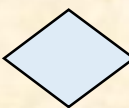
- ο βαθμός της λεπτομέρειας στον οποίο θα προχωρήσει ο μελετητής για να τακτοποιήσει τα πιθανά αίτια μιας κατάστασης αποτυχίας.

Ο μελετητής συνολικά θα πρέπει να “οδηγήσει” όλες τις αιτίες σε ενδιάμεσα ή στο βασικό συμβάν. Τα συμβάντα συνδέονται μεταξύ τους με την βοήθεια συμβόλων. Στο δέντρο σφάλματος εμφανίζονται τρεις βασικοί τύποι συμβόλων για τα γεγονότα, τις πύλες και τα σύμβολα μεταφοράς. Τα σύμβολα αυτά που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των συμβάντων, με την αντίστοιχη ερμηνεία τους, καταγράφονται στο Διάγραμμα 4.2 που ακολουθεί. Με βάση τα σύμβολα αυτά ολοκληρώνεται η επιμέρους διασύνδεση με το κορυφαίο συμβάν και σχεδιάζεται το δέντρο.

Γεγονότα Δέντρων Σφάλματος



Κορυφαίο Συμβάν. Δεν απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη ή επέκταση.



Μη αναπτυγμένο συμβάν. Είναι ένα γεγονός του οποίου οι συνεισφορές δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση, είτε επειδή θεωρείται περιττό, είτε επειδή δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες.



Ενδιάμεσο συμβάν. Είναι σφάλμα που προκαλείται από τους λογικούς συνδυασμούς άλλων συμβάντων που συμβαίνουν πιο κάτω στο δέντρο.



Κανονικό γεγονός. Δεν αντιπροσωπεύει κανένα σφάλμα και αποτελεί μέρος της ονομαστικής συμπεριφοράς του συστήματος.



Συμβάν προετοιμασίας. Δεν αντιπροσωπεύει απαραίτητα σφάλμα, χρησιμεύει όμως ως ειδική συνθήκη ή περιορισμός για ορισμένους τύπους πυλών.

Πύλες Δέντρων Σφάλματος



Η πύλη OR. Χρησιμοποιείται για να δείξει ένα σενάριο κατά το οποίο το γεγονός εξόδου της πύλης συμβαίνει αν συμβεί τουλάχιστον ένα από τα γεγονότα εισόδου. Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των γεγονότων εισόδου σε μια πύλη OR.



Η πύλη AND. Το γεγονός εξόδου της πύλης συμβαίνει αν συμβούν απαραίτητα όλα τα γεγονότα εισόδου. Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των γεγονότων εισόδου σε μια πύλη AND.



Η πύλη INHIBIT. Αποτελεί ειδική περίπτωση της πύλης AND και παράγει έξοδο όταν το μοναδικό γεγονός εισόδου της είναι αληθές παρουσία ενός γεγονότος προετοιμασίας.



Η πύλη XOR. Αποτελεί ειδική περίπτωση της πύλης OR και στις περισσότερες αναλύσεις δέντρων σφαλμάτων θεωρείται ως πύλη δύο εισόδων, όπου η έξοδος είναι αληθής εάν αληθεύει μόνο μία από τις εισόδους.

Σύμβολα Μεταφοράς Δέντρων Σφάλματος



Transfer In. Καθορίζει ότι το δέντρο αναπτύσσεται περαιτέρω και ο κλάδος που αντιστοιχεί σε αυτό το σύμβολο εμφανίζεται σε άλλη σελίδα.



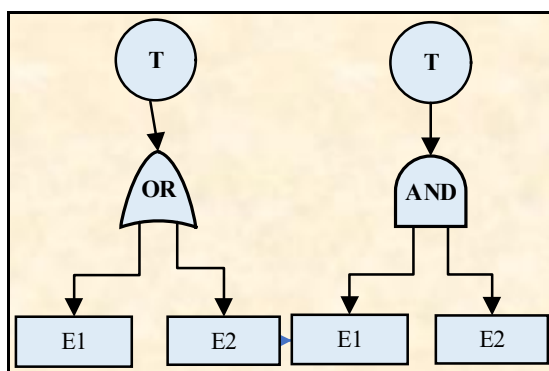
Transfer Out. Η συνέχεια του κλάδου του δέντρου από την προηγούμενη σελίδα του Transfer In.

Διάγραμμα 4.2: Συμβολισμοί Δέντρου Σφάλματος (Kabir, 2017)

Βήμα 3^ο: Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση: Μετά την κατασκευή ενός δέντρου σφαλμάτων, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται σε ποιοτικό και ποσοτικό επίπεδο. Η ποιοτική ανάλυση πραγματοποιείται συνήθως με αναγωγή των δέντρων σφαλμάτων σε ελάχιστα σύνολα αποκοπής, τα οποία είναι ένα αποσπασματικό σύνολο (συγκεκριμένη διαδρομή) του δέντρου που αποτελείται από τους μικρότερους συνδυασμούς βασικών συμβάντων που είναι απαραίτητα και κατάλληλα για να προκαλέσουν το κορυφαίο συμβάν.

Στην ποσοτική ανάλυση, η πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου συμβάντος υπολογίζεται μαθηματικά, έχοντας ως δεδομένες τις πιθανότητες των μεμονωμένων αιτιών εμφάνισης του συστήματος. Τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης δίνουν στους αναλυτές μια ένδειξη σχετικά με την αξιοπιστία του συστήματος και βοηθούν παράλληλα στον προσδιορισμό των επιμέρους στοιχείων του συστήματος που είναι πιο κρίσιμα. Με τον τρόπο αυτό οι αναλυτές μπορούν να δώσουν μεγαλύτερη έμφαση στα κρίσιμα στοιχεία, υποβάλλοντας το δυνατόν πιο εμπειριστατωμένες γνωμοδοτήσεις. Οι συνήθεις μέθοδοι ποσοτικοποίησης για τα κλασικά στατικά δέντρα σφαλμάτων δεν λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα στα δεδομένα αποτυχίας. Καθώς το αποτέλεσμα της ποσοτικής ανάλυσης εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την ακρίβεια των αριθμητικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, εάν οι αβεβαιότητες δεν επιλυθούν, τότε υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν παραπλανητικά αποτελέσματα.

Οι βασικές πύλες οι οποίες συνδέουν τα συμβάντα μεταξύ τους είναι η AND και η OR. Οι πιθανότητες των συμβάντων τα οποία προκύπτουν από την σύνδεση των πυλών αυτών παρατίθενται ακολούθως. Για την καλύτερη κατανόηση των σχέσεων παρατίθεται στο Διάγραμμα 4.3 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 4.3: Συνδέσεις γεγονότων με πύλες OR και AND

Έστω Κορυφαίο Συμβάν (T) και δυο ενδιάμεσα συμβάντα E_1 και E_2 , ανεξάρτητα μεταξύ τους τότε οι πιθανότητες εμφάνισης των συμβάντων T, E_1 και E_2 θα είναι $P(T)$, $P(E_1)$ και $P(E_2)$ αντίστοιχα. Προκειμένου να αποτυπωθούν οι σχέσεις, χρησιμοποιείται η Άλγεβρα Boole⁶, με την βοήθεια της οποίας οι σχέσεις μεταξύ των γεγονότων μεταφράζονται σε ένα ισοδύναμο σύνολο εξισώσεων.

Η πύλη OR αντιπροσωπεύει την ένωση των γεγονότων E_1 και E_2 στην πύλη. Για το κορυφαίο συμβάν T με δύο ενδιάμεσα συμβάντα εισόδου E_1 και E_2 που συνδέονται στην πύλη OR, η

⁶ Στην **Άλγεβρα Boole** οι τιμές των μεταβλητών είναι οι τιμές αληθείας (αληθές και ψευδές), που συνήθως αναπαρίστανται με 1 και 0 αντίστοιχα. Σε αντίθεση με την στοιχειώδη άλγεβρα όπου οι τιμές των μεταβλητών είναι αριθμοί και οι κύριες πράξεις είναι η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός, στην άλγεβρα Boole υπάρχουν τρεις κύριες πράξεις: η σύζευξη (συμβολίζεται: \cap), η διάζευξη (συμβολίζεται: \cup) και η άρνηση (συμβολίζεται: $-$).

πιθανότητα του κορυφαίου συμβάντος προκύπτει από την παρακάτω Εξίσωση 4.1, με την προϋπόθεση ότι τα E_1 και E_2 είναι αμοιβαία αποκλειόμενα γεγονότα.

$$P(T) = P(E_1) + P(E_2) \quad (4.1)$$

Στην γενική περίπτωση όπου υπάρχουν “n” ενδιάμεσα συμβάντα και η πιθανότητα εμφάνισης του ενδιάμεσου συμβάντος “i” είναι $P(T_i)$, τότε η πιθανότητα του Κορυφαίου Συμβάντος υπολογίζεται σύμφωνα με τη Εξίσωση 4.2.

$$P(T) = \sum_{i=1}^n (P(E_1) + P(E_2) + \dots + P(E_i)) \quad (4.2)$$

Η πύλη AND αντιπροσωπεύει την τομή των γεγονότων των γεγονότων E_1 και E_2 στην πύλη. Για το κορυφαίο συμβάν T με δύο ενδιάμεσα συμβάντα εισόδου E_1 και E_2 που συνδέονται στην πύλη AND, η πιθανότητα του κορυφαίου συμβάντος προκύπτει από την παρακάτω Εξίσωση 4.3, με την προϋπόθεση ότι τα E_1 και E_2 είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

$$P(T) = P(E_1) \times P(E_2) \quad (4.3)$$

Στην γενική περίπτωση όπου υπάρχουν “n” ενδιάμεσα συμβάντα και η πιθανότητα εμφάνισης του ενδιάμεσου συμβάντος “i” είναι $P(E_i)$, τότε η πιθανότητα του Κορυφαίου Συμβάντος υπολογίζεται σύμφωνα με τη Εξίσωση 4.4.

$$P(T) = \sum_{i=1}^n (P(E_1) \times P(E_2) \times \dots \times P(E_i)) \quad (4.4)$$

Η ποσοτική ανάλυση ενός δέντρου σφαλμάτων μπορεί να εκτιμήσει την πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου συμβάντος από τα πιθανότητες αστοχίας των ενδιάμεσων συμβάντων αστοχίας του συστήματος. Κατά τη διαδικασία της ποσοτικοποίησης, τα ενδιάμεσα συμβάντα συνήθως θεωρούνται στατιστικά ανεξάρτητα (Kabir, 2017; Δαρειωτάκη, 2016; Caraballo, 2002; Pandey, 2010).

4.5 Δένδρο Σφάλματος HIC

Με την βοήθεια της μεθόδου FTA, στο σημείο αυτό της εργασίας, θα πραγματοποιηθεί η απεικόνιση του φαινομένου της διάβρωσης λόγω παρουσίας H_2 στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ. Υπογραμμίζεται ότι η εμφάνιση και ανάπτυξη αυτού του είδους διάβρωσης απαιτεί την παρουσία ατομικού H_2 και κατάλληλου μηχανισμού έτσι ώστε τα άτομα H_2 να εισέλθουν στην χαλύβδινη επιφάνεια του αγωγού. Τα άτομα του H_2 διαχέονται μέσω του τοιχώματος του αγωγού και εγκλωβίζονται σε ετερογενείς θέσεις του χάλυβα. Αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής είναι η εμφάνιση ρωγμών και κυψελών H_2 στην επιφάνεια του τοιχώματος του αγωγού. Βασικοί παράγοντες εμφάνισης του φαινομένου είναι μεταλλουργικής και περιβαλλοντικής φύσεως. Η ταυτόχρονη, ορισμένες φορές, εμφάνιση αυτών των παραγόντων πυροδοτούν την εμφάνιση

ρωγμών και ως εκ τούτου την ανάπτυξη του φαινομένου. Οι βασικοί προαναφερθέντες παράγοντες συνοψίζονται παρακάτω:

- Η εξωτερική επίστρωση πολυαιθυλενίου να έχει υποστεί ζημιά
- Παραγωγή ατομικού H_2 στην επιφάνεια του αγωγού
- Παρουσία καθοδικών “δηλητηρίων” στο περιβάλλον
- Παρουσία, επιρρεπείς στον εγκλωβισμό H_2 , μικροδομής του χάλυβα και
- Στην διάδοση των ρωγμών κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού

Άλλοι επιπλέον παράγοντες που μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη του φαινομένου είναι οι ακόλουθοι:

- Επιθετικής φύσεως ιόντα, όπως τα χλωριούχα που έχουν απομείνει από τις αποθέσεις αλάτων συνδυαζόμενα με το H_2O παράγουν ατομικό H_2
- Ροή ρεύματος από το σύστημα καθοδικής προστασίας στην περιοχή της κατεστραμμένης επίστρωσης
- Το μέγεθος της αποκόλλησης ή της βλάβης στην προστατευτική επίστρωση

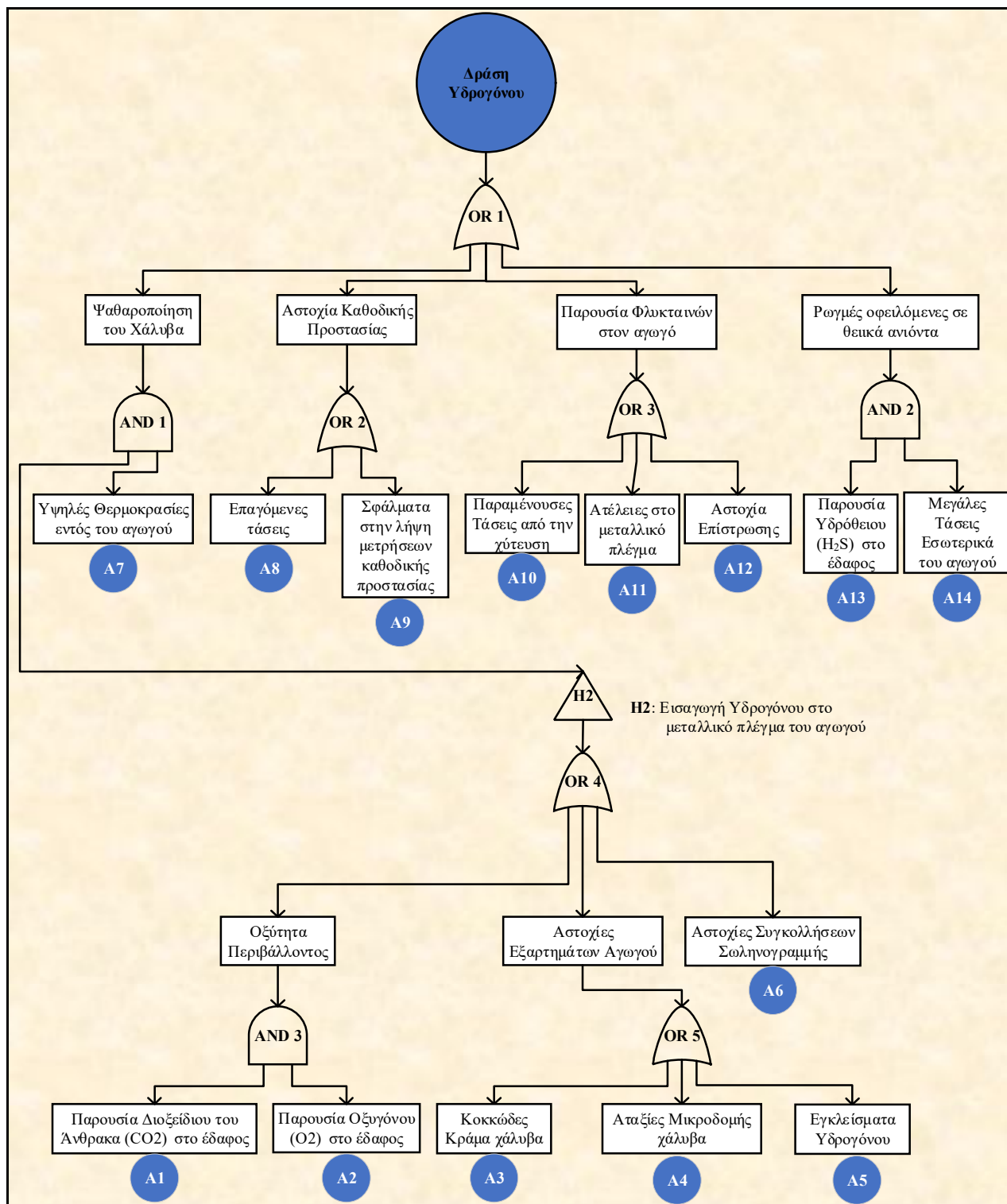
Οι μηχανισμοί με τους οποίους η συσσώρευση H_2 οδηγεί σε διάβρωση αναφέρονται ακολούθως:

- [1]. Ψαθυροποίηση (Embrittlement): Η παρουσία H_2 στο χάλυβα μειώνει την εφελκυστική του ιδιότητα και προκαλεί πρόωρη αστοχία υπό στατικά φορτία. Ο χάλυβας μπορεί να ψαθυροποιηθεί ακόμη και με παρουσία μικρής ποσότητας H_2 . Σε αντίθεση με άλλους τρόπους ρηγμάτωσης που υποβοηθούνται από το περιβάλλον, οι ρωγμές που προκαλούνται λόγω ψαθυροποίησης συνήθως δεν διακλαδίζονται μεταξύ τους. Επίσης η ρηγμάτωση λόγω ψαθυρότητας H_2 μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και εξαφανίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε χάλυβες άνω των $200\text{ }^\circ\text{C}$.
- [2]. Φλύκταινες (Blisterings): Όταν το H_2 απορροφάται από το μέταλλο και διαχέεται εσωτερικά, μπορεί να κατακρημνιστεί ως μοριακό H_2 , προκαλώντας αρκετή πίεση ώστε να δημιουργηθούν εσωτερικές ρωγμές. Εάν αυτές οι ρωγμές βρίσκονται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου, η πίεση του αερίου H_2 στις ρωγμές μπορεί να ανυψώσει και να διογκώσει το εξωτερικό στρώμα του μετάλλου, έτσι ώστε να μοιάζει με φλύκταινα.
- [3]. Επίθεση Υδρογόνου (Hydrogen Attack): Η προσβολή από H_2 μπορεί να εμφανιστεί σε χάλυβα που έχει εκτεθεί σε περιβάλλον H_2 υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης. Ο όρος "προσβολή" χρησιμοποιείται επειδή τα προσβεβλημένα συστήματα συνήθως δεν παρουσιάζουν σημάδια εξασθένησης πριν από την εμφάνιση της αστοχίας. Σε αντίθεση με την ψαθυροποίηση, η προσβολή από H_2 είναι ένα φαινόμενο υψηλής θερμοκρασίας επειδή εξαρτάται από τις υψηλές συγκεντρώσεις του H_2 που απορροφάται.

