



Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα

Διαχείριση Τεχνικών έργων

Διπλωματική Εργασία

«Υγεία και ασφάλεια των εργαζομένων στον Τομέα
μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου»

Ονοματεπώνυμο Φοιτήτριας

ΓΑΡΟΥ ΡΑΦΑΗΛΙΑ – ΕΙΡΗΝΗ

Επιβλέπων Καθηγητής

ΜΑΝΑΡΙΩΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Πάτρα
Σεπτέμβριος, 2026



Postgraduate Program
Engineering Project Management

Master's Thesis

«Health and Safety of Workers in the Natural Gas
Transmission and Distribution Sector»

Student Name

GAROU RAFAILIA - IRINI

Supervisor

MANARIOTIS IOANNIS

Patra
September, 2026

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μαναριώτη Ιωάννη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωσή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην αδερφή μου Τάνια στην οποία και αφιερώνω αυτήν την Διπλωματική Εργασία, για την συνεχή στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζει τη μεταφορά και τη διανομή φυσικού αερίου, με έμφαση στην αξιολόγηση των κινδύνων και στα μέτρα υγείας και ασφάλειας που αφορούν τις υποδομές και τους εργαζόμενους του κλάδου. Το φυσικό αέριο αποτελεί βασικό στοιχείο του σύγχρονου ενεργειακού συστήματος, λόγω της εκτεταμένης χρήσης του και του συγκριτικά χαμηλότερου περιβαλλοντικού του αποτυπώματος σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα. Παρά τα πλεονεκτήματά του, η εύφλεκτη φύση του και οι υψηλές πιέσεις λειτουργίας των δικτύων καθιστούν αναγκαία τη συστηματική διαχείριση της ασφάλειας.

Κύριος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των κινδύνων που προκύπτουν κατά τη μεταφορά και τη διανομή φυσικού αερίου, καθώς και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων πρόληψης και προστασίας. Παράλληλα, διερευνάται το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο σε εθνικό, ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, με σκοπό την αποτύπωση του βαθμού συμμόρφωσης και της εφαρμογής των προβλεπόμενων πολιτικών ασφάλειας. Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στον ανθρώπινο παράγοντα, στην εκπαίδευση του προσωπικού και στη σημασία της οργανωτικής κουλτούρας ασφάλειας.

Αρχικά παρουσιάζεται η οργάνωση και λειτουργία των δικτύων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, καθώς και οι βασικές τεχνικές παράμετροι που επηρεάζουν την ασφαλή λειτουργία τους. Στη συνέχεια αναλύονται οι κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σε τεχνικούς, υγειονομικούς και περιβαλλοντικούς. Επιπλέον, εξετάζονται οι σύγχρονες μέθοδοι εκτίμησης και διαχείρισης κινδύνων, καθώς και εργαλεία πρόληψης ατυχημάτων που εφαρμόζονται διεθνώς.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση και σύγκριση πολιτικών και πρακτικών ασφάλειας σε διάφορες χώρες. Από την συνολική ανάλυση προκύπτει ότι, παρά την ύπαρξη επαρκούς θεσμικού πλαισίου, η αποτελεσματική πρόληψη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεπή εφαρμογή των κανονισμών, τη συνεχή εκπαίδευση και την αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών. Συμπερασματικά, η ασφάλεια στη μεταφορά και διανομή φυσικού αερίου απαιτεί μία ολιστική προσέγγιση που συνδυάζει τεχνικά, οργανωτικά και ανθρώπινα μέτρα, με στόχο την προστασία των εργαζομένων, του περιβάλλοντος και της αξιοπιστίας του ενεργειακού συστήματος.

Λέξεις -Κλειδιά: Φυσικό Αέριο, Μεταφορά και Διανομή, Υγεία και Ασφάλεια στη Εργασία, Αξιολόγηση Κινδύνων, Πρόληψη Ατυχημάτων, Νομοθετικό Πλαίσιο, Ανθρώπινος Παράγοντας, Ενεργειακές Υποδομές

Abstract

The present thesis examines the transmission and distribution of natural gas, with a particular emphasis on risk assessment and the health and safety measures related to infrastructure and workers in the sector. Natural gas is a key component of the modern energy system due to its widespread use and its comparatively lower environmental impact compared to other fossil fuels. Despite its advantages, its flammable nature and high operating pressures of gas networks make systematic safety management essential.

The main objective of the thesis is to analyze the risks arising during the transmission and distribution of natural gas, and to evaluate the effectiveness of existing prevention and protection measures. At the same time, the relevant legislative framework at national, European and International levels is examined, with the aim of assessing the degree of compliance and implementation of prescribed safety policies. Particular emphasis is placed on the human factor, staff training and the importance of an organizational safety culture.

Initially, the organization and operation of natural gas transmission and distribution networks represented, along with the main technical parameters that affect their safe operation. Subsequently, the risks faced by workers are analyzed and categorized into technical, health related and environmental risks. In addition, modern methods of risk assessment and management are examined, as well as accident prevention tools applied internationally.

The thesis concludes with the presentation and comparison of safety policies and practices in various countries. The overall analysis indicates that, despite the existence of an adequate institutional framework, effective prevention largely depends on the consistent implementation of regulations, continuous training and the utilization of modern technologies. In conclusion, safety in the transmission and the utilization of modern technologies. In conclusion, safety in the transmission and distribution of natural gas requires a holistic approach that combines technical, organizational and human measures, aiming to protect workers, the environment and the reliability of the energy system.

Keywords: Natural Gas and Distribution, Risk Assessment, Occupational Health and Safety, Safety Management, Infrastructure, Legislative Framework, Accident Prevention, Safety Culture, Human Factor.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	11
1.1. Αντικείμενο και Σκοπός της εργασίας	11
1.2 Περιγραφή Μεθοδολογίας Ανάλυσης	12
1.2 Δομή Εργασίας	12
Κεφάλαιο 2: Γενική Επισκόπηση του Τομέα Μεταφοράς και Διανομής Φυσικού Αερίου	14
2.1 Ορισμός και Διαδικασία Μεταφοράς Φυσικού Αερίου	14
2.2 Βασικές Δραστηριότητες στον Τομέα της Διανομής Φυσικού Αερίου	16
2.3 Οργάνωση και Λειτουργία του Δικτύου Μεταφοράς	18
Κεφάλαιο 3: Αξιολόγηση Κινδύνων και Ασφαλιστικά Μέτρα	22
3.1 Κίνδυνοι που Αντιμετωπίζουν οι Εργαζόμενοι	22
3.2 Ανάλυση των Παραμέτρων Κινδύνου	24
3.2.1. Τεχνικοί και Υλικοί Παράγοντες	24
3.2.2. Κίνδυνοι Διαρροής, Έκρηξης και Πυρκαγιάς	25
3.2.3. Περιβαλλοντικοί και Κοινωνικοί κίνδυνοι	25
3.2.4. Οργανωτικοί, Λειτουργικοί και Ανθρώπινοι παράγοντες	25
3.2.5. Αγορά, Ρυθμιστικό πλαίσιο και Συστημικοί Παράγοντες	25
3.2.6. Κίνδυνοι που Συνδέονται με Αλλαγές και Μεταβάσεις	26
3.3 Σύγχρονοι Μέθοδοι Εκτίμησης Κινδύνου	26
Κεφάλαιο 4: Νομοθετικό Πλαίσιο και Κανονισμοί Υγείας	30
4.1 Διεθνής Κανονισμοί και Πρότυπα	30
4.1.1. Ιστορικό Πλαίσιο και Εξέλιξη των Διεθνών Κανονισμών	30
4.1.2. Διεθνείς Οργανισμοί και το Έργο τους	31
4.1.3. Βέλτιστες Πρακτικές και Εφαρμογή Προτύπων	33
4.1.4. Παραδείγματα Ατυχημάτων και Επιρροή στη Νομοθεσία	33
4.2 Εθνική Νομοθεσία για την Υγεία και την Ασφάλεια στον Τομέα Φυσικού Αερίου	34
4.2.1. Νομοθετικό Πλαίσιο	34
4.2.2. Υποχρεώσεις εργοδοτών και Εργαζομένων	35
4.2.3. Συστήματα Ελέγχου και Επιθεώρησης	36
4.2.4. Εκπαίδευση και Πιστοποίηση Προσωπικού	38
4.2.5. Σύγκριση με Διεθνή Πρότυπα	39
4.3 Πολιτικές και Πρακτικές Ασφάλειας σε Διάφορες Χώρες	40
4.3.1. Διεθνείς Πρακτικές και Εφαρμογές	40