[4]. Ρωγμές από σχηματισμό Υδριδίων⁷ (Cracking From Hydride Formation): Τα μέταλλα που είναι ευαίσθητα στο σχηματισμό υδριδίων περιλαμβάνουν το τιτάνιο, το ταντάλιο, το ζirkόνιο, το ουράνιο και το θόριο. Το H₂ απορροφάται από αυτά τα μέταλλα σε υψηλές θερμοκρασίες, με σχηματισμό υδριδίων κατά την ψύξη. Τα σωματίδια υδριδίων τείνουν να αυξάνουν την αντοχή του μετάλλου ξενιστή, ενώ προκαλούν μείωση της ολκιμότητας.

Σε συνέχεια των ανωτέρω και σύμφωνα με την απεικονιστική μέθοδο που έχει επιλεγεί, το FTA για το φαινόμενο της HIC παρατίθεται στο Διάγραμμα 4.4 που ακολουθεί. Εκεί απεικονίζεται το κορυφαίο και τα ενδιάμεσα συμβάντα και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται. Η επιλογή των ανωτέρω στοιχείων και της συνδεσμολογίας του Δέντρου που το ακολουθεί, έχει προκύψει από την υφιστάμενη βιβλιογραφία και μετά την σύμφωνη γνώμη των Εμπειρογνομώνων με τους οποίους πραγματοποιήθηκε σχετική συζήτηση. Επίσης, τα ενδιάμεσα γεγονότα του FTA κωδικοποιούνται (A1, A2, A3, κ.τ.λ) με σχετική ονοματοδοσία η οποία αποτυπώνεται στο διάγραμμα (Hassannayebi, 2021; Whiteley, 2015; Louthan, 1978; Nikolic, 2020; Campari, 2023; Yuhua, 2004; Spanidis, 2010).

⁷ Στη χημεία, ένα **υδρίδιο (Hydride)** είναι το ανιόν του υδρογόνου, H⁻, ή ένα κράμα ή συνηθέστερα μια χημική ένωση στην οποία ένα ή περισσότερα κέντρα υδρογόνου έχουν πυρηνόφιλες, αναγωγικές ή βασικές ιδιότητες. Σε ενώσεις που θεωρούνται ως υδρίδια, το υδρογόνο συνδέεται με ένα πιο ηλεκτροθετικό στοιχείο ή ομάδα. Οι ενώσεις που περιέχουν υδρογόνο ενωμένο με μέταλλα ή μεταλλοειδή μπορεί επίσης να αναφέρονται ως υδρίδια, αν και σε αυτήν την περίπτωση τα κέντρα υδρογόνου μπορεί να έχουν όξινο χαρακτήρα. (Wikipedia)



Διάγραμμα 4.4: Δέντρο Σφάλματος HIC

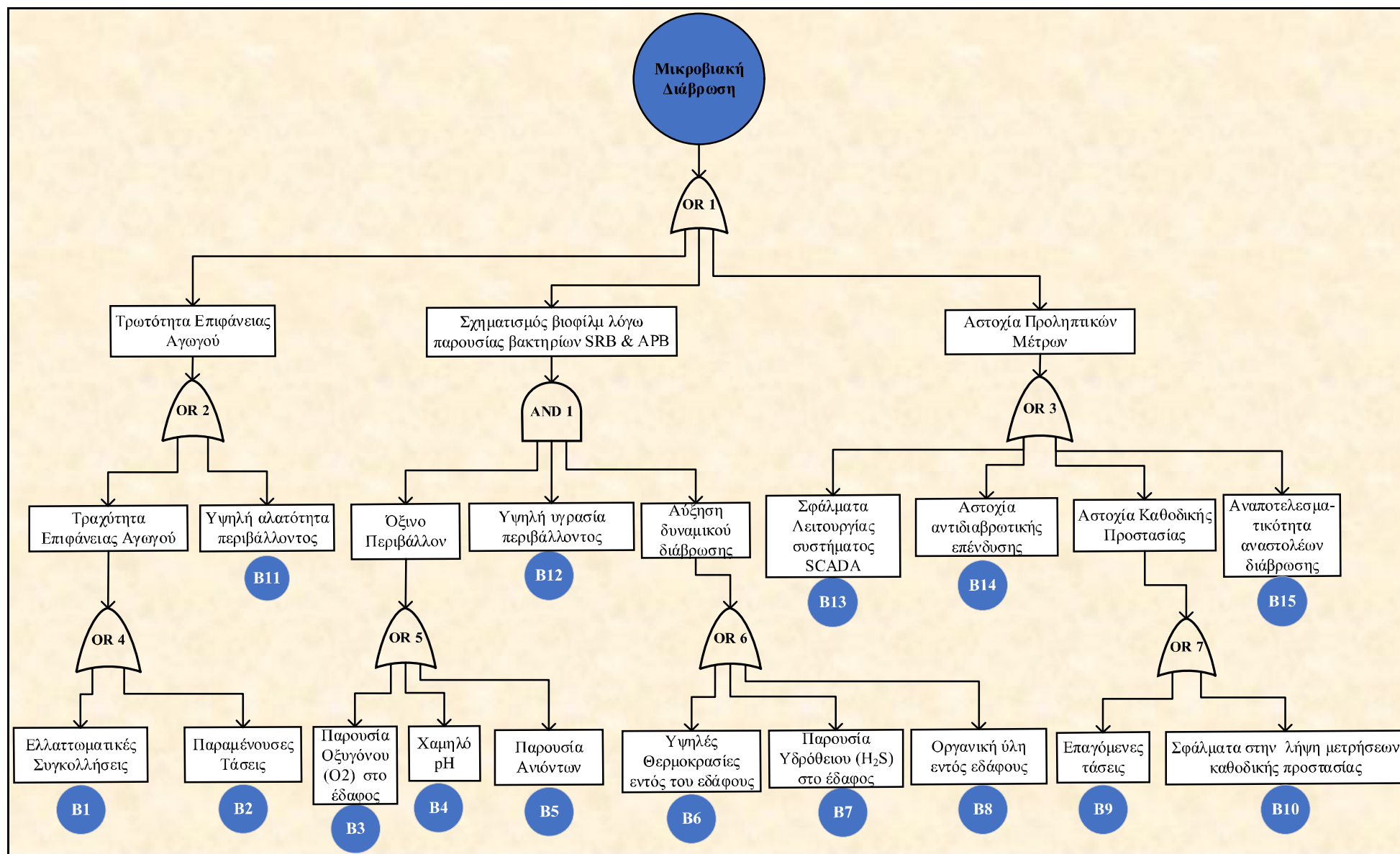
4.6 Δένδρο Σφάλματος MIC

Σε συνέχεια της HIC, ακολουθεί η απεικόνιση της MIC η οποία είναι αποτέλεσμα συνεργιστικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της μεταλλικής επιφάνειας, του διαλύματος και των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται. Δεν αποτελεί μεμονωμένο μηχανισμό διάβρωσης και σε πολλές περιπτώσεις γίνεται ελάχιστα κατανοητή. Η παρουσία μικροοργανισμών, σε ορισμένες συγκεντρώσεις και μορφές, στα υπόγεια συστήματα μεταφοράς ΦΑ έχουν αναφερθεί ως “επιταχυντές” του ρυθμού διάβρωσης, οδηγώντας σε αστοχίες του συστήματος και απώλεια παραγωγής.

Δύο σημαντικές ομάδες βακτηρίων για την ανάπτυξη του φαινομένου είναι τα βακτήρια που μειώνουν τα θειικά άλατα (SRB) και τα βακτήρια που παράγουν οξύ (APB). Αναλυτικές αναφορές για αυτά τα είδη βακτηρίων πραγματοποιήθηκε στην Παράγραφο 3.2 της εργασίας. Οι κατηγορίες αυτές των βακτηρίων επηρεάζονται άμεσα από συγκεκριμένους παράγοντες οι οποίες θεωρούνται θεμελιώδεις για την ανάπτυξη του φαινομένου και αναπτύσσονται κάτωθι:

- [1]. Θερμοκρασία στην επιφάνεια του αγωγού: Η βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης των βακτηρίων SRB, σύμφωνα με τις έως τώρα μελέτες προσδιορίζεται μεταξύ 25ο C και 45ο C. Σε αυτό το εύρος τιμών ευνοείται πολύ περισσότερο η ανάπτυξη και ο πολλαπλασιασμός αυτών των βακτηρίων.
- [2]. Το pH του εδάφους: Η οξύτητα του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο και πιο συγκεκριμένα τα όξινα περιβάλλοντα έχουν θετικό πρόσημο στην ανάπτυξη του φαινομένου.
- [3]. Εισροή O₂: Υπάρχουν περιπτώσεις εισαγωγής ποσοτήτων O₂ μαζί με το ΦΑ, προερχόμενο από την έγχυση χημικών ουσιών ή μέσω λάθους απομόνωσης εξαρτημάτων σωληνώσεων (βάνες, βαλβίδες κ.τ.λ). Υπό κανονικές συνθήκες, το O₂ δεν υπάρχει στο ρεύμα παραγωγής, αλλά μπορεί να εισαχθεί από την έγχυση χημικών ουσιών ή μέσω ατελώς σφραγισμένων εξαρτημάτων (π.χ. βαλβίδες, αντλίες, συμπιεστές). Τα βακτήρια οξειδωσης θεικών αλάτων, δραστηριοποιούνται έντονα παρουσία O₂. Δηλαδή, τα αερόβια μικρόβια στα ανώτερα στρώματα του βιοφίλμ καταναλώνουν O₂ παράγοντας ταυτόχρονα θρεπτικά συστατικά που μπορούν να αξιοποιήσουν τα SRP βακτήρια τα οποία είναι αναερόβια. Έτσι, η δραστηριότητα του φαινομένου στην επιφάνεια του μετάλλου αυξάνεται με την εισροή O₂.
- [4]. Ευπάθεια της μεταλλικής επιφάνειας: Επηρεάζεται πολλές φορές από την παρουσία υγρασία και την τραχύτητα που εμφανίζεται λόγω ατελών συγκολλήσεων ή παρουσία υγρασίας.
- [5]. Εξίσου σημαντικοί παράγοντες με επίπτωση στο φαινόμενο είναι η ταχύτητα ροής του αερίου, η εσωτερική επίστρωση του αγωγού και η απουσία χρήσης ξεστροπαγίδων.

Σε συνέχεια των ανωτέρω και σύμφωνα με την απεικονιστική μέθοδο που έχει επιλεγεί, το FTA για το φαινόμενο της MIC παρατίθεται στο Διάγραμμα 4.5. Εκεί απεικονίζεται το κορυφαίο και τα ενδιάμεσα συμβάντα και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται. Η επιλογή των ανωτέρω στοιχείων και της συνδεσμολογίας του Δέντρου που το ακολουθεί, έχει προκύψει από την υφιστάμενη βιβλιογραφία και μετά την γνωμοδότηση των Εμπειρογνομόνων με τους οποίους πραγματοποιήθηκε σχετική συνέντευξη. Επίσης, τα ενδιάμεσα γεγονότα του FTA κωδικοποιούνται (B1, B2, B3, κ.τ.λ) με σχετική ονοματοδοσία η οποία αποτυπώνεται στο διάγραμμα (Hassannayebi, 2021; Whiteley, 2015; Louthan, 1978; Nikolic, 2020; Campari, 2023; Yuhua, 2004; Spanidis, 2010).



Διάγραμμα 4.5: Δέντρο Σφάλματος MIC

4.7 Δένδρο Σφάλματος SCC

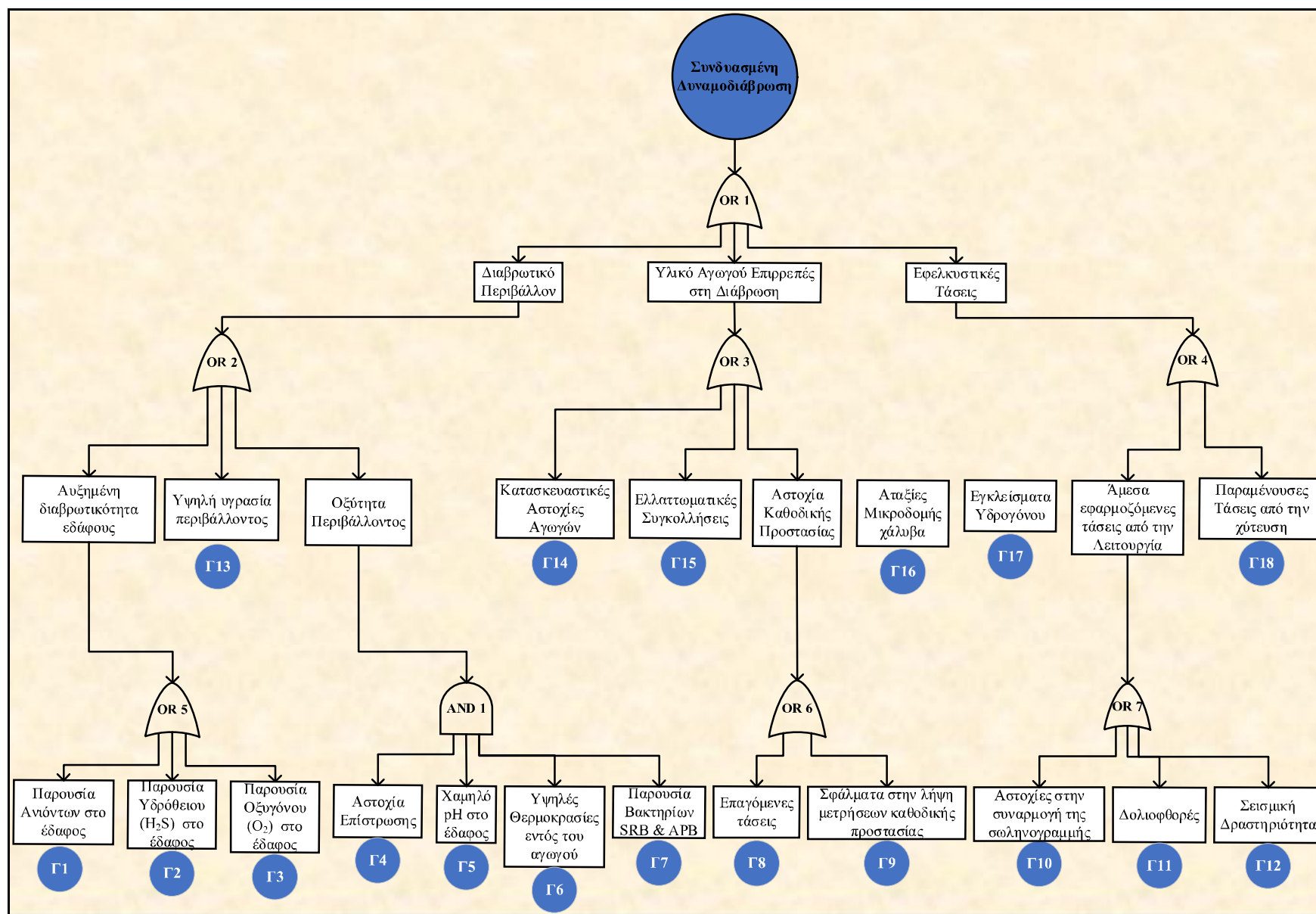
Η τρίτη κατηγορία διάβρωσης υπόγειων αγωγών μεταφοράς ΦΑ, την οποία διερευνά η παρούσα εργασία είναι αυτή της SCC, η ανάλυση της οποίας έχει προηγηθεί στην Παράγραφο 3.3 της εργασίας. Η ανάπτυξη της SCC απαιτεί την ταυτόχρονη ύπαρξη διαβρωτικού περιβάλλοντος, επιρρεπές στη διάβρωση επιφάνεια αγωγού και παρουσία εφελκυστικών δυνάμεων στο περιβάλλον του αγωγού.

Οι καθοριστικοί παράγοντες οι οποίοι κυρίως ευθύνονται για την ανάπτυξη του φαινομένου είναι οι:

- [1]. Η παρουσία περιβάλλοντος με χαμηλό pH, πυροδοτεί διακοκκική ρηγμάτωση, η οποία επιδεινώνεται περαιτέρω από την παρουσία βακτηρίων που μειώνουν τα θειικά άλατα, προκαλώντας ρήξη. Σημαντική συμβολή στο φαινόμενο έχουν τα υπόγεια ύδατα με την βοήθεια των οποίων παράγεται CO₂ από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Προσβάλλονται κυρίως οι θέσεις των αποκολλημένων επικαλύψεων του αγωγού. Στην περίπτωση του σχετικά ουδέτερου pH οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 5 έως 7.
- [2]. Η παρουσία χημικών παραγόντων όπως του CO₂, H₂S, και O₂ υπό συγκεκριμένες συνθήκες και σύσταση καθιστούν το περιβάλλον ακόμη πιο φιλικό για την ανάπτυξη του φαινομένου της διάβρωσης.
- [3]. Οι τάσεις(δυνάμεις) αποτελούν μια από τις βασικές προϋποθέσεις εμφάνισης αυτού του είδους διάβρωσης. Διαχωρίζονται σε άμεσα εφαρμοζόμενες λόγω συγκέντρωσης τάσεων από ρωγμές και σε παραμένουσες τάσεις προερχόμενες από το στάδιο της κατασκευής του αγωγού (π.χ ψυχρή κατεργασία)
- [4]. Άλλοι παράγοντες, όπως ορισμένοι τύποι ελαττωματικών συγκολλήσεων, ιδίως οι χαμηλής συχνότητας συγκολλητοί σωλήνες είναι συστηματικά ευάλωτοι, καθώς και τα μεταλλικά εγκλείσματα έχουν συσχέτιση με το φαινόμενο. Επίσης αιτίες κατασκευαστικής φύσεως όπως εγγενή ελαττώματα του αγωγού λόγω κακών κραμάτων χάλυβα, χτυπήματα και βαθουλώματα στους αγωγούς. Αιτίες έχουν εντοπιστεί επίσης και σχετίζονται με την κατασκευή του συστήματος διανομής, όπως αστοχίες στη συγκόλληση των τμημάτων των αγωγών και των εξαρτημάτων.
- [5]. Ανθρωπογενείς παράγοντες μπορεί να προκύψουν ανά πάσα στιγμή, προερχόμενες από τη χρήση γης, ατυχή περιστατικά(π.χ καταπάτηση γης, αγροτικές εργασίες κ.α.) ακόμη και δολιοφθορές.

Σε συνέχεια των ανωτέρω και σύμφωνα με την απεικονιστική μέθοδο που έχει επιλεγεί, το FTA για το φαινόμενο της SCC παρατίθεται στο Διάγραμμα 4.6, στο τέλος της παραγράφου. Εκεί απεικονίζεται το κορυφαίο και τα ενδιάμεσα συμβάντα και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται. Η

επιλογή των ανωτέρω στοιχείων και της συνδεσμολογίας του Δέντρου που το ακολουθεί, έχει προκύψει από την υφιστάμενη βιβλιογραφία και μετά την γνωμοδότηση των Εμπειρογνομόνων με τους οποίους πραγματοποιήθηκε σχετική συνέντευξη. Επίσης, τα ενδιάμεσα γεγονότα του FTA κωδικοποιούνται (Γ1, Γ2, Γ3, κ.τ.λ) με σχετική αναφορά στο σχετικό διάγραμμα (Hassannayebi, 2021; Whiteley, 2015; Louthan, 1978; Nikolic, 2020; Campari, 2023; Yuhua, 2004; Spanidis, 2010).



Διάγραμμα 4.6: Δέντρο Σφάλματος SCC

4.8 Μελέτη Περίπτωσης (Case Study)

4.8.1 Εισαγωγικά – Οριοθέτηση της Μελέτης Περίπτωσης

Στην Μελέτη Περίπτωσης της εργασίας θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση αστοχιών υπόγειου αγωγού μεταφοράς ΦΑ. Αρχικά παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του αγωγού. Έπειτα θα υπολογιστούν οι πιθανότητες εμφάνισης των τριών (3) κύριων φαινομένων διάβρωσης της εργασίας στον συγκεκριμένο αγωγό, όπως αυτές προκύπτουν από τα Δέντρα Σφάλματος. Ακολούθως θα εξεταστούν τρία (3) είδη αστοχιών του αγωγού με γενεσιουργά αίτια τα αντίστοιχα τρία (3) είδη διάβρωσης. Θα ακολουθήσει επίσης εκτίμηση του κόστους αποκατάστασης των προτεινόμενων διορθωτικών ενεργειών για κάθε αστοχία. Οι προτεινόμενες διορθωτικές ενέργειες προέρχονται από τους Εμπειρογνώμονες λαμβάνοντας υπόψη την σχετική βιβλιογραφία. Τέλος θα διενεργηθεί ανάλυση κινδύνου των ανωτέρω αστοχιών, με σκοπό την ιεράρχηση των κινδύνων, προκυμμένου να αποφασιστεί τελικά ο τρόπος αντιμετώπισης κάθε αστοχίας.

4.8.2 Δεδομένα Αγωγού Μελέτης Περίπτωσης

Στην Μελέτη Περίπτωσης της εργασίας έχει επιλεγεί υπόγειος αγωγός μεταφοράς ΦΑ εξωτερικής διαμέτρου 36in ο οποίος αποτελεί κλάδο κεντρικού αγωγού και τροφοδοτεί αποκλειστικά βιομηχανικούς πελάτες, μήκους 1km. Πρόκειται για αγωγό από ανθρακούχο χάλυβα και μετρά 35 έτη λειτουργίας. Επίσης στα πλαίσια των αναγκαίων εργασιών συντήρησης, ο διαχειριστής του αγωγού διαθέτει συμβόλαιο με εργολαβική εταιρεία προκειμένου να καλύψει όλες τις απαιτούμενες εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης του αγωγού. Αναλυτικά όλα τα απαραίτητα στοιχεία τεχνοοικονομικά στοιχεία και οι παράμετροι του εν λόγω αγωγού παρατίθενται στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

a/a	Χαρακτηριστικά Αγωγού Μελέτης Περίπτωσης		
1.0	Δεδομένα Σχεδιασμού	Τιμή Μονάδας	Τιμή
1.1	Μήκος αγωγού Μελέτης Περίπτωσης	km	1
1.2	Εξωτερική Διάμετρος	in	36
1.3	Πάχος Τοιχώματος	in	0,81
1.4	Υλικό Κατασκευής / Κλάση Πίεσης	Carbon steel / CL600/PN100	
1.5	Κώδικας σχεδιασμού	EN 1594	
1.6	Θερμοκρασία Σχεδιασμού	°C	-20 / +50
1.7	Corrosion Allowance	mm	0,5
1.8	Εξωτερική Επένδυση Προστασίας	3LPP (Μονωτική Επένδυση Τριών Στρωμάτων Πολυαιθυλενίου ή Πολυπροπυλενίου)	
1.9	Εσωτερική Επένδυση Προστασίας	Epoxy (Εσωτερική Επένδυση Εποξειδικής Βαφής)	
1.10	Πίεση Σχεδιασμού	barg	80

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Χαρακτηριστικά Αγωγού Μελέτης Περίπτωσης			
α/α	Δεδομένα Σχεδιασμού	Τιμή Μονάδας	Τιμή
1.11	Ελάχιστο Όριο Διαρροής (SMYS)	kg/cm ²	4.942,5
1.12	Τύπος Συστήματος Καθοδικής Προστασίας	Επιβαλλόμενου Ρεύματος (Impressed Current)	
1.13	Έτη λειτουργίας	έτη	35
2.0 Στοιχεία Επιθεώρησης			
2.1	Εσωτερική Επιθεώρηση (In Line Inspection)	έτη	ανά 3
2.2	Κατάσταση Εξωτερικής Επένδυσης	Καλή/Κακή	Ικανοποιητική
3.0 Περιβαλλοντικά Στοιχεία - Έδαφος			
3.1	Τύπος εδάφους	-χαμηλής ποιότητας -πλούσιες οργανικές ουσίες -μέτρια δυνατότητα αποστράγγισης -επιρρεπές στη MIC	
3.2	Ειδική αντίσταση εδάφους	Ohm.cm	1.000
3.3	Ελάχιστη κάλυψη (φυτική γη)	m	0,3
3.4	Κάλυψη έως την ανωτέρα στάθμη του αγωγού	m	0,5
3.5	Βάθος τοποθέτησης	m	2,1
3.6	Ευκολία πρόσβασης σε Οδικό δίκτυο	ΝΑΙ/ΟΧΙ	ΝΑΙ
4.0 Ταυτότητα Πελατών			
4.1	Πελάτες	Παρακείμενη Βιομηχανική Περιοχή	
4.2	Συμβολαιοποιημένη ποσότητα ΦΑ	bcm/year	2
4.3	Τιμή Πώλησης ΦΑ	€/MWh _{th}	28,4

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Αγωγού Μελέτης Περίπτωσης

4.8.3 Υπολογισμός Πιθανοτήτων Εμφάνισης Διάβρωσης

Μετά τον σχεδιασμό των Δέντρων Ανάλυσης για τα τρία (3) φαινόμενα διάβρωσης τα οποία εξετάζει η παρούσα εργασία, θα πρέπει τα αίτια διάβρωσης των αστοχιών να βαθμονομηθούν σύμφωνα με την πιθανότητα εμφάνισής τους.

Ακολούθως θα υπολογιστούν οι πιθανότητες των ενδιάμεσων καθώς και των κορυφαίων συμβάντων κάθε δέντρου. Λαμβάνοντας υπόψη υφιστάμενες μελέτες και δεδομένα προερχόμενα από την βιβλιογραφία (Wasim, 2018) όπου καταγράφονται ενδεικτικές κατανομές πιθανοτήτων αιτιών διάβρωσης υπόγειων αγωγών μεταφοράς ΦΑ και παρατίθεται στην Εικόνα 4.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1: Κατανομή Πιθανοτήτων Αιτιών Διάβρωσης (Wasim, 2018)

Επίσης σύμφωνα με την βιβλιογραφική αναφορά (Yuhua, 2004) καταγράφεται παρόμοια βαθμονόμηση αιτιών εμφάνισης φαινομένων διάβρωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι προαναφερθείσες συχνότητες της βιβλιογραφικής αναφοράς (Yuhua, 2004) δεν αποτελούν πιθανότητες, αλλά καταγράφονται ως συντελεστές βαρύτητας. Επίσης και η αναφορά (Debray, 2004) παραθέτει σχετική κατανομή των αιτιών εκδήλωσης αστοχιών και συνηγορεί με τις προαναφερθείσες αναφορές.

Οι πιθανότητες των αιτιών εμφάνισης των φαινομένων διάβρωσης οριστικοποιούνται μετά από σχετική γνωμοδότηση των Εμπειρογνομώνων, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης και έχοντας στη διάθεσή τους τις προαναφερθείσες βιβλιογραφικές αναφορές. Η γνωμοδότησή τους είναι καθαρά εμπειρική και απορρέει από την πολύχρονη εμπειρία τους και τον όγκο των περιστατικών που έχουν κληθεί να αντιμετωπίσουν για της ανάγκες του δικτύου ΦΑ στην Ελλάδα.

Με την βοήθεια λοιπόν των Εμπειρογνομώνων, λαμβάνοντας υπόψη και τις βιβλιογραφικές αναφορές, οριστικοποιούνται οι ποσοτικές κατανομές των αιτιών διάβρωσης των Δέντρων Σφάλματος για τον αγωγό της Μελέτης Περίπτωσης. Συνεπώς προκύπτουν οι Πίνακες Πιθανοτήτων Ενδιάμεσων Γεγονότων των αιτιών διάβρωσης και πιο συγκεκριμένα οι Πίνακες 4.2, 4.3 και 4.4 για τις περιπτώσεις των HIC, MIC και SCC αντίστοιχα. Για τις ανάγκες των υπολογισμών των πιθανοτήτων που ακολουθούν, υπολογίζεται ο Μέσος Όρος (Μ.Ο) των γνωμοδοτήσεων των Εμπειρογνομώνων.

Αξιολόγηση Πιθανοτήτων Ενδιάμεσων Γεγονότων από τους Εμπειρογνώμονες για το Δέντρο της HIC					
Αιτίες Διάβρωσης (Ενδιάμεσα Συμβάντα)		Γνωμοδότηση Εμπειρογνώμων-Πιθανότητες			
		1ος	2ος	3ος	Μέσος Όρος
A1	Παρουσία Διοξειδίου του Ανθρακα (CO ₂) στο έδαφος	0,160	0,190	0,190	0,180
A2	Παρουσία Οξυγόνου (O ₂) στο έδαφος	0,060	0,100	0,080	0,080
A3	Κοκκώδες Κράμα χάλυβα	0,040	0,030	0,020	0,030
A4	Αταξίες Μικροδομής χάλυβα	0,080	0,040	0,030	0,050
A5	Εγκλείσματα Υδρογόνου	0,110	0,120	0,070	0,100
A6	Αστοχίες Συγκολλήσεων Σωληνογραμμής	0,050	0,150	0,040	0,080
A7	Υψηλές Θερμοκρασίες εντός του αγωγού	0,090	0,050	0,160	0,100
A8	Επαγόμενες τάσεις	0,050	0,020	0,050	0,040
A9	Σφάλματα στην λήψη μετρήσεων καθοδικής προστασίας	0,050	0,020	0,020	0,030
A10	Παραμένουσες Τάσεις από την χύτευση	0,040	0,000	0,020	0,020
A11	Ατέλειες στο μεταλλικό πλέγμα	0,040	0,010	0,040	0,030
A12	Αστοχία Επίστρωσης	0,040	0,000	0,020	0,020
A13	Παρουσία Υδρόθειου (H ₂ S) στο έδαφος	0,120	0,180	0,150	0,150
A14	Μεγάλες Τάσεις Εσωτερικά του αγωγού	0,070	0,090	0,110	0,090
Σύνολα:		1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας 4.2: Πιθανότητες αιτιών διάβρωσης για το Δέντρο HIC

Αξιολόγηση Πιθανοτήτων Ενδιάμεσων Γεγονότων από τους Εμπειρογνώμονες για το Δέντρο της MIC					
Αιτίες Διάβρωσης (Ενδιάμεσα Συμβάντα)		Γνωμοδότηση Εμπειρογνώμων-Πιθανότητες			
		1ος	2ος	3ος	Μέσος Όρος
B1	Ελλατωματικές Συγκολλήσεις	0,050	0,010	0,030	0,030
B2	Παραμένουσες Τάσεις	0,030	0,010	0,020	0,020
B3	Παρουσία Οξυγόνου (O ₂) στο έδαφος	0,100	0,070	0,070	0,080
B4	Χαμηλό pH	0,090	0,120	0,090	0,100
B5	Παρουσία Ανιόντων	0,100	0,080	0,090	0,090
B6	Υψηλές Θερμοκρασίες εντός του εδάφους	0,080	0,120	0,100	0,100
B7	Παρουσία Υδρόθειου (H ₂ S) στο έδαφος	0,100	0,110	0,210	0,140
B8	Οργανική ύλη εντός εδάφους	0,080	0,110	0,110	0,100
B9	Επαγόμενες τάσεις	0,020	0,030	0,010	0,020
B10	Σφάλματα στην λήψη μετρήσεων καθοδικής προστασίας	0,040	0,030	0,020	0,030
B11	Υψηλή αλατότητα περιβάλλοντος	0,070	0,050	0,030	0,050
B12	Υψηλή υγρασία περιβάλλοντος	0,120	0,190	0,140	0,150
B13	Σφάλματα Λειτουργίας συστήματος SCADA	0,030	0,050	0,040	0,040
B14	Αστοχία αντιδιαβρωτικής επένδυσης	0,050	0,010	0,030	0,030
B15	Αναποτελεσματικότητα αναστολέων διάβρωσης	0,040	0,010	0,010	0,020
Σύνολα:		1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας 4.3: Πιθανότητες αιτιών διάβρωσης για το Δέντρο MIC

Αξιολόγηση Πιθανοτήτων Ενδιάμεσων Γεγονότων από τους Εμπειρογνώμονες για το Δέντρο της SCC						
Αιτίες Διάβρωσης (Ενδιάμεσα Συμβάντα)		Γνωμοδότηση Εμπειρογνώμων-Πιθανότητες				
		1ος	2ος	3ος	Μέσος Όρος	
Γ1	Παρουσία Ανιόντων στο έδαφος	0,030	0,020	0,010	0,020	
Γ2	Παρουσία Υδρόθειου (H ₂ S) στο έδαφος	0,070	0,030	0,020	0,040	
Γ3	Παρουσία Οξυγόνου (O ₂) στο έδαφος	0,080	0,040	0,030	0,050	
Γ4	Αστοχία Επίστρωσης	0,045	0,030	0,036	0,037	
Γ5	Χαμηλό pH στο έδαφος	0,120	0,080	0,100	0,100	
Γ6	Υψηλές Θερμοκρασίες εντός του αγωγού	0,170	0,210	0,154	0,178	
Γ7	Παρουσία Βακτηρίων SRB & APB	0,250	0,290	0,360	0,300	
Γ8	Επαγόμενες τάσεις	0,050	0,030	0,040	0,040	
Γ9	Σφάλματα στην λήψη μετρήσεων καθοδικής προστασίας	0,020	0,050	0,020	0,030	
Γ10	Αστοχίες στην συναρμογή της σωληνογραμμής	0,010	0,020	0,030	0,020	
Γ11	Δολιοφθορές	0,015	0,005	0,010	0,010	
Γ12	Σεισμική Δραστηριότητα	0,005	0,010	0,000	0,005	
Γ13	Υψηλή υγρασία περιβάλλοντος	0,070	0,135	0,095	0,100	
Γ14	Κατασκευαστικές Αστοχίες Αγωγών	0,005	0,005	0,005	0,005	
Γ15	Ελλατωματικές Συγκολλήσεις	0,010	0,005	0,003	0,006	
Γ16	Αταξίες Μικροδομής χάλυβα	0,020	0,010	0,012	0,014	
Γ17	Εγκλείσματα Υδρογόνου	0,020	0,010	0,012	0,014	
Γ18	Παραμένουσες Τάσεις από την χύτευση	0,010	0,020	0,063	0,031	
Σύνολο:		1,000	1,000	1,000	1,000	

Πίνακας 4.4: Πιθανότητες αιτιών διάβρωσης για το Δέντρο της SCC

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης των τριών (3) φαινομένων διάβρωσης για κάθε δέντρο. Πιο συγκεκριμένα θα υπολογιστούν οι πιθανότητες εμφάνισης των ενδιάμεσων συμβάντων στις πύλες σύνδεσης και τέλος η πιθανότητα του κορυφαίου συμβάντος κάθε δέντρου. Επομένως για το δέντρο σφάλματος:

➤ HIC

Η πιθανότητα εμφάνισης HIC, δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου συμβάντος του δέντρου του Διαγράμματος 4.4 έστω P(HIC), υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.5 ως κάτωθι:

$$\begin{aligned}
 P(\text{HIC}) &= P(\text{OR}_1) = P(\text{AND}_1) + P(\text{OR}_2) + P(\text{OR}_3) + P(\text{AND}_2) = \\
 &= P(\text{OR}_4) \times P(A_7) + [P(A_8) + P(A_9)] + [P(A_{A10}) + P(A_{11}) + P(A_{12})] + [P(A_{13}) \times P(A_{14})] = \\
 &= [P(\text{AND}_3) + P(\text{OR}_5) + P(A_6)] \times P(A_7) + [P(A_8) + P(A_9)] + [P(A_{A10}) + P(A_{11}) + P(A_{12})] + \\
 & \quad [P(A_{13}) \times P(A_{14})] = \\
 &= \{[P(A_1) \times P(A_2)] + [P(A_3) + P(A_4) + P(A_5)] + P(A_6)\} \times P(A_7) + [P(A_8) + P(A_9)] + \\
 & \quad + [P(A_{A10}) + P(A_{11}) + P(A_{12})] = \{[0.18 \times 0.08]\} + [0.03 + 0.05 + 0.1] + 0.08 \times 0.1
 \end{aligned}$$

$$+[0.04 + 0.03] + [0.02 + 0.03 + 0.02] + [0.15 \times 0.09] = 0,1809 \quad (4.5)$$

Επομένως η πιθανότητα εμφάνισης της HIC υπολογίζεται ότι είναι $P(HIC) = P(OR_1) = 0,1809$, δηλαδή 18,09%. Επίσης οι πιθανότητες των ενδιάμεσων συμβάντων, σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς είναι:

- $P(\Psiαθυροποίησης \text{ του Χάλυβα}) = P(AND_1) = 0,027 (2,7\%)$
- $P(\text{Αστοχίας Καθοδικής Προστασίας}) = P(OR_2) = 0,070 (7\%)$
- $P(\text{Παρουσίας Φλукταινών στον αγωγό}) = P(OR_3) = 0,070 (7\%)$
- $P(\text{Ρωγμών οφειλόμενες σε θεικά ανιόντα}) = P(AND_2) = 0,014 (1,4\%)$
- $P(\text{Εισαγωγής Υδρογόνου στο μεταλλικό πλέγμα του αγωγού}) = P(OR_4) = 0,274 (27,4\%)$
- $P(\text{Οξύτητας Περιβάλλοντος}) = P(AND_3) = 0,014 (1,4\%)$
- $P(\text{Αστοχιών Εξαρτημάτων Αγωγού}) = P(OR_5) = 0,180 (18\%)$

➤ MIC

Η πιθανότητα εμφάνισης της MIC, δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου συμβάντος του δέντρου του Διαγράμματος 4.5, έστω $P(MIC)$, υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.6 ως κάτωθι:

$$\begin{aligned} P(MIC) &= P(OR_1) = P(OR_2) + P(AND_1) + P(OR_3) = \\ &= [P(OR_4) + P(B_{11})] + [P(OR_5) \times P(B_{12}) \times P(OR_6)] + [P(B_{13}) + P(B_{14}) + P(OR_7) + P(B_{15})] = \\ &= [P(B_1) + P(B_2) + P(B_{11})] + \{ [P(B_3) + P(B_4) + P(B_5)] \times P(B_{12}) \times [P(B_6) + P(B_7) + P(B_8)] \} + \\ &+ \{ P(B_{13}) + P(B_{14}) + [P(B_9) + P(B_{10})] + P(B_{15}) \} = [0.03 + 0.02 + 0.05] + \\ &+ \{ [0.08 + 0.10 + 0.09] \times 0.15 \times [0.10 + 0.14 + 0.10] \} + \{ 0.04 + 0.03 + [0.02 + 0.03] + \\ &0.02 \} = 0,2538 \quad (4.6) \end{aligned}$$

Επομένως η πιθανότητα εμφάνισης MIC υπολογίζεται ότι είναι $P(MIC) = P(OR_1) = 0,2538$, δηλαδή 25,38%.