4.3.2 Συγκριτική Ανάλυση	42
4.4 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την Προστασία των Εργαζομένων	42
4.4.1 Γενικό Νομοθετικό Πλαίσιο της ΕΕ.....	43
4.4.2 Υποχρεώσεις Εργοδοτών και Δικαιώματα Εργαζομένων	44
4.4.3 Εφαρμογή Οδηγιών σε Ευρωπαϊκές χώρες	45
4.4.4 Συστήματα Διαχείρισης και Πρόληψης Ατυχημάτων	46
5.1.1 Αρχές και Φιλοσοφία Πρόληψης	48
5.1.2 Κατηγορίες Στρατηγικών Πρόληψης	50
5.1.3 Ανάπτυξη Κουλτούρας Ασφάλειας στον Τομέα Μεταφοράς και Διανομής Φυσικού Αερίου	54
5.1.4.Ειδικές Προληπτικές Πρακτικές.....	55
5.1.5 Εφαρμογή στην Ελληνική Πραγματικότητα	56
5.2 Σχέδιο Εκπαίδευσης και Κατάρτισης για την Ασφάλεια των Εργαζομένων	58
5.2.1 Σκοπός και Θεμελιώδεις Αρχές του Προγράμματος Εκπαίδευσης	59
5.2.2 Δομή και Περιεχόμενο των Προγραμμάτων Εκπαίδευσης	61
5.2.3 Εκπαιδευτικές Μέθοδοι και Παιδαγωγικές Προσεγγίσεις	63
5.2.4 Αξιολόγηση Αποτελεσματικότητας Εκπαίδευσης	65
5.2.5 Οργανωτική Υποστήριξη και Κουλτούρα Ασφάλειας	67
Κεφάλαιο 6: Μελέτες Περίπτωσης και Στατιστικά Ατυχημάτων	69
6.1 Επισκόπηση Πραγματικών Ατυχημάτων στον Τομέα	69
6.1.1.Διεθνή Ατυχήματα στον τομέα.....	69
6.1.2.Ελληνικά Παραδείγματα	71
6.2 Στατιστικά Ατυχημάτων στον Τομέα.....	72
6.3 Σύγκριση με Άλλους Τομείς Επικίνδυνων Εργασιών	73
6.4 Ανάλυση των Αιτιών των Ατυχημάτων και Εφαρμογή Διορθωτικών Μέτρων	75
6.4.1 Κατηγοριοποίηση Αιτιών	75
6.4.2 Διορθωτικά Μέτρα	77
Κεφάλαιο 7: Σύγχρονες Τεχνολογίες και καινοτομίες στον Τομέα της Ασφάλειας ...	80
7.1 Χρήση Τεχνολογιών για την Πρόληψη Ατυχημάτων	80
7.1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Ευφυή Συστήματα Παρακολούθησης.....	80
7.1.2 Αισθητήρες και Τεχνολογίες Ανίχνευσης	81
7.1.3 Τεχνολογίες Γεωπροσδιορισμού και Χαρτογράφησης	83
7.2 Νέες Τάσεις στην Ασφάλεια των Εργαζομένων στον Τομέα Φυσικού Αερίου	84
7.2.1 Αυξημένη Χρήση Ψηφιακών Εκπαιδευτικών Πλατφορμών.....	85
7.2.2 Wearable Τεχνολογίες και Βιομετρική Παρακολούθηση	86

7.3 Αυτοματισμός και Ρομποτική για τη Μείωση των Κινδύνων	87
7.3.1 Ρομπότ Επιθεώρησης Σωληνώσεων	88
7.3.2 Αυτόνομη Επιθεώρηση με Μηχανική Μάθηση	90
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	92
8.1.Συμπεράσματα	92
8.2.Προτάσεις.....	92
Βιβλιογραφία	94

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η ασφάλεια και υγεία στην εργασία αποτελούν θεμελιώσεις παραμέτρους για τη βιώσιμη λειτουργία κάθε σύγχρονου παραγωγικού και τεχνικού συστήματος. Στον ενεργειακό τομέα και ειδικότερα στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, η σημασία τους καθίσταται ακόμη πιο κρίσιμη λόγω της φύσης του καυσίμου, των υψηλών πιέσεων λειτουργίας και της πολυπλοκότητας των υποδομών. Η αυξανόμενη ζήτηση για φυσικό αέριο σε συνδυασμό με τη συνεχή επέκταση και αναβάθμιση των δικτύων δημιουργεί νέες προκλήσεις και εντείνει την ανάγκη για συστηματική προσέγγιση των ζητημάτων υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων (European Commission, 2020).

Η παρούσα εισαγωγή αποσκοπεί στην ανάδειξη του πλαισίου μέσα στο οποίο εντάσσεται η Διπλωματική εργασία, παρουσιάζοντας το πρόβλημα, τη μεθοδολογία που ακολουθείται και τη δομή της εργασίας. Μέσα από την ανάλυση αυτή τίθενται οι βάσεις για την κατανόηση των κινδύνων που χαρακτηρίζουν τον κλάδο, καθώς και τη σημασία της πρόληψης και της ορθής διαχείρισης της ασφάλειας σε όλα τα στάδια της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου.