Επίσης οι πιθανότητες των ενδιάμεσων συμβάντων, σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς:

- $P(\text{Τρωτότητας Επιφάνειας Αγωγού}) = P(OR_2) = 0,100 (10\%)$
- $P(\text{Σχηματισμού βιοφίλμ λόγω παρουσίας βακτηρίων SRB \& APB}) = P(AND_1) = 0,014 (1,4\%)$
- $P(\text{Αστοχίας Προληπτικών Μέτρων}) = P(OR_3) = 0,140 (14\%)$
- $P(\text{Τραχύτητας Επιφάνειας Αγωγού}) = P(OR_4) = 0,050 (5\%)$
- $P(\text{Όξινου Περιβάλλοντος}) = P(OR_5) = 0,270 (27\%)$
- $P(\text{Αύξησης δυναμικού διάβρωσης}) = P(OR_6) = 0,340 (34\%)$
- $P(\text{Αστοχίας Καθοδικής Προστασίας}) = P(OR_7) = 0,050 (5\%)$

➤ SCC

Η πιθανότητα εμφάνισης της SCC, δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου συμβάντος του δέντρου του Διαγράμματος 4.6, έστω P(HIC), υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.7 ως κάτωθι:

$$\begin{aligned} P(SCC) &= P(OR_1) = P(OR_2) + P(OR_3) + P(OR_4) = \\ &= [P(OR_5) + P(\Gamma_{13}) + P(AND_1)] + [P(\Gamma_{14}) + P(\Gamma_{15}) + P(OR_6) + P(\Gamma_{16}) + P(\Gamma_{17})] + \\ &+ [P(OR_7) + P(\Gamma_{18})] = \\ &= [P(\Gamma_1) + P(\Gamma_2) + P(\Gamma_3) + P(\Gamma_{13}) + P(\Gamma_4) \times P(\Gamma_5) \times P(\Gamma_6) \times P(\Gamma_7)] + [P(\Gamma_{14}) + P(\Gamma_{15}) + \\ &+ [P(\Gamma_8) + P(\Gamma_9)] + P(\Gamma_{16}) + P(\Gamma_{17})] + \{[P(\Gamma_{10}) + P(\Gamma_{11}) + P(\Gamma_{12})] + P(\Gamma_{18})\} = [0,02 + 0,04 + \\ &0,05 + 0,1 + 0,037 \times 0,1 \times 0,178 \times 0,3] + [0,005 + 0,006 + 0,04 + 0,03 + 0,014 + 0,014] + \\ &\{[0,02 + 0,01 + 0,005] + 0,031\} = 0,3154 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Επομένως η πιθανότητα εμφάνισης SCC υπολογίζεται ότι είναι $P(SCC) = P(OR_1) = 0,3154$, δηλαδή 31,54%. Επίσης οι πιθανότητες των ενδιάμεσων συμβάντων, σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς:

- P(Διαβρωτικού Περιβάλλοντος) = $P(OR_2) = 0,2102$ (21,02%)
- P(Υλικού Αγωγού Επιρρεπούς στη Διάβρωση) = $P(OR_3) = 0,0392$ (3,92%)
- P(Εφελκυστικών Τάσεων) = $P(OR_4) = 0,0660$ (6,6%)
- P(Αυξημένης διαβρωτικότητας εδάφους) = $P(OR_5) = 0,1100$ (11%)
- P(Οξύτητας Περιβάλλοντος) = $P(AND_1) = 0,0002$ (0,02%)
- P(Αστοχίας Καθοδικής Προστασίας) = $P(OR_6) = 0,0700$ (7%)
- P(Άμεσα εφαρμοζόμενων τάσεις από την Λειτουργία) = $P(OR_7) = 0,0350$ (3,5%)

Οι παραπάνω πιθανότητες εκφράζουν τις πιθανότητες εμφάνισης καθενός από τα φαινόμενα των διαβρώσεων για τα δεδομένα του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης. Συνοψίζοντας, για τα τρία (3) φαινόμενα διάβρωσης οι πιθανότητες υπολογίζονται:

- **P(HIC) = 0,1809, δηλαδή 18,09%**
- **P(MIC) = 0,25377, δηλαδή 25,38%.**
- **P(SCC) = 0,3154, δηλαδή 31,54%.**

Να σημειωθεί ότι οι πιθανότητες αυτές είναι αυτόνομες και δεν λειτουργούν αθροιστικά.

4.8.4 Αστοχίες της Μελέτης Περίπτωσης

Τα τρία (3) είδη διάβρωσης τα οποία πραγματεύεται η εργασία ευθύνονται για σειρά αστοχιών οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν βλάβες μικρότερης ή μεγαλύτερης κλίμακας. Στα πλαίσια της Μελέτης Περίπτωσης και σύμφωνα με τους Εμπειρογνώμονες, γίνεται η παραδοχή ότι οι εν λόγω αστοχίες

έχουν ως βασικά γενεσιουργά αίτια, τα τρία (3) είδη διάβρωσης. Επομένως οι πιθανότητες εμφάνισης των φαινομένων διάβρωσης, οι οποίες υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, εκφράζουν τις πιθανότητες των αντίστοιχων αστοχιών. Να σημειωθεί επίσης ότι οι εν λόγω αστοχίες, σύμφωνα με τους Εμπειρογνώμονες, είναι και οι πλέον συνηθισμένες στα υπόγεια δίκτυα αγωγών μεταφοράς ΦΑ, τόσο ως προς το είδος όσο και την έντασή τους. Πιο συγκεκριμένα γίνεται οι παραδοχές ότι η:

- HIC προκαλεί αλλοιώσεις σε μια ραφή συγκόλλησης μεταξύ δυο (2) σωληνοαγωγών, χωρίς διαρροή ΦΑ (Αστοχία: F₁)
- MIC προκαλεί μερική υποβάθμιση στην εξωτερική μόνωση σε περιοχή τμήματος μήκους 50m του αγωγού, χωρίς διαρροή ΦΑ (Αστοχία: F₂)
- SCC προκαλεί διαμήκη ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια τμήματος μήκους 50m του αγωγού, χωρίς διαρροή ΦΑ (Αστοχία: F₃)

Στην εμφάνιση των ανωτέρω αστοχιών συνηγορούν και βιβλιογραφικές αναφορές όπως οι (Kostiv,2021; Baker,2008; Sasikorono, 2017; Perumal, 2014), ως αποτέλεσμα της εμφάνισης και εξάπλωσης των ειδών διάβρωσης που εξετάζει η παρούσα εργασία.

Στον Πίνακα 4.5 που ακολουθεί παρατίθενται οι περιγραφές των αστοχιών ανά βασικό γενεσιουργό αίτιο, τα βασικά αίτια εμφάνισης, ο τρόπος που εντοπίστηκαν και οι συνήθεις ενέργειες αποκατάστασης.

Αστοχίες της Μελέτης Περίπτωσης				
a/a	Περιγραφή	Γενεσιουργά Αίτια	Τρόπος Εντοπισμού	Προτεινόμενες Ενέργειες Αποκατάστασης
F ₁	Θρυμματισμοί και μικρορωγμές σε <u>μια</u> περίπτωση ραφής συγκόλλησης μεταξύ σωληνοαγωγών. Δεν εντοπίστηκε διαρροή ΦΑ.	Ως γενεσιουργό αίτιο της αστοχίας θεωρήθηκε η <u>HIC</u> . Διαγνώστηκε ως Εξωτερική Διάβρωση. Αναλυτικότερα στα σημεία συγκόλλησης μεταξύ δυο σωληνοαγωγών πραγματοποιήθηκε διάχυση H ₂ με αποτέλεσμα την παρουσία Ψαθυροποίησης (Embrittlement)	Εσωτερικός έλεγχος του αγωγού με ξεστροπαγίδες	Αντικατάσταση του κατεστραμμένου τμήματος της. Εργασίες εν θερμώ διάτρησης (hot tarring) με σκοπό την κατασκευή παράκαμψης (by pass) και σύνδεση νέου τμήματος αγωγού, χωρίς την διακοπή λειτουργίας του αγωγού.
F ₂	Σε περιοχή μήκους <u>50m</u> τμήματος του αγωγού εντοπίστηκε μερική υποβάθμιση και σποραδικές διαβρώσεις τύπου βελονισμού στην εξωτερική μόνωση. Δεν εντοπίστηκε διαρροή ΦΑ.	Ως γενεσιουργό αίτιο της αστοχίας θεωρήθηκε η <u>MIC</u> . Διαγνώστηκε ως Εξωτερική Διάβρωση. Αναλυτικότερα παρατηρήθηκε έντονη ανάπτυξη βακτηρίων τύπου SRB με αποτέλεσμα την εμφάνιση διάβρωσης χαραγής (crevice) και βελονισμού (pitting) στην επιφάνεια της επίστρωσης.	Ενδείξεις Μετρήσεων του Συστήματος Καθοδικής Προστασίας οδήγησαν σε απόφαση για δοκιμαστικές εκσκαφές για οπτικό έλεγχο.	Αντικατάσταση της εξωτερικής μόνωσης του αγωγού μήκους 50m, χωρίς διακοπή λειτουργίας.
F ₃	Σε περιοχή μήκους 50m τμήματος του αγωγού, εντοπίστηκαν διαμήκη ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια. Πολλές από τις ρωγμές ήταν ρηχές και συνεπώς χωρίς διαρροές, ενώ ορισμένες εξ' αυτών είχαν προκαλέσει πλήρη ρήξη του τοιχώματος του αγωγού. Δεν εντοπίστηκε διαρροή ΦΑ.	Ως γενεσιουργό αίτιο της αστοχίας θεωρήθηκε η <u>SCC</u> . Διαγνώστηκε ως Εσωτερική Διάβρωση. Αναλυτικότερα η παρουσία επιθετικού περιβάλλοντος (CO & CO ₂) σε συνδυασμό με την εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων εντός του αγωγού προκάλεσαν παρουσία ρωγμών.	Εσωτερικός έλεγχος του αγωγού με ξεστροπαγίδες.	Αντικατάσταση του κατεστραμμένου τμήματος 50m του αγωγού χωρίς διακοπή λειτουργίας. Εργασίες εν θερμώ διάτρησης (hot tarring) με σκοπό την κατασκευή παράκαμψης (by pass) και σύνδεση νέου τμήματος 50m αγωγού, χωρίς την διακοπή λειτουργίας του αγωγού.

Πίνακας 4.5: Σενάρια Αστοχιών του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα 4.5, οι ενέργειες αποκατάστασης για τις περιπτώσεις των αστοχιών F₁ και F₃ είναι η αντικατάσταση του αλλοιωμένου τμήματος του αγωγού και για την περίπτωση της αστοχίας F₂ η αντικατάσταση της εξωτερικής μονωτικής επίστρωσης τμήματος του αγωγού. Η αντικατάσταση τμήματος του αγωγού, για την περίπτωση αστοχιών F₁ και F₃, θεωρείται ασφαλής και εφαρμόζεται ευρέως ως διαδικασία ενώ το κατεστραμμένο τμήμα του σωλήνα αφαιρείται και αντικαθίσταται με νέο. Προκυμμένου να αποφευχθεί η διακοπή λειτουργίας του αγωγού, άρα η παροχή και πώληση ΦΑ με εξαιρετικά δυσάρεστες συνέπειες, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μονόδρομος η μέθοδος της εν θερμώ (hot tarring) διάτρησης και τοποθέτησης παρακαμπτήριου τμήματος (bypass). Μετά την εκτροπή της ροής του ΦΑ από την παράκαμψη, αντικαθίσταται το τμήμα του αγωγού που έχει υποστεί βλάβη με νέο. Τέλος η ροή επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση και η παράκαμψη αφαιρείται και απομακρύνεται από το κύκλωμα. Η

παράκαμψη αυτή τοποθετείται σε θέσεις πριν και μετά το κατεστραμμένο τμήμα, επιτρέποντας έτσι την αγωγό να παραμείνει σε λειτουργία (Farrag,2013). Για τον λόγο αυτό στις ενέργειες αποκατάστασης, στην περίπτωση των αστοχιών F₁ και F₃, συνηθίζεται η παραπάνω μεθοδολογία χωρίς την διακοπή παροχής ΦΑ.

Προκυμμένου να γίνει ξεκάθαρο ότι η παραπάνω πρακτική της εν θερμώ (hot tapping) διάτρησης, αν και είναι εξαιρετικά δαπανηρή υπόθεση, η διακοπή της παροχής ΦΑ έχει δυσμενέστερες οικονομικές συνέπειες με ότι άλλο αυτό συνεπάγεται(απώλεια εισοδήματος από την μη πώληση, οικονομικές ρήτρες, επίπτωση στη φήμη του διαχειριστή κ.τ.λ). Προς τούτο, στα πλαίσια της Μελέτης Περίπτωσης, διενεργούνται σχετικοί υπολογισμοί στην επόμενη Παράγραφο 4.8.5 οι οποίοι αποδεικνύουν την ορθότητα της πρακτικής αυτής. Να σημειωθεί ότι οι εν λόγω εργασίες εκτελούνται από εξειδικευμένα συνεργεία τα οποία διαθέτουν υψηλή τεχνογνωσία με ειδικό εξοπλισμό. Μια από τις πιο γνωστές εταιρίες στην οποία εμπιστεύονται την ανάθεση παρόμοιων εργασιών ο ΔΕΣΦΑ και η HELLENiQ Energy είναι η T.D. Williamson SA με έδρα την Αγγλία.

4.8.5 Υπολογισμός των επιπτώσεων των αστοχιών

Στην παρούσα φάση θα εκτιμηθεί το κόστος των προτεινόμενων ενεργειών αποκατάστασης όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί στην Παράγραφο 4.8.4 και πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 4.5. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα υπολογιστούν ως επιπτώσεις, τα κόστη των προτεινόμενων ενεργειών αποκατάστασης των αστοχιών F₁, F₂ και F₃.

Η Εκτίμηση Κόστους Αποκατάστασης των τριών (3) αστοχιών F₁, F₂ και F₃ αποτυπώνεται στους Πίνακες 4.6, 4.7 και 4.8 αντίστοιχα. Εκεί καταγράφεται αναλυτικά η αλληλουχία των ενεργειών που απαιτείται κατά περίπτωση. Να σημειωθεί ότι οι τιμές μονάδας των εργασιών οι οποίες προέρχονται από την γνώση και εμπειρία των Εμπειρογνομόνων, μέσα από την διαχείριση και επίβλεψη των εργασιών του εργολάβου αποκατάστασης και συντήρησης. Επίσης στους ίδιους πίνακες εκτός των υπολογισμών ανά εργασία παρατίθενται και σχετικές διευκρινήσεις τεχνικής φύσεως στη στήλη “Σχόλια-Παρατηρήσεις”. Επίσης τα ποσά που αναφέρονται είναι πλέον Φ.Π.Α.

Εκτίμηση Κόστους
Αποκατάσταση Αστοχίας F1: Αντικατάσταση μιας (1) ραφής συγκόλλησης του αγωγού

a/a	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Κόστος (€)	Σχόλια
1	Προμήθεια υλικών	1	m	470,0	470	Προμήθεια νέου προς αντικατάσταση τμήματος χαλυβδοσωλήνα
2	Απομάκρυνση θάμνων	280	m ²	0,5	140	Για ζώνη εργασίας 28mx10m
3	Απομόνωση περιοχής με προειδοποιητικό πλέγμα	76	lm	2,0	152	Περίφραξη για ζώνη εκσκαφών 28mx10m
4	Αφαίρεση επιφανειακού στρώματος εδάφους (φυτικής γης) πάχους 0,30 m	140	m ²	1,0	140	Για ζώνη εκσκαφών 28mx5m, απομάκρυνση του εδάφους φυτικής γης
5	Εκσκαφή σε βάθος έως 30cm πάνω από την ανώτερα στάθμη του αγωγού	10	m ³	8,5	85	Για ζώνη εκσκαφών 4mx5m και σε βάθος 0,5m (έως την ανώτερα στάθμη του αγωγού). Δηλαδή 4mx5mx0,5m
6	Εκσκαφή σε βάθος ικανό για την πλήρη αποκάλυψη του αγωγού (χωρίς χρήση μηχανημάτων)	4	m ³	31,5	126	Για ζώνη εκσκαφών 4mx5m και σε βάθος 1,3m. Δηλαδή 4mx5mx1,3m-(όγκος αγωγού)
7	Τοποθέτησης παρακαμπτήριου τμήματος(bypass) με εν θερμώ (hot tapping) διάτρηση	Εργασία			200.000	Εργασίες διάτρησης σε 4 σημεία στον αγωγό για την εγκατάσταση της παράκαμψης(bypass)
		Υλικά			220.000	Περιλαμβάνει εξαρτήματα όπως τυφλές φλάτζες(blind flanges), παρεμβύσματα (gaskets) κ.α για 4 σημεία διάτρησης
8	Κοπή συμπεριλαμβανομένου και του φρεζαρίσματος και επανασυγκόλληση χαλυβδοσωλήνα τοποθετημένου τμήματος	72	in	78,0	5.616	Για 2 ραφές συγκολλήσεων (2x36inch)
9	Ραδιογραφικός έλεγχος ηλεκτροσυγκολλήσεων των συνδέσεων του αγωγού	2	pcs	370,0	740	Για 2 συγκολλήσεις

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Εκτίμηση Κόστους						
Αποκατάσταση Αστοχίας F1: Αντικατάσταση μιας (1) ραφής συγκόλλησης του αγωγού						
α/α	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Κόστος (€)	Σχόλια
11	Καθαρισμός εξωτερικών επιφανειών αγωγού, με αμμοβολή	4,6	m ²	2,5	12	Για μήκος 1,6m(1m σωλήνα και από 0,3m των 2 συνδέσεων στον υφιστάμενο)x (Περίμετρος)
12	Μόνωση γυμνών σωλήνων με επίστρωση μονωτικών φύλλων (ψυχρής κατεργασίας)	4,6	m ²	75,0	345	Για μήκος 1,6m(1m σωλήνα και από 0,3m των 2 συνδέσεων στον υφιστάμενο)x (Περίμετρος)
13	Εγκιβωτισμός αγωγού με άμμο λατομείου	26	m ³	27,0	702	Αποκατάσταση των εργασιών του βήματος 6
14	Επιχωμάτωση πάσης φύσεως σκαμμάτων με κατάλληλα προϊόντα εκσκαφής συμπεριλαμβανομένου και του εδάφους φυτικής γης	150	m ³	9,0	1.350	Αποκατάσταση των εργασιών των βημάτων 4 και 5
15	Εγκατάσταση - απεγκατάσταση εργολάβου				1.500	Κινητοποίηση προσωπικού, μηχανημάτων και μεταφορά αναλωσίμων, εργαλείων κ.α
16	Απρόβλεπτες εργασίες (10%)				43.151	Ενδεικτικά: άντληση υδάτων, κατολισθήσεις κ.τ.λ
Σύνολο Εκτίμησης					474.663	

Πίνακας 4.6: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F₁

Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F2: Αντικατάσταση Εξωτερικής Επίστρωσης (coating) τμήματος μήκους 50m						
α/α	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Κόστος (€)	Σχόλια
1	Απομάκρυνση θάμνων	800	m ²	0,5	400	Για ζώνη εργασίας 50mx16m
2	Απομόνωση περιοχής με προειδοποιητικό πλέγμα	236	lm	2,0	472	Για ζώνη εργασίας (50+20+20)mx28m
3	Αφαίρεση επιφανειακού στρώματος εδάφους (φυτικής γης) πάχους 0,30m	250	m ²	1,0	250	Περίφραξη για ζώνη εκσκαφών 50mx28m
4	Εκσκαφή σε βάθος έως 30cm πάνω από την ανώτερα στάθμη του αγωγού	700	m ³	8,5	5.950	Για ζώνη εκσκαφών 50mx28m και σε βάθος 0,5m (έως τα την ανώτερα στάθμη του αγωγού). Δηλαδή 50mx28mx0,5m
5	Εκσκαφή σε βάθος ικανό για την πλήρη αποκάλυψη του αγωγού	163	m ³	31,5	5.135	Για ζώνη εκσκαφών 50mx3m και σε βάθος 1,3m. Δηλαδή 50mx3mx1,3m-(όγκος αγωγού)
6	Καθαρισμός εξωτερικών επιφανειών αγωγού, με αμμοβολή	150	m ²	2,5	375	Για μήκος αγωγού 50m, η συνολική επιφάνεια 50mx(Περίμετρος)
7	Μόνωση γυμνών σωλήνων και ραφών συγκόλλησης με επίστρωση μονωτικών φύλλων (ψυχρής κατεργασίας)	150	m ²	63,0	9.450	Ίδια επιφάνεια με το βήμα 6
8	Εγκιβωτισμός αγωγού με άμμο λατομείου	325	m ³	27,0	8.775	Αποκατάσταση των εργασιών του βήματος 5
9	Επιχωμάτωση πάσης φύσεως σκαμμάτων με κατάλληλα προϊόντα εκσκαφής	375	m ³	9,0	3.375	Αποκατάσταση των εργασιών των βημάτων 3 και 4
10	Εγκατάσταση - απεγκατάσταση εργολάβου				2.500	Κινητοποίηση προσωπικού, μηχανημάτων και μεταφορά αναλωσίμων, εργαλείων κ.α
11	Απρόβλεπτες εργασίες (10%)				3.668	Ενδεικτικά: άντληση υδάτων, κατολισθήσεις κ.τ.λ
Σύνολο Εκτίμησης					40.350	

Πίνακας 4.7: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F2

Εκτίμηση Κόστους
Αποκατάσταση Αστοχίας F3: Αντικατάσταση τμήματος μήκους 50m

α/α	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Κόστος (€)	Σχόλια
1	Προμήθεια υλικών	50	m	470,0	23.500	Προμήθεια χαλυβδοσωλήνων (12m έκαστος)
2	Απομάκρυνση θάμνων	2.520	m ²	0,5	1.260	Για ζώνη εργασίας (50+20+20)m x 28m
3	Απομόνωση περιοχής με προειδοποιητικό πλέγμα	236	lm	2,0	472	Περίφραξη για ζώνη εκσκαφών 50m x 28m
4	Αφαίρεση επιφανειακού στρώματος εδάφους (φυτικής γης) πάχους 0,30 m	1.400	m ²	1,0	1.400	Για ζώνη εκσκαφών 50m x 28m, απομάκρυνση του εδάφους φυτικής γης
5	Εκσκαφή σε βάθος έως 30cm πάνω από την ανωτέρα στάθμη του αγωγού	700	m ³	8,5	5.950	Για ζώνη εκσκαφών 50m x 28m και σε βάθος 0,5m (έως την ανωτέρα στάθμη του αγωγού). Δηλαδή 50m x 28m x 0,5m
6	Εκσκαφή σε βάθος ικανό για την πλήρη αποκάλυψη του αγωγού	163	m ³	31,5	5.141	Για ζώνη εκσκαφών 50m x 3m και σε βάθος 1,3m. Δηλαδή 50m x 3m x 1,3m- (όγκος αγωγού)
7	Κοπή συμπεριλαμβανομένου και του φρεζαρίσματος τμήματος του αγωγού	72	in	26,0	1.872	Για 2 κοπές στον αγωγό
8	Τοποθέτηση παρακαμπτήριου τμήματος (bypass) με εν θερμό (hot tapping) διάτρηση	Εργασία			200.000	Εργασίες διάτρησης σε 4 σημεία στον αγωγό για την εγκατάσταση της παράκαμψης (by pass)
		Υλικά			250.000	Περιλαμβάνει εξαρτήματα όπως τυφλές φλάντζες (blind flanges), παρεμβύσματα (gaskets) κ.α για 4 σημεία διάτρησης και σωλήνα μήκους 50m
9	Ανέβασμα του προς αντικατάσταση τμήματος του αγωγού 36"	50	m	13,0	650	Αφαίρεση του προς αντικατάσταση τμήματος των 50m
10	Συγκόλληση αρμών συνδέσεων νέων χαλυβδοσωλήνων (12m έκαστος)	144	in	52,0	7.488	Για την προκατασκευή του νέου τμήματος 50m απαιτούνται 4 συγκολλήσεις. Επομένως 4x36inch
11	Υδραυλική δοκιμή νέου τμήματος αγωγού 36"	50	m	28,0	1.400	
12	Κατέβασμα νέου τμήματος αγωγού 36"	50	m	13,0	650	Τοποθέτηση του νέου τμήματος του αγωγού στην τάφρο

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F3: Αντικατάσταση τμήματος μήκους 50m						
α/α	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Κόστος (€)	Σχόλια
13	Επανασυγκόλληση νέου τμήματος χαλυβδοσωλήνα στο υφιστάμενο δίκτυο	72	in	26,0	1.872	Για 2 συγκολλήσεις
14	Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά των ηλεκτροσυγκολλήσεων των συνδέσεων του νέου τμήματος του αγωγού Φ 36"	2	pcs	67,0	134	Για 2 συγκολλήσεις
15	Ραδιογραφικός έλεγχος ηλεκτροσυγκολλήσεων των συνδέσεων του αγωγού	6	pcs	370,0	2.220	Για 6 συγκολλήσεις
16	Καθαρισμός εξωτερικών επιφανειών αγωγού, με αμμοβολή	10,3	m ²	2,5	26	Αφορά 6 (4 νέες +2 με το υφιστάμενο δίκτυο)ραφές συγκόλλησης. Επομένως εάν 0,6m για κάθε μια, 6x0,6m(περίμετρος)
17	Μόνωση γυμνών σωλήνων με επίστρωση μονωτικών φύλλων (ψυχρής κατεργασίας)	10,3	m ²	75,0	775	Αφορά 6 (4 νέες +2 με το υφιστάμενο δίκτυο)ραφές συγκόλλησης. Επομένως εάν 0,6m για κάθε μια, 6x0,6m(περίμετρος)
18	Εγκιβωτισμός αγωγού με άμμο λατομείου	200	m ³	27,0	5.400	Αποκατάσταση των εργασιών του βήματος 6
19	Επιχωμάτωση πάσης φύσεως σκαμμάτων με κατάλληλα προϊόντα εκσκαφής	290	m ³	9,0	2.610	Αποκατάσταση των εργασιών των βημάτων 4 και 5
20	Εγκατάσταση - απεγκατάσταση εργολάβου				3.500	Κινητοποίηση προσωπικού, μηχανημάτων και μεταφορά αναλωσίμων, εργαλείων κ.α
21	Τεχνικές Μελέτες				3.000	Γεωτεχνικές, Γεωλογικές, Υδρολογικές, Τοπογραφικές, Πολιτικού Μηχανικού κ.τ.λ. Κατά περίπτωση
22	Απρόβλεπτες εργασίες (10%)				51.932	Ενδεικτικά: άντληση υδάτων, κατολισθήσεις κ.τ.λ
Σύνολο Εκτίμησης					571.252	

Πίνακας 4.8: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F3

Συγκεντρωτικά λοιπόν τα εκτιμώμενα κόστη από την προτεινόμενη αποκατάσταση των αστοχιών είναι για την:

- Αστοχία F1: 474.663 €
- Αστοχία F2: 40.350 € και για την
- Αστοχία F3: 571.252 €

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται το hot-tapping για την αντικατάσταση τμήματος του αγωγού, δηλαδή στις περιπτώσεις των αστοχιών F₁ και F₃, το κόστος είναι πολλαπλάσιο σε σχέση με το κόστος αποκατάστασης της αστοχίας F₂. Στην Παράγραφο 4.8.4 επισημάνθηκε το υψηλό κόστος της μεθόδου αυτής καθώς και ότι παρά το εξαιρετικά υψηλό κόστος, παραμένει συμφέρουσα σε σχέση με την διακοπή λειτουργίας του αγωγού. Προς τούτο στον Πίνακα 4.9 που ακολουθεί πραγματοποιείται εκτίμηση του Κόστους Αποκατάστασης έστω της αστοχίας F₁, με διακοπή λειτουργίας του αγωγού και χωρίς τη μέθοδο του hot tapping. Η επιλογή της αστοχίας F₁ έγινε διότι στο σύνολο των αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης, είναι αυτή με το μικρότερο απαιτούμενο χρόνο αποκατάστασης, ως εκ τούτου έχει την μικρότερη οικονομική επίπτωση από την διακοπή λειτουργίας του αγωγού.

Εκτίμηση Κόστους Αποκατάστασης Αστοχίας F1 Αντικατάσταση μιας (1) ραφής συγκόλλησης του αγωγού ΜΕ διακοπή λειτουργίας του αγωγού		
Δεδομένα	Τιμή Μονάδας	Τιμή
Παρεχόμενη ποσότητα ΦΑ	bcm/έτος	2
	GWhh/έτος	20.934
	MWhh/ημέρα	57.353,42
Τιμή Πώλησης ΦΑ	€/MWhh	28,4
Διάρκεια διακοπής λειτουργίας για την αποκατάσταση	Ημέρες	8
Μη εκπλήρωση παροχής ΦΑ (Μη πώληση)	MWhh	458.827,40
Κόστος Απώλειας Εισοδήματος (από την μη πώληση ΦΑ)	€	13.030.698,08
Κόστος Αποκατάστασης Αστοχίας A1 ΧΩΡΙΣ HOT TAPPING	€	12.610
Συνολικό Κόστος	€	13.043.308

Πίνακας 4.9: Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας F₁ ΜΕ διακοπή λειτουργίας του αγωγού

Σύμφωνα λοιπόν με τη Μελέτη Περίπτωσης η ετήσια παρεχόμενη ποσότητα ΦΑ ανέρχεται στα 2 bcm ως εκ τούτου η ημερήσια παρεχόμενη ποσότητα ΦΑ είναι περίπου 57.000 MWh.

Ως τιμή πώλησης έχει τεθεί ο μέσος όρος του πρώτου τριμήνου του 2024 του δείκτη TTF⁸ (Title Transfer Facility) (Trading Economics, 2024) και προσδιορίζεται περίπου στα 28 €/MWh, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το περιθώριο κέρδους του διαχειριστή στην τιμή πώλησης. Επίσης σύμφωνα με την εκτίμηση των Εμπειρογνομόνων η αποκατάσταση της αστοχίας F₁ με διακοπή λειτουργίας του αγωγού εκτιμάται περίπου στις οχτώ (8) ημέρες, όπως αποτυπώνεται και στο ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα του Πίνακα 4.10. Επομένως το Συνολικό Κόστος εκτοξεύεται από τα 474.663€ περίπου στα 13.000.000€.

Εκτίμηση Χρόνου αποκατάστασης της Λειτουργίας του αγωγού										
Αστοχία F ₁ : Αντικατάσταση μίας (1) ραφής συγκόλλησης αγωγού ΜΕ διακοπή λειτουργίας του αγωγού										
a/a	Δραστηριότητες	Διάρκεια (ημέρες)	Ενδεικτικό Χρονοδιάγραμμα (ημέρες)							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Διακοπή Λειτουργίας και απομόνωση (από τα βανοστάσια) του προς αποκατάσταση τμήματος	1	■							
2	Κινητοποίηση και εγκατάσταση Εργολάβου	2	■	■						
3	Εξαέρωση και καθαρισμός τμήματος αγωγού (Purging)	2		■	■					
4	Απομόνωση περιοχής και εγκατάσταση πλέγματος	2	■	■						
5	Χωματοουργικές εργασίες - εκσκαφές	2			■	■				
6	Μηχανολογικές Εργασίες (Κοπή τμήματος και συγκόλληση νέου)	2					■	■		
7	Μη Καταστροφικές Δοκιμές	2					■	■		
8	Μονώσεις των συγκολλήσεων	1						■		
9	Εγκιβωτισμός και επιχωματώσεις	1							■	
10	Απεγκατάσταση Εργολάβου	1								■
11	Πλήρωση Αγωγού με ΦΑ και αποκατάσταση της ροής	1								■
Συνολικά Απαιτούμενος Χρόνος			8							

Πίνακας 4.10: Εκτίμηση χρόνου αποκατάστασης της Αστοχίας F₁ ΜΕ διακοπή λειτουργίας του αγωγού

Το γεγονός αυτό τεκμηριώνει την ορθότητα της επιλεγείσας μεθόδου του hot tapping. Να ληφθεί επίσης υπόψη ότι στις παραπάνω εκτιμήσεις δεν έχουν συμπεριληφθεί επιπλέον κόστη από ποινικές ρήτρες(λόγω μη παροχής ΦΑ στον πελάτη), καθώς και το περιθώριο κέρδους του διαχειριστή στην τιμή πώλησης του ΦΑ, γεγονός το οποίο θα μεγάλωνε ακόμη περισσότερο την παραπάνω διαφορά.

⁸ Το **TTF** (Title Transfer Facility ή Ταμείο Μεταφοράς Τίτλων) είναι ένα εικονικό σημείο διαπραγμάτευσης / συναλλαγών ΦΑ με έδρα την Ολλανδία. Είναι μια πλατφόρμα, στην οποία πραγματοποιούνται χρηματοοικονομικές συναλλαγές ΦΑ. Το TTF αποτελεί το εικονικό σημείο συναλλαγών ΦΑ με ευρεία χρήση στην Ευρώπη και η τιμή του είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο στις ευρωπαϊκές χρηματιστηριακές συναλλαγές της αγοράς ΦΑ. Το ΦΑ στο TTF διαπραγματεύεται σε ευρώ ανά μεγαβάτ-ώρα (€/MWh) (Wikipedia).

Μετά την εκτίμηση των κοστών αποκατάστασης των τριών (3) αστοχιών, θα πρέπει να εκτιμηθεί και το κόστος αποκατάστασης ολόκληρου του αγωγού μήκους 1km της Μελέτης Περίπτωσης. Τούτο διότι ο διαχειριστής θα πρέπει να γνωρίζει που τοποθετείται κοστολογικά το μέγιστο κόστος που αντιστοιχεί στην ολοκληρωτική καταστροφή του αγωγού, συνεπώς και της αντικατάστασής του. Επίσης θα πρέπει το κόστος αποκατάστασης των αστοχιών να έχουν μέτρο σύγκρισης και μεταξύ τους αλλά και σε σχέση με το δυσμενέστερο σενάριο της ολικής καταστροφής του αγωγού. Η εκτίμηση αυτή καταγράφεται στον Πίνακα 4.11 που ακολουθεί και αντιπροσωπεύει την επίπτωση στην θεωρητική περίπτωση όπου η πιθανότητα εμφάνισης διαβρωτικού φαινομένου είναι στο 100% με συνέπεια την ολοκληρωτική του καταστροφή.