1.1. Αντικείμενο και Σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων στον τομέα της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, με έμφαση στην αναγνώριση και ανάλυση των επαγγελματικών κινδύνων που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των σχετικών υποδομών. Ο τομέας χαρακτηρίζεται από αυξημένη επικινδυνότητα λόγω της φύσης του καυσίμου.

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση των κινδύνων που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι καθώς και της αποτελεσματικότητας των υφιστάμενων μέτρων πρόληψης και προστασίας. Παράλληλα, εξετάζεται το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο και κανονιστικό πλαίσιο.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ανθρώπινο παράγοντα στην εκπαίδευση του προσωπικού και στην καλλιέργεια κουλτούρας ασφάλειας. Τελικός στόχος της εργασίας είναι η συμβολή στη βελτίωση των συνθηκών υγείας και ασφάλειας στον κλάδο, μέσω τεκμηριωμένων συμπερασμάτων και προτάσεων για τη πρόληψη ατυχημάτων και τη βιώσιμη λειτουργία ενεργειακών υποδομών.

1.2 Περιγραφή Μεθοδολογίας Ανάλυσης

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε συνδυασμό θεωρητικής και αναλυτικής προσέγγισης, με στόχο την ολοκληρωμένη διερεύνηση των θεμάτων υγείας και ασφάλειας στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Αρχικά πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών και ελληνικών επιστημονικών πηγών, κανονισμών και τεχνικών εκθέσεων, προκειμένου να αποτυπωθεί το υφιστάμενο επίπεδο γνώσης και οι βέλτιστες πρακτικές που εφαρμόζονται στον κλάδο.

Στην συνέχεια εφαρμόζονται μέθοδοι ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης κινδύνων, με έμφαση στον εντοπισμό και την κατηγοριοποίηση των επαγγελματικών κινδύνων που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι. Η ανάλυση περιλαμβάνει τεχνικούς, υγειονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνικές προδιαγραφές των υποδομών όσο και τον ανθρώπινο παράγοντα. Παράλληλα εξετάζονται σύγχρονες μέθοδοι εκτίμησης κινδύνου και εργαλεία διαχείρισης ασφάλειας που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

Μεγάλη βαρύτητα δίνεται στη μελέτη του ισχύοντος νομοθετικού και κανονιστικού πλαισίου, με σκοπό την αξιολόγηση συμμόρφωσης και της πρακτικής εφαρμογής των προβλεπόμενων διατάξεων. Επιπλέον, μέσω της ανάλυσης στατιστικών δεδομένων ατυχημάτων και επιλεγμένων περιπτώσεων, επιχειρείται η ανάδειξη των κυριότερων αιτιών ατυχημάτων και των παραγόντων που συμβάλλουν στην εμφάνισή τους.

Η μεθοδολογία ολοκληρώνεται με συγκριτική αξιολόγηση πολιτικών και πρακτικών ασφάλειας σε διαφορετικές χώρες, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων που μπορούν να εφαρμοστούν στο ελληνικό πλαίσιο. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη διαμόρφωση μιας ολιστικής εικόνας για την ασφάλεια στον τομέα του φυσικού αερίου και την ανάδειξη βελτιωτικών παρεμβάσεων.

1.2 Δομή Εργασίας

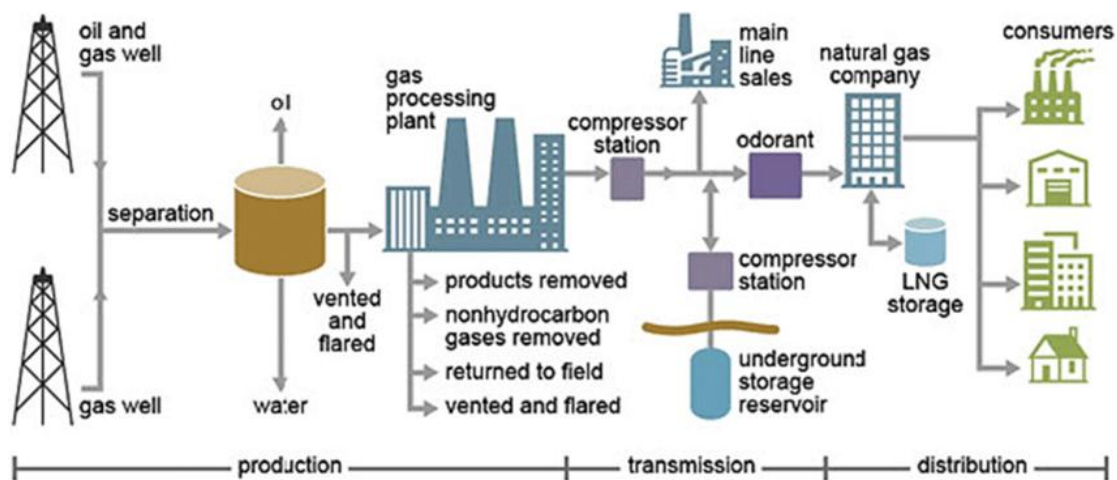
Η παρούσα εργασία δομείται σε οκτώ κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται με λογική αλληλουχία. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εισαγωγή, όπου αναλύεται το υπόβαθρο του θέματος, η σπουδαιότητα του προβλήματος, η μεθοδολογία και η δομή της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία γενική επισκόπηση στον τομέα καθώς είναι η εισαγωγή του Κεφαλαίου 3 που εξετάζεται η αξιολόγηση των κινδύνων και τα μέτρα ασφάλειας που αφορούν τους εργαζόμενους στον τομέα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο σε διεθνές, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο, ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται στρατηγικές πρόληψης και εκπαίδευσης των εργαζομένων. Το Κεφάλαιο 6 επικεντρώνεται σε περιπτώσεις και στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων, ενώ στο Κεφάλαιο 7 εξετάζονται σύγχρονες μέθοδοι που συμβάλλουν στην βελτίωση της ασφάλειας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα και διατυπώνονται προτάσεις για τη βελτίωση της υγείας και της ασφάλειας στον κλάδο.