Εκτίμηση Κόστους
Αποκατάσταση Αστοχίας: Αντικατάσταση ολόκληρου του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης (1.000m)

α/α	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Συνολικό Κόστος (€)	Σχόλια
1	Προμήθεια υλικών	1.000	m	470,0	470.000	Προμήθεια χαλυβδοσωλήνων (12m έκαστος)
2	Απομάκρυνση θάμνων	29.120	m ²	0,5	14.560	Για ζώνη εργασίας (1000+20+20)m x 28m
3	Απομόνωση περιοχής με προειδοποιητικό πλέγμα	2.136	lm	2,0	4.272	Περίφραξη για ζώνη εκσκαφών 1000m x 16m
4	Αφαίρεση επιφανειακού στρώματος εδάφους (φυτικής γης) πάχους 0,30 m	5.000	m ²	1,0	5.000	Για ζώνη εκσκαφών 1000m x 5m, απομάκρυνση του εδάφους φυτικής γης
5	Εκσκαφή σε βάθος έως 30cm πάνω από την ανώτερα στάθμη του αγωγού	14.000	m ³	8,5	119.000	Για ζώνη εκσκαφών 1000m x 28m και σε βάθος 0,5m (έως την ανώτερα στάθμη του αγωγού). Δηλαδή 1000m x 28m x 0,5m
6	Εκσκαφή σε βάθος ικανό για την πλήρη αποκάλυψη του αγωγού	5.864	m ³	31,5	184.721	Για ζώνη εκσκαφών 1000m x 3m και σε βάθος 1,3m. Δηλαδή 1000m x 3m x 1,3m-(όγκος αγωγού)
7	Κοπή συμπεριλαμβανομένου και του φρεζαρίσματος τμήματος του αγωγού	72	in	26,0	1.872	Για 2 κοπές στον αγωγό
8	Τοποθέτησης παρακαμπτήριου τμήματος(bypass) με εν θερμώ (hot tapping) διάτρηση	Εργασία			200.000	Εργασίες διάτρησης σε 4 σημεία στον αγωγό για την εγκατάσταση της παράκαμψης(bypass)
		Υλικά			790.000	Περιλαμβάνει εξαρτήματα όπως τυφλές φλάτζες(blind flanges), παρεμβύσματα (gaskets) κ.α για 4 σημεία διάτρησης και σωλήνα μήκους 1000m
9	Ανέβασμα του προς αντικατάσταση τμήματος του αγωγού 36"	1.000	m	13,0	13.000	Αφαίρεση του προς αντικατάσταση τμήματος των 1000m
10	Συγκόλληση αρμών συνδέσεων νέων χαλυβδοσωλήνων (12m έκαστος)	2.988	in	52,0	155.376	Για την προκατασκευή του νέου τμήματος 1000m απαιτούνται 83 συγκολλήσεις. Επομένως 83x36in
11	Υδραυλική δοκιμή νέου τμήματος αγωγού 36"	1.000	m	28,0	28.000	
12	Κατέβασμα νέου τμήματος αγωγού 36"	1.000	m	13,0	13.000	Τοποθέτηση του νέου τμήματος του αγωγού στην τάφρο

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Εκτίμηση Κόστους Αποκατάσταση Αστοχίας: Αντικατάσταση ολόκληρου του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης (1.000m)						
a/a	Περιγραφή Εργασιών Αποκατάστασης	Ποσότητα		Τιμή Μονάδας (€)	Συνολικό Κόστος (€)	Σχόλια
13	Επανασυγκόλληση νέου τμήματος χαλυβδοσωλήνα στο υφιστάμενο δίκτυο	72	in	26,0	1.872	Για 2 συγκολλήσεις
14	Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά των ηλεκτροσυγκολλήσεων των συνδέσεων του νέου τμήματος του αγωγού Φ 36"	2	pcs	67,0	134	Για 2 συγκολλήσεις
15	Ραδιογραφικός έλεγχος ηλεκτροσυγκολλήσεων των συνδέσεων του αγωγού	85	pcs	370,0	31.450	Αφορά 85 (83 νέες +2 με το υφιστάμενο δίκτυο)ραφές συγκόλλησης
16	Καθαρισμός εξωτερικών επιφανειών αγωγού, με αμμοβολή	146	m ²	2,5	365	Αφορά 85 (83 νέες +2 με το υφιστάμενο δίκτυο)ραφές συγκόλλησης. Επομένως εάν 0,6m για κάθε μια, 85x0,6mx(περίμετρος)
17	Μόνωση γυμνών σωλήνων με επίστρωση μονωτικών φύλλων (ψηχρής κατεργασίας)	146	m ²	75,0	10.950	Αφορά 85 (83 νέες +2 με το υφιστάμενο δίκτυο)ραφές συγκόλλησης. Επομένως εάν 0,6m για κάθε μια, 85x0,6m(περίμετρος)
18	Εγκιβωτισμός αγωγού με άμμο λατομείου	5.864	m ³	27,0	158.332	Αποκατάσταση των εργασιών του βήματος 6
19	Επιχωμάτωση πάσης φύσεως скаμμάτων με κατάλληλα προϊόντα εκσκαφής	19.000	m ³	9,0	171.000	Αποκατάσταση των εργασιών των βημάτων 4 και 5
20	Εγκατάσταση - απεγκατάσταση εργολάβου				3.500	Κινητοποίηση προσωπικού, μηχανημάτων, αναλωσίμων κ.τ.λ
21	Τεχνικές Μελέτες				10.000	Γεωτεχνικές, Γεωλογικές, Υδρολογικές, Τοπογραφικές, Πολιτικού Μηχανικού κ.τ.λ. Κατά περίπτωση
22	Απρόβλεπτες εργασίες (10%)				238.640	Κινητοποίηση προσωπικού, μηχανημάτων και μεταφορά αναλωσίμων, εργαλείων κ.α
Σύνολο Εκτίμησης					2.625.044	

Πίνακας 4.11: Εκτίμηση Κόστους Αντικατάστασης ολόκληρου του αγωγού

4.8.6 Αξιολόγηση των κινδύνων των αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης

Εισαγωγικά αναφέρεται ότι η διαχείριση κινδύνων είναι μια φυσική διεργασία και αποτελεί μέρος της καθημερινότητας των ανθρώπων. *Η διακινδύνευση έκθεσης σε έναν κίνδυνο ή η εκδήλωση ενός κινδύνου ορίζεται ως ένα μέτρο της εν δυνάμει απώλειας, από την άποψη τόσο της πιθανότητας (ή της συχνότητας εμφάνισης) ενός συμβάντος όσο και του μεγέθους των συνεπειών από το συμβάν.* Πιθανότητα είναι η πιθανότητα ή η συχνότητα αστοχίας που επηρεάζει τον αγωγό, και συνέπεια είναι η σοβαρότητα των επιπτώσεων σε διάφορες επιμέρους κατηγορίες (π.χ. ανθρώπινη ασφάλεια, περιβάλλον, οικονομία) λόγω αστοχίας του αγωγού (PMBOK, 2013; Sasikirono, 2017; Ζγολόμπης, 2022).

Η ανάλυση κινδύνου εξετάζει την πιθανότητα αστοχίας από όλες τις πιθανές και υπάρχουσες απειλές σε κάθε θέση κατά μήκος του αγωγού. Επιπλέον, κάθε κατηγορία αποδεκτών μπορεί να αντιμετωπίσει διαφορετικά επίπεδα συνεπειών από την αστοχία ενός αγωγού, ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας (π.χ. διαρροή ή ρήξη) και τη θέση της αστοχίας (π.χ. εγγύτητα σε αποδέκτες όπως ο πληθυσμός και περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές) (PMBOK, 2013; Sasikirono, 2017; Ζγολόμπης, 2022).

Ένας τυπικός εννοιολογικός ορισμός του κινδύνου που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση κινδύνου δίνεται από την παρακάτω Εξίσωση 4.8:

$$R_i = P_i \times S_i, \quad (4.8)$$

Όπου:

- R: ο κίνδυνος εμφάνισης της αστοχίας i
- P: η πιθανότητα εμφάνισης της αστοχίας i και
- S: το μέγεθος ή την έκταση της επίπτωσης της αστοχίας i (PMBOK, 2013; Sasikirono, 2017).

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται η αξιολόγηση των κινδύνων εκδήλωσης των τριών (3) αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης. Αρχικά θα πρέπει να προσδιοριστούν οι κλίμακες των πιθανοτήτων και των επιπτώσεων. Η ανάπτυξη και οριοθέτηση των κλιμάκων αυτών με τις αντίστοιχες τιμές των ορίων εξαρτώνται κάθε φορά από την κατηγορία, το μέγεθος του έργου και πιθανά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζει. Για παράδειγμα το 5% ως πιθανότητα αστοχίας μιας ανεμογεννήτριας ενός αιολικού πάρκου σε ένα έργο ΑΠΕ, ενδεχομένως να χαρακτηρίζεται ως Χαμηλή ή Μέση. Στην περίπτωση όμως ενός πυρηνικού σταθμού το 5% ως πιθανότητα αστοχίας θα θεωρηθεί ως Πολύ Υψηλή. Η τυπική κλίμακα Πιθανοτήτων που συνήθως χρησιμοποιείται είναι από το ένα (1) έως το πέντε (5). Όσον αφορά τα όρια των πιθανοτήτων (P_i) εμφάνισης των

αστοχιών, βάσει της γνώμης των Εμπειρογνομόνων, οροθετούνται στον Πίνακα 4.12 που ακολουθεί.

Κλιμάκωση	Περιγραφή Πιθανότητας (P_i) των αστοχιών
1	$0 \leq (P_i) < 0,2$: Πολύ Χαμηλή. Δεν συμβαίνει σχεδόν ποτέ
2	$0,2 \leq (P_i) < 0,4$: Χαμηλή. Απίθανο να συμβεί
3	$0,4 \leq (P_i) < 0,6$: Μέση. Πιθανό να συμβεί
4	$0,6 \leq (P_i) < 0,8$: Υψηλή. Έχει συμβεί αρκετές φορές
5	$0,8 \leq (P_i)$: Πολύ Υψηλή. Συμβαίνει συχνά

Πίνακας 4.12: Κατανομή κλίμακας Πιθανοτήτων (P_i)

Η κλιμάκωση έχει να κάνει με το ποιες τιμές θεωρούνται και κατά πόσο κρίσιμες. Στην προκυμμένη περίπτωση οι Εμπειρογνώμονες εκτιμούν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κλασική κατανομή η οποία υπάρχει και στο εγχειρίδιο του (PMBOK, 2013).

Στον Πίνακα 4.13 που ακολουθεί παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τρεις (3) αστοχίες της Μελέτης Περίπτωσης.

a/a	Περιγραφή Αστοχίας	Βασικό Γενεσιουργό Αίτιο	Πιθανότητα Αστοχίας	Κόστος Αποκατάστασης
F ₁	Αλλοιώσεις σε μια ραφή συγκόλλησης μεταξύ δυο (2) σωληνοαγωγών, χωρίς διαρροή ΦΑ.	HIC	0,1809	474.663 €
F ₂	Μερική υποβάθμιση στην εξωτερική μόνωση σε περιοχή τμήματος μήκους 50m του αγωγού, χωρίς διαρροή ΦΑ.	MIC	0,2538	40.350 €
F ₃	Διαμήκη ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια τμήματος μήκους 50m του αγωγού, χωρίς διαρροή ΦΑ.	SCC	0,3154	571.252 €

Πίνακας 4.13: Αστοχίες Μελέτης Περίπτωσης ανά Αίτιο, Πιθανότητα και Κόστος Αποκατάστασης

Σε συνέχεια των υπολογισμών που προηγήθηκαν στην Παράγραφο 4.8.3 και με την βοήθεια των Εμπειρογνομόνων, προκύπτει η κλιμάκωση των επιπτώσεων (S_i). Οι συνήθεις κατηγορίες επιπτώσεων σε αναλύσεις κινδύνου οι οποίες εξετάζονται σύμφωνα με το (PMBOK, 2013) είναι:

- Το Κόστος
- Ο Χρόνος
- Το Εύρος και
- Η Ποιότητα

Στην παρούσα ανάλυση κινδύνου θα εξεταστεί ως βασική επίπτωση το Κόστος που θα επιφέρουν στον διαχειριστή του έργου κάθε μια από τις αποκαταστάσεις των αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης. Η τυπική κλίμακα των Επιπτώσεων, όπως και στην περίπτωση των Πιθανοτήτων είναι από το ένα (1) έως το πέντε (5). Όσον αφορά τα όρια της Επίπτωσης (S_i) του Κόστους οι Εμπειρογνώμονες, δεδομένων των χαρακτηριστικών της Μελέτης Περίπτωσης, έλαβαν την

απόφαση να χρησιμοποιήσουν την παρακάτω κλιμάκωση για το Κόστος, η οποία υπάρχει ευρέως στην βιβλιογραφία (Gajewska, 2011; PMBOK, 2013) ως την πλέον αντιπροσωπευτική. Πιο συγκεκριμένα κλιμακώνεται με βήμα 2,5% επί του δυσμενέστερου κόστους που μπορεί να υπάρξει για το έργο. Στην προκυμμένη περίπτωση η αντικατάσταση ολόκληρου στου αγωγού που έχει προσδιοριστεί στα 2.625.044 €, έστω C_{total} . Ως εκ τούτου η κλιμάκωση της επίπτωσης του κόστους διαμορφώνεται:

- 1: Πολύ Χαμηλή: $S_i < 2,5\% C_{total}$
- 2: Χαμηλή: $2,5\% C_{total} \leq S_i < 5\% C_{total}$
- 3: Μέση: $5\% C_{total} \leq S_i < 10\% C_{total}$
- 4: Υψηλή: $10\% C_{total} \leq S_i < 20\% C_{total}$
- 5: Πολύ Υψηλή: $20\% C_{total} \leq S_i$

Στον Πίνακα 4.14 που ακολουθεί, παρατίθεται η προαναφερθείσα κλιμάκωση της Επίπτωσης του Κόστους (S_i).

Επίπτωση	Κλιμάκωση	Κλίμακες Επίπτωσης (S_i): Κόστος Αποκατάστασης Αστοχιών
Πολύ Χαμηλή	1	$(S_i) < 65.626\text{€}$: Αμελητέα οικονομική επιβάρυνση
Χαμηλή	2	$65.626\text{€} \leq (S_i) < 131.252\text{€}$: Μικρής έκτασης οικονομική επιβάρυνση
Μέση	3	$131.252\text{€} \leq (S_i) < 262.504\text{€}$: Μέτρια οικονομική επιβάρυνση
Υψηλή	4	$262.504\text{€} \leq (S_i) < 525.008\text{€}$: Σοβαρή οικονομική επιβάρυνση
Πολύ Υψηλή	5	$(S_i) \geq 525.008\text{€}$: Μεγάλη οικονομική επιβάρυνση

Πίνακας 4.14: Κατανομή κλίμακας Επιπτώσεων Κόστους (S_i)

Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των Ορίων του Κινδύνου, βάσει των οποίων γίνεται η διαβάθμιση των αστοχιών και κρίνεται ποιοί κίνδυνοι είναι αμελητέοι και δεν απαιτείται να γίνει κάποια ενέργεια και για ποιους χρειάζεται η λήψη διορθωτικών ενεργειών καθώς και η αμεσότητα των ενεργειών αυτών. Με γνώμονα και πάλι τα δεδομένα της Μελέτης Περίπτωσης της εργασίας, τίθενται τα παρακάτω όρια. Επομένως για Κίνδυνο:

- $R \leq 3$: Ο κίνδυνος της αστοχίας θεωρείται Χαμηλός. Είναι αμελητέος και δεν απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες και είναι όμως υπό παρακολούθηση. Ο διαχειριστής του αγωγού συνεχίζει τους καθιερωμένους ελέγχους, χωρίς να διενεργηθούν πρόσθετοι και ακολουθεί τις προβλεπόμενες διαδικασίες. (Με Πράσινο χρώμα τα αντίστοιχα πεδία του Πίνακα Διακινδύνευσης) (Σήμανση με: X- Χαμηλός).
- $3 < R < 15$: Ο κίνδυνος της αστοχίας είναι Μέσος. Είναι μη επιθυμητός και πιθανά χρειάζεται αντιμετώπιση. Ο διαχειριστής του αγωγού εξετάζει την λήψη μέτρων αντιμετώπισης και πιθανών νέων ελέγχων. (Με Κίτρινο χρώμα τα αντίστοιχα πεδία του Πίνακα Διακινδύνευσης) (Σήμανση με: M - Μέσος).

- $R \geq 15$: Ο κίνδυνος της αστοχίας θεωρείται Υψηλός. Είναι μη επιθυμητός και χρειάζεται άμεση αντιμετώπιση. Ο διαχειριστής του αγωγού φροντίζει να αντιμετωπιστούν άμεσα ώστε να επανέλθουν εντός αποδεκτών ορίων. (Με Κόκκινο χρώμα τα αντίστοιχα πεδία του Πίνακα Διακινδύνευσης) (Σήμανση με: Y - Υψηλός).

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση 4.8 καθώς και τις παραπάνω μεταβλητές προκύπτει ο Πίνακας Διακινδύνευσης 4.15, βάσει του οποίου θα πραγματοποιηθεί ακολούθως η αξιολόγηση και κατάταξη των κινδύνων από την εκδήλωση των τριών (3) αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης.

Κίνδυνος (R) = P x S						
Πιθανότητα (P)	Πολύ Υψηλή (5)	5 (M)	10 (M)	15 (Y)	20 (Y)	25 (Y)
	Υψηλή (4)	4 (M)	8 (M)	12 (M)	16 (Y)	20 (Y)
	Μέση (3)	3 (X)	6 (M)	9 (M)	12 (M)	15 (Y)
	Χαμηλή (2)	2 (X)	4 (M)	6 (M)	8 (M)	10 (M)
	Πολύ Χαμηλή (1)	1 (X)	2 (X)	3 (X)	4 (M)	5 (M)
	Πολύ Χαμηλή (1)	Χαμηλή (2)	Μέση (3)	Υψηλή (4)	Πολύ Υψηλή (5)	
	Επίπτωση (S)					

Πίνακας 4.15: Πίνακας Κινδύνου Μελέτης Περίπτωσης

Σε συνέχεια των ανωτέρω διενεργείται η Ανάλυση Κινδύνου των τριών (3) αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης, οι κίνδυνοι υπολογίζονται και διαβαθμίζονται σύμφωνα με την σοβαρότητα που εμφανίζουν. Επίσης βάσει των αποτελεσμάτων παρατίθενται και Προτεινόμενες Ενέργειες για κάθε περίπτωση κινδύνου, δηλαδή εμφάνισης αστοχίας, επομένως και των αστοχιών που έχουν καταγραφεί. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.16 που ακολουθεί.

Για τις αστοχίες της Μελέτης Περίπτωσης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Για την:

- Αστοχία F₁, λόγω HIC, η πιθανότητα έχει προσδιοριστεί στο 0,1809, επομένως βρίσκεται στην Κλίμακα 1(Πολύ Χαμηλή), των πιθανοτήτων. Η επίπτωση του Κόστους είναι 474.663 €, επομένως βρίσκεται στην Κλίμακα 4(Υψηλή) των Επιπτώσεων. Συνεπώς ο Κίνδυνος R₁, από την Εξίσωση 4.8, υπολογίζεται στα 85.867 € και σύμφωνα με τον Πίνακα 4.15, είναι Μέσος.
- Αστοχία F₂, λόγω MIC, η πιθανότητα έχει προσδιοριστεί στο 0,2538, επομένως βρίσκεται στην Κλίμακα 2(Χαμηλή), των πιθανοτήτων. Η επίπτωση του Κόστους είναι 40.350 €, επομένως βρίσκεται στην Κλίμακα 1(Πολύ Χαμηλή) των Επιπτώσεων. Συνεπώς ο Κίνδυνος R₂, από την Εξίσωση 4.8, υπολογίζεται στα 10.241 € και σύμφωνα με τον Πίνακα 4.15, είναι Χαμηλός.
- Αστοχία F₃, λόγω SCC, η πιθανότητα έχει προσδιοριστεί στο 0,3154, επομένως βρίσκεται στην Κλίμακα 2(Χαμηλή), των πιθανοτήτων. Η επίπτωση του Κόστους είναι 571.252 €, επομένως βρίσκεται στην Κλίμακα 5(Πολύ Υψηλή) των Επιπτώσεων. Συνεπώς ο Κίνδυνος R₃, από την Εξίσωση 4.8, υπολογίζεται στα 180.173 € και σύμφωνα με τον Πίνακα 4.15, είναι Μέσος.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι όσον αφορά την πιθανότητα εμφάνισης των φαινομένων διάβρωσης επομένως και των αντίστοιχων αστοχιών στην πιο χαμηλή θέση βρίσκεται η HIC με την αντίστοιχη αστοχία F₁ στην Κλίμακα 1 (Πολύ Χαμηλή), ακολουθεί η MIC με την αντίστοιχη αστοχία F₂ στην Κλίμακα 2 (Χαμηλή) και πιο ψηλά η SCC με την αντίστοιχη αστοχία F₃ στην Κλίμακα 2 (Χαμηλή). Όσο για τις Επιπτώσεις, δηλαδή τα Κόστη αποκατάστασης των αστοχιών, στην πιο χαμηλή θέση βρίσκεται η αποκατάσταση της αστοχίας F₂ στην Κλίμακα 1 (Πολύ Χαμηλή), ακολουθεί η αποκατάσταση της αστοχίας F₁ στην Κλίμακα 4 (Υψηλή) και πιο ψηλά η αποκατάσταση της αστοχίας F₃ στην τελευταία Κλίμακα 5 (Πολύ Υψηλή).

Οι Κίνδυνοι οι οποίοι προκύπτουν από τις τρεις (3) περιπτώσεις αστοχιών βαθμονομούν και κατατάσσουν τον Κίνδυνο της αστοχίας F₂ ως Χαμηλό (2X / 10.241€), ακολούθως τον Κίνδυνο της αστοχίας F₁ ως Μέσο (4M / 85.867€) και στην υψηλότερη θέση ο Κίνδυνος της αστοχίας F₃ πάλι ως Μέσο (10M / 180.173€) αλλά με υπερδιπλάσιο βαθμό(10 έναντι 4 της προηγούμενης περίπτωσης). Συγκεντρωτικά καταγράφονται οι θέσεις των Κινδύνων που έχουν προκύψει στον παρακάτω Πίνακα 4.16.

Επίσης να σημειωθεί ότι όσον αφορά τις Προτεινόμενες Ενέργειες που παρατίθενται, προέρχονται από την γνώση και εμπειρία των Εμπειρογνομόνων λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της Μελέτης Περίπτωσης. Αναλυτική αναφορά για τα εξερχόμενα συμπεράσματα της Ανάλυσης Κινδύνων παρατίθεται στην Παράγραφο 5.2 του Κεφαλαίου 5 που ακολουθεί.

Γενεσιου ργό Αίτιο	Αστοχία	Πιθανό- τητα Αστοχίας (Pi)	Κλίμακα Πιθανό- τητας	Επίπτωση Αστοχίας (Si)	Κλίμακα Επίπτω- σης	Κίνδυνος (R) = Pi x Si (€)		Προτεινόμενες Ενέργειες Αντιμετώπισης των Κινδύνων
MIC	F ₂ : Αλλοιώσεις στην εξωτερική μόνωση του αγωγού σε τμήμα μήκους 50m, χωρίς διαρροή ΦΑ	0,2538	2	40.350 €	1	10.241	2(X)	Λόγω Χαμηλού Κινδύνου, δεν προτείνεται λήψη συγκεκριμένων ενεργειών αποκατάστασης ή επαυξημένης παρακολούθησης.
HIC	F ₁ : Αλλοιώσεις σε μια (1) ραφή συγκόλλησης, χωρίς διαρροή ΦΑ	0,1809	1	474.663 €	4	85.867	4(M)	Λόγω Μέσου Κινδύνου, αλλά Υψηλής επίπτωσης σε περίπτωση εμφάνισης της αστοχίας, προτείνονται: <ul style="list-style-type: none"> • Σποραδικές αποκαλύψεις τμημάτων του αγωγού, οπτικός και ραδιογραφικός έλεγχος των ραφών συγκόλλησης • Χρήση αναστολέων διάβρωσης • Έλεγχος των ηλεκτροδίων της καθοδικής προστασίας • Αύξηση των εσωτερικών επιθεωρήσεων (In-line inspection) • Άμεση αναθεώρηση του Προγράμματος Συντήρησης του αγωγού
SCC	F ₃ : Επιφανειακές ρωγμές σε αλλοιώσεις τμήμα μήκους 50m, χωρίς διαρροή ΦΑ	0,3154	2	571.252 €	5	180.173	10(M)	Λόγω Μέσου Κινδύνου, αλλά Υψηλής επίπτωσης σε περίπτωση εμφάνισης της αστοχίας, προτείνονται: <ul style="list-style-type: none"> • Σποραδικές αποκαλύψεις τμημάτων, οπτικός και ραδιογραφικός έλεγχος • Χρήση αναστολέων διάβρωσης • Αύξηση των εσωτερικών επιθεωρήσεων (In-line inspection) • Άμεση αναθεώρηση του Προγράμματος Συντήρησης του αγωγού

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα Ανάλυσης Κινδύνου

4.9 Ανασκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στην ακεραιότητα αγωγών μεταφοράς ΦΑ και στην προτεινόμενη μεθοδολογία που έχει επιλεγεί για την διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης και των συνεπειών του στους υπόγειους αγωγούς. Ακολουθεί αναφορά στον ρόλο και την συμβολή των Εμπειρογνομόνων σε τέτοιου είδους μελέτες, ανάλυση της απεικονιστικής μεθόδου της εργασίας και εφαρμογή της μεθόδου στις τρεις (3) περιπτώσεις των φαινομένων διάβρωσης που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Ακολουθεί διερεύνηση αστοχιών προερχόμενες από τα φαινόμενα διάβρωσης με την βοήθεια Μελέτης Περίπτωσης, στα πλαίσια της οποίας πραγματοποιείται ανάλυση και αξιολόγηση κινδύνων. Προσδιορίζονται οι κίνδυνοι για τις τρεις (3) περιπτώσεις αστοχιών, διαβαθμίζονται και αξιολογούνται, παραθέτοντας προτεινόμενες ενέργειες αντιμετώπισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Σχολιασμός Γενικής Μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία διερεύνησης αναφέρεται στον συνολικό σχεδιασμό και την προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση ενός θέματος, προβλήματος ή ερώτησης. Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το πώς συλλέγονται, αναλύονται και ερμηνεύονται τα δεδομένα σε μια έρευνα. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης και των συνεπαγόμενων συνεπειών στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ.

Η μεθοδολογία η οποία έχει επιλεγεί για την ανάλυση του θέματος είναι περισσότερο διαχειριστική (managerial) δίνοντας έμφαση στην αποτελεσματική κατανομή των πόρων(χρήμα και χρόνος) για την κατανόηση και αντιμετώπιση του τεχνικού προβλήματος. Επίσης όσον αφορά την Ανάλυση των Κινδύνων υιοθετείται μια ρεαλιστική προσέγγιση στη διαχείρισή τους δίνοντας προτεραιότητα σε πρακτικές λύσεις που εφαρμόζονται στην πράξη εντός των υφιστάμενων περιορισμών. Σε αντιδιαστολή μια περισσότερο επιστημονική (scientific) προσέγγιση, θα εμβάθυνε σε στοιχεία από την έρευνα και τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία χωρίς να ενσωματώνει την εμπειρική προσέγγιση των ειδικών στο αντικείμενο του θέματος.

Επίσης βασικό άξονα και ταυτόχρονα οδηγό αποτελεί η εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση η οποία έχει πραγματοποιηθεί προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι πτυχές του προβλήματος, να δομηθεί με ορθότητα η εργασία, φωτίζοντας παράλληλα τα σημαντικότερα σημεία. Στο πλαίσιο αυτό προστίθεται η συμβολή των τριών (3) Εμπειρογνομόνων η οποία κρίνεται ως άκρως εποικοδομητική σε επίπεδο προσδιορισμού και οριοθέτησης του προβλήματος. Το ενδεχόμενο συνεργασίας με περισσότερους ειδικούς δεν είναι απαραίτητο ότι θα προσέδιδε μεγαλύτερη ακρίβεια ή αξιοπιστία στα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.

Η επιλεγείσα απεικονιστική μέθοδος της FTA κρίνεται ως δομημένη επιστημονική προσέγγιση. Συμβάλει επίσης με την αναγνώριση των πιθανών αιτιών και την ανάδειξη των κρίσιμων σημείων αδυναμίας ή αδυναμιών στο σύστημα. Αποτελεί εργαλείο αναγνώρισης και ανάδειξης των αστοχιών και των κινδύνων που εμφανίζονται, δίνοντας λύσεις στην βιομηχανία, την ποιότητα των συστημάτων και την ασφάλεια. Στην παρούσα μελέτη, με την βοήθεια της FTA διενεργείται ανάλυση των γενεσιουργών αιτιών τα οποία οδηγούν στα τρία (3) φαινόμενα διάβρωσης της εργασίας. Εκτός της ποιοτικής προσέγγισης πραγματοποιείται και ποσοτική εκτίμηση των πιθανοτήτων εμφάνισης των φαινομένων διάβρωσης για αγωγή Μελέτης Περίπτωσης. Χρησιμοποιώντας την άλγεβρα Boole και τις λογικές σχέσεις που ενσωματώνονται στα δέντρα και λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανότητες των βασικών αιτιών που προέκυψαν από τη βιβλιογραφία και τους Εμπειρογνώμονες, υπολογίστηκαν οι πιθανότητες εμφάνισης των φαινομένων.

Για την Ανάλυση Κινδύνου των αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης, προηγήθηκε επισκόπηση των διαθέσιμων βιβλιογραφικών πηγών και διαβαθμίστηκαν οι κίνδυνοι των αστοχιών λόγω εμφάνισης και ανάπτυξης των τριών (3) φαινομένων διάβρωσης.

Να σημειωθεί, ότι ο σκοπός της επιλεγείσας μεθόδου είναι να καταδείξει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα αίτια εμφάνισης των φαινομένων διάβρωσης, δηλαδή η φαινομενολογία, με τεχνοοικονομικά ζητήματα.

5.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Ανάλυσης Κινδύνου

Η Ανάλυση Κινδύνων η οποία διενεργείται για την Μελέτη Περίπτωσης της εργασίας στην Παράγραφο 4.8.6, αποτυπώνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν στον Πίνακα 4.16. Η πρώτη παρατήρηση που αφορά τις Πιθανότητες εμφάνισης των τριών (3) φαινομένων διάβρωσης είναι η σχετικά μικρή μεταξύ τους διασπορά, με εύρος από 18% έως 30%. Οι σχετικά χαμηλές πιθανότητες που καταγράφονται λαμβάνοντάς τες υπόψη μεμονωμένα, αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την λήψη μέτρων προληπτικού χαρακτήρα. Από την άλλη μεριά οι Επιπτώσεις, δηλαδή τα Κόστη αποκατάστασης των περιγραφόμενων αστοχιών της Μελέτης Περίπτωσης, εμφανίζουν μεγάλο εύρος τιμών. Πιο συγκεκριμένα ενώ το κόστος αποκατάστασης της Αστοχίας F_2 είναι της τάξεως των 40.000€, τα κόστη αποκατάστασης των άλλων αστοχιών F_1 και F_3 είναι δεκαπλάσιου περίπου προϋπολογισμού (470.000€-570.000€). Λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος των περίπου 2.600.000€, για την αντικατάσταση ολόκληρου του αγωγού με νέο, στην πραγματικότητα δημιουργείται διαφορετική οπτική γωνία για τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται ο Κίνδυνος Αστοχίας F_2 σε σχέση με τους Κινδύνους Αστοχιών F_1 και F_3 .

Υπογραμμίζεται ότι η Ανάλυση Κινδύνου αποσκοπεί στην αξιολόγηση του Κινδύνου και όχι μεμονωμένα της Πιθανότητας και της Επίπτωσης. Στην προκυμμένη περίπτωση επειδή οι Κλίμακες των επιπτώσεων έχουν πολλαπλάσια διαφορά (σχεδόν πενταπλάσια για τις Αστοχίες F_1 και F_3 σε σχέση με την Αστοχία F_2) μεταξύ τους, αυτό συμπαρασείρει και τον Κίνδυνο σε παρόμοια διαβάθμιση. Πιο συγκεκριμένα ο Κίνδυνος εμφάνισης της αστοχίας:

- F_2 , λόγω MIC, υπολογίζεται στα 10.241€ και χαρακτηρίζεται ως Χαμηλός
- F_1 , λόγω HIC, υπολογίζεται στα 85.867€ και χαρακτηρίζεται ως Μέσος
- F_3 , λόγω SCC, υπολογίζεται στα 180.173€ και χαρακτηρίζεται ως Μέσος

Οι Κίνδυνοι των Αστοχιών F_1 και F_3 είναι πολλαπλάσιοι σε σχέση με τον Κίνδυνο της Αστοχίας F_2 . Από μόνο του το δεδομένο αυτό, διαφοροποιεί τον τρόπο αντιμετώπισης των Κινδύνων. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση του Κινδύνου της Αστοχίας F_2 δεν προτείνεται κάποια Προληπτική Ενέργεια σύμφωνα με την άποψη των Εμπειρογνομώνων, ενώ οι περιπτώσεις των Κινδύνων

Αστοχιών F_1 και F_3 πρέπει να προβληματίσουν έντονα τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς του αγωγού και προτείνεται η λήψη μέτρων περιορισμού των Κινδύνων.

Η ανωτέρω ανάλυση έρχεται να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της Ανάλυσης Κινδύνων η οποία διενεργείται και παραδίδεται στον διαχειριστή του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης. Αποτελεί εισερχόμενο στοιχείο στον σχεδιασμό ο οποίος θα πραγματοποιηθεί, προκυμμένου να αποφασιστεί ο τρόπος αντιμετώπισης των Κινδύνων που εντοπίζονται. Η απόφαση που προκύπτει δεν είναι κατ' ανάγκη ευθυγραμμισμένη με τις προτάσεις της μελέτης, διότι λαμβάνονται υπόψη μια σειρά άλλων παραγόντων οι οποίοι είναι άγνωστοι στους Μελετητές. Οι παράγοντες αυτοί ενδεχομένως να έχουν να κάνουν πληροφορίες Εμπορικής ή Επιχειρηματικής φύσεως. Για παράδειγμα τα Εμπορικά Δεδομένα πιθανόν να προβλέπουν αύξηση, μείωση ή και τερματισμός των εμπορικών συμφωνιών με τους συγκεκριμένους βιομηχανικούς πελάτες. Επίσης στα πλαίσια Επιχειρηματικών αποφάσεων να έχει αποφασιστεί η γενικότερη αναβάθμιση του δικτύου από τον διαχειριστή ή η επέκταση του κλάδου του αγωγού για των προμήθεια με ΦΑ και άλλων Πελατών, πέραν αυτών της Μελέτης Περίπτωσης ακόμη και την πιθανή κατάργηση του κλάδου αυτού του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης το επόμενο χρονικό διάστημα.

Το συμπέρασμα είναι ότι στις περιπτώσεις ενεργειακών έργων μεγάλης κλίμακας, οι οριστικές αποφάσεις λαμβάνουν υπόψη την γνώμη και άποψη του Μελετητή, χωρίς όμως αυτό σημαίνει ότι θα ταυτίζονται.

5.3 Τεχνοοικονομικά Ζητήματα

Γενικότερα η διαχείριση των τεχνοοικονομικών ζητημάτων όσον αφορά τη συντήρηση και την επισκευή ενεργειακών έργων παρόμοιας σπουδαιότητας και κλίμακας, όπως αυτό της Μελέτης Περίπτωσης, είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ασφάλειας, της εύρυθμης λειτουργίας και της οικονομικής ευημερίας του έργου. Η συντήρηση και οι απαραίτητες, κατά καιρούς εργασίες αποκατάστασης των αστοχιών, αποτελούν κρίσιμες διαδικασίες και ορισμένες φορές η κακή διαχείριση ή οι λάθος αποφάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε καταστρεπτικά αποτελέσματα όχι μόνο σε οικονομικό επίπεδο αλλά και στη φήμη του Οργανισμού. Η απόφαση για το ποιες θα είναι οι ενέργειες και ποιες θα εγκριθούν στα πλαίσια ενός προγράμματος αποκατάστασης ή συντήρησης, δεν είναι εύκολο να απαντηθεί και είναι αμιγώς πολυπαραγοντικό ζήτημα. Τούτο διότι πρέπει να συνυπολογιστούν αρκετοί παράγοντες όπως η σχέση οφέλους κόστους, ο μελλοντικός σχεδιασμός για τον εν λόγω αγωγό, ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του και πολλοί άλλοι παράγοντες.

5.4 Απαντήσεις στα ερωτήματα της έρευνας

Στην Παράγραφο 3.12 της εργασίας έχουν τεθεί ερωτήματα έρευνας για τα οποία σημειώνονται τα εξής. Όσον αφορά την καταλληλότητα της οντολογικής απεικόνισης του φαινομένου της

διάβρωσης, η επιλογή της FTA ως απεικονιστική μέθοδος δίνει την δυνατότητα επαρκούς ανάλυσης των γενεσιουργών αιτιών. Εισάγει ενδιάμεσα γεγονότα, δηλαδή αίτια του φαινομένου δίνοντας το ελεύθερο της επιλογής του συνδυασμού εκείνου των αιτιών το οποίο οδηγεί στο κορυφαίο συμβάν. Επίσης αποκτά ξεχωριστή σημασία το γεγονός, ότι η μέθοδος αυτή επιτρέπει την εμπλοκή και γνωμοδότηση Εμπειρογνομόνων οι οποίοι μπορούν και αποτυπώνουν την γνώμη τους για τον τρόπο με τον οποίο προκύπτουν τα κορυφαία συμβάντα. Δηλαδή εισάγεται στην μελέτη η πολύτιμη γνώση και εμπειρία τους.

Επίσης έχει τεθεί το ερώτημα για τον τρόπο εντοπισμού, εκτίμησης και επεξεργασίας των πιθανοτήτων εμφάνισης των επιμέρους μορφών διάβρωσης. Στην περίπτωση αυτή πέρα από την βιβλιογραφία ως βάση αναφοράς, η γνώση και εμπειρία των Εμπειρογνομόνων ποσοτικοποιεί την απάντηση στο ερώτημα. Ποιο συγκεκριμένα μετατρέπει σε πιθανότητες τόσο τα ενδιάμεσα όσο και τα κορυφαία συμβάντα των φαινομένων διάβρωσης, όπως αυτά αξιολογούνται και διαβαθμίζονται.

Τέλος όσον αφορά τον τρόπο που μπορεί να εκπονηθεί μια μελέτη Ανάλυσης Κινδύνου που να εξασφαλίζει τη σύνδεση της πιθανότητας διαβρωτικού φαινομένου με τις συνεπαγόμενες επιπτώσεις (με όρους κόστους και χρόνου), αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια Μελέτης Περίπτωσης. Αφού πρώτα ποσοτικοποιούνται οι πιθανότητες των φαινομένων διάβρωσης, αποδίδονται σε κάθε ένα από τα φαινόμενα αυτά χαρακτηριστικές αστοχίες οι οποίες συναντώνται ως συνέπειες των διαβρωτικών αυτών φαινομένων. Η αντιστοίχιση αυτή γίνεται προσαρμόζοντας τα βιβλιογραφικά δεδομένα στις ιδιαίτερες συνθήκες του αγωγού της Μελέτης Περίπτωσης. Επίσης με την Ανάλυση Κινδύνου που διενεργείται, προσδιορίζονται ποσοτικά οι κίνδυνοι εκδήλωσης των αστοχιών, διαβαθμίζονται και προτείνονται ενέργειες αντιμετώπισης.

5.5 Προτάσεις Βελτίωσης της Μεθοδολογίας - Περαιτέρω Έρευνα

Λόγω των πολλών πτυχών του αντικειμένου σε επιστημονικό αλλά και τεχνικό επίπεδο η Μεθοδολογία προσέγγισης του θέματος επιδέχεται πολλών προσεγγίσεων ως προς την μέθοδο αλλά και του φαινομένου της διάβρωσης.

Αρχικά το πεδίο έρευνας και ανάπτυξης είναι πάντα ανοιχτό σε προκλήσεις όσων αφορά την:

- Μελέτη ενός από τα φαινόμενα διάβρωσης που εξετάζει η παρούσα εργασία, με σκοπό την βελτίωση υφιστάμενων μέτρων περιορισμού του φαινομένου ή ανάπτυξη νέων μέτρων και μεθόδων
- Συγκριτική μελέτη μεταξύ των φαινομένων διάβρωσης
- Στατιστικές αναλύσεις εμφάνισης των αιτιών διάβρωσης ανά γεωγραφικές περιοχές προσημειώνοντας την συμπεριφορά του φαινομένου, εργαλείο χρήσιμο στον σχεδιασμό νέων αγωγών στο μέλλον

- Ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την εξέλιξη συγκεκριμένου φαινομένου διάβρωσης σε παραμέτρους όπως ο χρόνος, το έδαφος οι καιρικές συνθήκες κ.α

Η προτεινόμενη μεθοδολογία απεικόνισης των διαβρωτικών φαινομένων μπορεί να συνδυαστεί με μια πολυκριτηριακή μεθοδολογία λήψης αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Making-MCDM), όσον αφορά το είδος και το μέγεθος της θεραπείας των προβλημάτων που μπορεί να προκύψει από ένα περιστατικό διάβρωσης σε εγκατεστημένο αγωγό μεταφοράς ΦΑ εν λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να υιοθετηθεί η κατά Saaty⁹ Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process-AHP), όπου η γνώση των εμπειρογνομώνων μπορεί να εκφραστεί μέσω της βαθμολόγησης των εναλλακτικών λύσεων θεραπείας της διάβρωσης, ως προς ένα διάλυμα κριτηρίων αξιολόγησης και υπό το σχήμα μιας ιεραρχικής δομής (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Πέραν των ανωτέρω, μπορεί να διερευνηθούν και άλλα φαινόμενα και περιπτώσεις διάβρωσης αγωγών μεταφοράς υγρών υδρογονανθράκων αλλά και άλλων βιομηχανικών ρευστών, πέραν των τριών (3) περιπτώσεων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Όσον αφορά τέλος την Ανάλυση Κινδύνων υπάρχει το περιθώριο αναγνώρισης και εξέτασης επιπτώσεων πέραν του Κόστους, όπως της Ποιότητας, της Υγείας και Ασφάλειας κλπ.

5.6 Συμβολή στη διάχυση Τεχνογνωσίας και στην Εκπαίδευση

Δίνει την δυνατότητα στον Μηχανικό να κατανοήσει καλύτερα τα φαινόμενα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία και το αντικείμενο του οποίου είναι στην σφαίρα ενδιαφέροντος της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα φωτίζονται, μέσα από μια πιο ρεαλιστική διάσταση, τα φαινόμενα διάβρωσης που εμφανίζονται στους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς ΦΑ, οι κλίμακες κόστους και οι επιπτώσεις που έχουν στον προϋπολογισμό ενός έργου. Δηλαδή εξορθολογούνται μεγέθη, όπως αυτό των αστοχιών, των οικονομικών επιπτώσεων και της διαβάθμισης απειλών και κινδύνων. Αποτελεί επίσης ένα πρωτόλειο για την ανάπτυξη μεθόδου προσέγγισης τεχνικών θεμάτων διάβρωσης μεταλλικών κατασκευών, με απώτερο σκοπό την εμβάθυνση στην έρευνα και ανάπτυξη σε επιμέρους τομείς του αντικειμένου. Τέλος μπορεί να αποτελέσει οδηγό για την ανάπτυξη ή αναθεώρηση τεχνικών εγχειριδίων και διαδικασιών που εφαρμόζουν οι διαχειριστές συστημάτων ΦΑ, υπό το πρίσμα και την μεθοδολογία που ακολουθεί. Μπορεί δηλαδή να αποτελέσει χρήσιμο

⁹ Ο Thomas L. Saaty ήταν διακεκριμένος πανεπιστημιακός καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Πίτσμπουργκ, όπου δίδασκε στο Joseph M. Katz Graduate School of Business. Είναι ο εφευρέτης, ο αρχιτέκτονας και εμπνευστής της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), ενός πλαισίου λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση αποφάσεων μεγάλης κλίμακας, με πολλά μέρη και πολλαπλά κριτήρια.(Wikipedia)

εργαλείο περαιτέρω μελέτης τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε πιο πρακτικό και διαχειριστικό επίπεδο.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdulnaser M., (2023), “Prediction of oil and gas pipeline failures through machine learning approaches: A systematic review”, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.009>, Energy Reports 10 (2023) 1313–1338
2. Altuwair I.A., (2022), “Risk Analysis Techniques of Oil and Gas Pipeline”, <https://doi.org/10.33975/riuq.vol34n1.847>, Universidad del Quindío
3. Andersen E. S., (2014), “Development of a procedure for the assessment of microbiologically influenced corrosion in risk based inspection analysis”, University of Stavanger, Faculty of Science and Technology
4. Avery M., Chui B., Kariya Y. G., Larson K., (2001), “Hydrogen Induced Corrosion”, Material Science 112 Group Research Paper
5. Baker M., (2004), “Integrity Management Program: Corrosion Cracking Study”, Department of Transportation Research and Special Programs Administration Office of Pipeline Safety
6. Baker M., (2008), “Pipeline Corrosion, FINAL REPORT”, U.S. Department of Transportation / Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration/Office of Pipeline Safety
7. Berrouane M.T., (2020), “Dynamic Corrosion Risk Assessment in the Oil and Gas Production and Processing Facility”, Memorial University of Newfoundland, Faculty of Engineering and Applied Science
8. Campari A., (2023), “A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen Technologies”, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.293>, International Journal of hydrogen energy
9. Caraballo J., (2002), “Fault Tree Handbook with Aerospace Applications”, NASA Office of Safety and Mission Assurance
10. CEER, (2018), “Pan-European cost-efficiency benchmark for gas transmission system operators”, EUROPEAN GAS TSO BENCHMARKING
11. Cervová J., (2015), “Selected types of corrosion degradation of pipelines”, Jas F, Korozne a ochrana materiálu 59(1) 30-36 (2015)
12. Chan C., (2005), “An expert decision support system for monitoring and diagnosis of petroleum production and separation processes”, Elsevier’s Science & Technology
13. Cheng Y.F., (2013), “Stress Corrosion Cracking of Pipelines”, Pipeline Engineering University of Calgary
14. Chio L., (2015), “Statistical Analyses of Historical Pipeline Incident Data with Application to the Risk Assessment of Onshore Natural Gas”, <https://ir.lib.uwo.ca/etd/2925>, Western University, Electronic Thesis and Dissertation Repository

15. Coshman A., (2004), “An Overview of the Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)”, 4th International Pipeline Technology Conference at Oostende, Belgium
16. Debray B., Piatyszek E., Cauffet E., (2004), “APPENDIX 7: Frequencies and probabilities data for the fault tree”, Ecole Nationale Supérieure de Mines de Saint Etienne (France)
17. Elboujdaini M., (2008), “Metallurgical factors in stress corrosion cracking (SCC) and hydrogen-induced cracking (HIC)”, J Solid State Electrochem (2009) 13:1091–1099 DOI 10.1007/s10008-009-0799-0
18. Farrag K., (2013), “Selection of Pipe Repair Methods”, Gas Technology Institute, Final Report GTI Project Number 21087
19. Gajewska E, (2011) “Risk Management Practices in a Construction Project – a case study”, Master of Science Thesis in the Master’s Programme Design and Construction Project Management / Department of Civil and Environmental Engineering Division of Construction Management / CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
20. Hassannayebi E., (2021), “Predictive analytics for fault reasoning in gas flow control facility: A hybrid fuzzy theory and expert system approach”, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104796>, Elsevier’s Science & Technology
21. Javaherdashti R., (2008), “Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight”, Springer Publications
22. Kabir S., (2017), “An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis”, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.058>
23. Khan M., Hussain M., Djavanroodi F., (2021), “Microbiologically influenced corrosion in oil and gas industries: A Review, International Journal of Corrosion and Scale Inhibition
24. Kishawy H.A., (2009), “Review of pipeline integrity management practices”, International Journal of Pressure Vessels and Piping (journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijpvp)
25. Kostiv V., 2021, “Detection and Assessment of Defects in Gas Pipelines”, Gas Transmission System Operator of Ukraine LLC, Ivano-Frankivsk, Ukraine, DOI: 10.1007/978-3-030-58073-5_10, Springer Publications
26. Kumar P., (2010), “Project risk management using multiple criteria decision-making technique and decision tree analysis: a case study of Indian oil refinery”, <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.586379>, Production Planning & Control / The Management of Operations
27. Lahiri A., (2017), “Applied Metallurgy and Corrosion Control”, Indian Institute of Metals Series <http://www.springer.com/series/15453>
28. Larsson L., “Pipeline Integrity, (2014), “Best Practices to Prevent, Detect, and Mitigate Commodity Releases”, Schneider Electric White Paper

29. Louthan M., (1978), “Fault Tree Technique and Failure Analysis”, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg. Virginia
30. Marsh J., 2008, “Corrosion Management for Aging Pipelines - Experience from the Forties Field”, Society of Petroleum Engineers at International Oilfield Corrosion Conference in Aberdeen
- Spanidis P.M. and Batzias F.A, (2010), “A Knowledge based approach for preventing air pollution due to Hydrogen Induced Corrosion in Gas Pipelines”
31. Nikolic R., (2020), “The Fault Tree Analysis of causes of the welded pipes failures in exploitation” <https://doi.org/10.26552/com.C.2020.1.62-70>, Research Center, University of Zilina, Slovakia
32. Ohaeri E., (2018), “Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review”, journal homepage: www.elsevier.com/locate/he
33. Ossai C., (2014), “Pipeline failures in corrosive environments – A conceptual analysis of trends and effects”, www.elsevier.com/locate/engfailanal
34. Palmer-Jones P. (2008), “The Development of an Emergency Repair System, and a Case Study for a remote gas pipeline”, 7th International Pipeline Conference
35. Palmer R., (2008), “A Proposal for the Development of an International Recommended Practice in Pipeline Defect Assessment and Repair Selection”, International Conference on The Evaluation and Rehabilitation of Pipelines at Prague
36. Papavinasam S., (2014), ”Corrosion Control in the Oil and Gas Industry”,
DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04629-X>
37. Pandey M., (2010), “Fault Tree Analysis”, CIVE 240 – Engineering and Sustainable Development, University of Waterloo
38. Perez N., (2016), “Electrochemistry and Corrosion Science, Chapter 1: Forms of Corrosion”, DOI:10.1007/978-3-319-24847-9, Springer Publications
39. Perumal B., (2017), “Risk Analysis using Corrosion Rate Parameter on Gas Transmission Pipeline”, The 4th International Conference on Advanced Materials Science and Technology, doi:10.1088/1757-899X/202/1/012099
40. Pirbalouti R., (2023), “An advanced framework for leakage risk assessment of hydrogen refueling station using interval-valued spherical fuzzy sets (IV-SFS)”, Elsevier’s Science & Technology
41. PMBOK, (2013), “A Guide to the Project Management Body of Knowledge”, Project Management Institute, PMBOK guide, HD69.P75G845 2013/658.4’04--dc23, Fifth Edition, www.PMI.org
42. Pourazizi R., (2020), “Investigation of different failure modes in oil and natural gas pipeline steels”, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104400>, Elsevier’s Science & Technology

43. Roberge P., (2000), “Handbook of Corrosion Engineering”, McGraw-Hill Editions
44. Roberge R., (1996), “A framework for the prediction and management of environmental cracking problems”, Department of Chemistry and Chemical Engineering, Royal Military College, Kingston, Ontario, Canada
45. Saaty T., (1980), “The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation”. McGraw-Hill, New York.
46. Saaty T., (2008), “Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences”, 1(1): 83-98.
47. Sadeghi E., (2010), “Failure analysis of stress corrosion cracking occurred in a gas transmission steel pipeline”, doi:10.1016/j.engfailanal.2010.11.014, Engineering Failure Analysis 18 (2011) 963–970
48. Singh R., (2014), “Pipeline Integrity Handbook: Risk Management and Evaluation”, Elsevier’s Science & Technology
49. Spanidis P.M., Roumpos R., Pavloudakis F., (2019), “A Methodology for Natural Hazards Risk Management in Continuous Surface Lignite Mines”, 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure
50. Taleb-Berrouane M., (2021), “Corrosion risk assessment using adaptive bow-tie (ABT) analysis”, <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107731>, Reliability Engineering and System Safety 214 (2021) 107731
51. Turnbull A., (2020), “Corrosion Control for Buried Pipelines”, National Physical Laboratory (Guides to Good Practice in Corrosion Control No. 4)
52. Urbanik M., (2019), “Analysis of the Safety of Functioning Gas Pipelines in Terms of the Occurrence of Failures”, Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture, Rzeszow University of Technology, Rzeszow 35-959, Poland Cost 1
53. Vairo T., Pontiggia M., Fabiano B., (2020), “Critical aspects of natural gas pipelines risk assessments. A case-study application on buried layout”, Process Safety and Environmental Protection (journal homepage: www.elsevier.com/locate/psep) Vishnuvardhan S., (2023), “A review on pipeline failures, defects in pipelines and their assessment and fatigue life prediction methods”, Elsevier’s Science & Technology Ltd
54. Wasim M., (2018), “Factors influencing corrosion of metal pipes in soils”, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018, <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>
55. Whiteley M., (2015), “Failure Mode and Effect Analysis, and Fault Tree Analysis of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.007>, Elsevier’s Science & Technology

56. Winston R., Herbert H. Uhlig, (2008), “Corrosion and Corrosion Control, Chapter 14: Metallic Coatings” John Wiley & Sons, Inc.
57. Yuhua D., (2004), “Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis”, University of Petroleum of Beijing, Department of Material Science and Engineering, doi:10.1016/j.jlp.2004.12.003
58. Zhao K., (2008), “Investigation of Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) and biocide treatment in anaerobic salt water and development of a mechanistic mic model”, Russ College of Engineering and Technology of Ohio University

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γενεθλίου Γ., (2021), “Καθοδική Προστασία Μεταλλικών Αγωγών”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
2. Δαρειωτάκη Ε.Π., (2016), “Ποσοτική και βάσει κινδύνου προσέγγιση της βελτιστοποίησης των διαστημάτων προληπτικής συντήρησης των Μετρητικών και Ρυθμιστικών Σταθμών Φυσικού Αερίου της ΕΠΑ ΑΤΤΙΚΗΣ Α.Ε”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο / Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών / Διπλωματική Εργασία
3. Κορτίνας Κ., (2018), "Καθοδική Προστασία Μεταλλικών Κατασκευών", ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ/ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
4. Κωνσταντινίδης Ν., (2013), “Οι διαβρώσεις του χάλυβα στους ατμολέβητες”, Πτυχιακή Εργασία, ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ / ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
5. Σκορδέλη Α., Σαράντου Α., (2017), “Κριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Ανάλυσης και Εκτίμησης Επικινδυνότητας Επαγγελματικού Κινδύνου”, ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
6. Υφαντής Δ., (2008), “Υλικά Διάβρωση και Προστασία”, ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. DESFA TECHNICAL LIBRARY
Σύνδεσμος: <https://www.desfa.gr/projects/library/Pipelines/welding-vessels>
[Τελευταία Πρόσβαση: 15/10/2023]
2. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-001: Welding for Equipment and Piping”,
3. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-002: Technical Specification: High Pressure (HP) Transmission Systems - Steel Pipe”
4. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-004: Welding Inspection”
5. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-006: Pressure Testing“
6. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-011: Bends”
7. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-012: Welding”
8. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-013: Corrosion Protection of Field Joints and Uncoated Pipeline Components”
9. DESFA, 2021, “DSF-SPC-PIP-014: Pipe Lowering”
10. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-015: Tie-Ins”
11. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-016: Crossings”
12. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-017: Drying”
13. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-022: Mechanical Erection”
14. DESFA, (2021), “DSF-SPC-PIP-023: Welding Inspection of Piping for M/R Station”
15. DESFA, (2021), “DSF-SPC-CIV-005: Backfilling”
16. DESFA, (2021), “DSF-SPC-QAC-005: Shop Inspection of Equipment And Materials For NGT Project”
17. DESFA, (2021), “DSF-SPC-CPR-001: Cathodic Protection Anode Material”
18. DESFA, (2021), “DSF-SPC-CPR-002: Cathodic Protection, Transformer Rectifier Cabinets at Anode Beds”
19. Gopal R., (2020), “Types of Pipe Corrosion & Failure”, Corrosionpedia, Σύνδεσμος: <https://www.corrosionpedia.com/21-types-of-pipe-corrosion-failure/2/1484>
[Τελευταία Πρόσβαση: 15/10/2023]
20. Mwiks K. (2020), “Causes and Prevention of Corrosion on Welded Joints”, Σύνδεσμος: <https://www.corrosionpedia.com/2/4503/corrosion-prevention/causes-and-prevention-of-corrosion-on-welded-joints>
[Τελευταία Πρόσβαση: 15/10/2023]
21. PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, (Υπηρεσία Ασφάλειας Αγωγών και Επικίνδυνων Υλικών) Σύνδεσμος: https://portal.phmsa.dot.gov/analytics/saw.dll?Portalpages&PortalPath=%2Fshared%2FPDM%20Public%20Website%2F_portal%2FSC%20Incident%20Trend&Page=All%20Reported
[Τελευταία Πρόσβαση: 14/10/2023]
22. PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, (Υπηρεσία Ασφάλειας Αγωγών και Επικίνδυνων Υλικών) Σύνδεσμος: <https://www.phmsa.dot.gov/pipeline/pipeline-construction/phases-pipeline-construction-overview>
[Τελευταία Πρόσβαση: 15/10/2023]
23. Trading Economics: Σύνδεσμος: <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>
[Τελευταία Πρόσβαση: 30/03/2024]