Κεφάλαιο 2: Γενική Επισκόπηση του Τομέα Μεταφοράς και Διανομής Φυσικού Αερίου

2.1 Ορισμός και Διαδικασία Μεταφοράς Φυσικού Αερίου

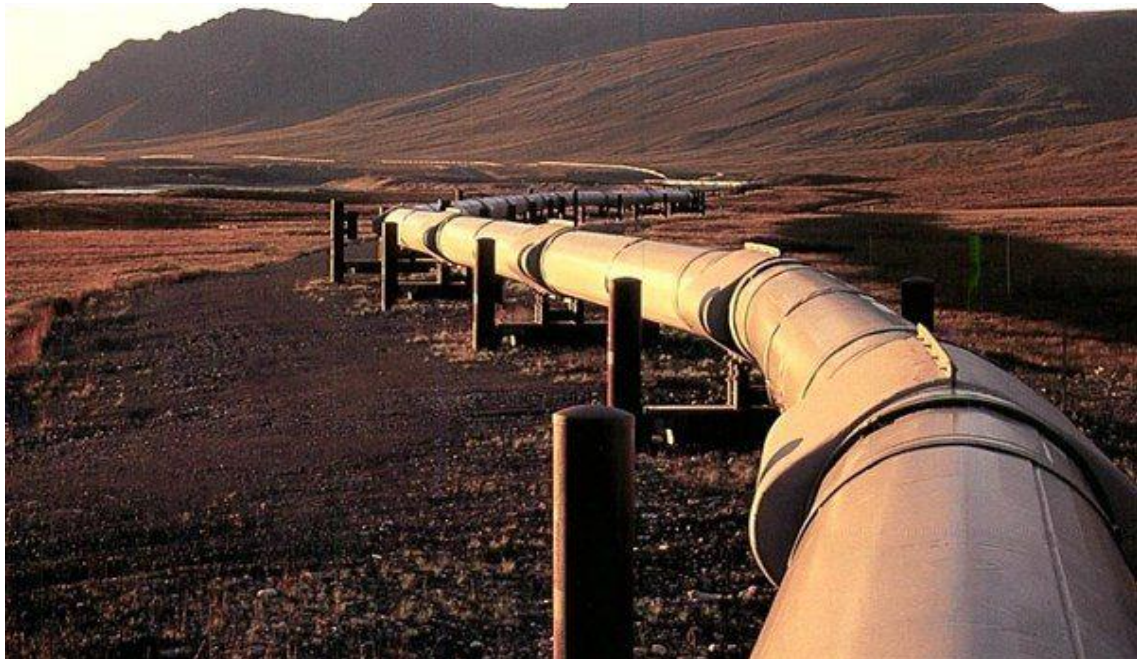
Το φυσικό αέριο είναι μείγμα αερίων, κυρίως μεθανίου (CH_4), το οποίο σχηματίζεται μέσω της αποικοδόμησης οργανικών υλικών και αποτίθεται σε υπόγεια κοιτάσματα. Χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ενέργειας, την θέρμανση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, θεωρείται πιο φιλικό προς το περιβάλλον λόγω των χαμηλών εκπομπών Διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά την χρήση του (United States Energy Information Administration ,2022).



Σχήμα 1: Στάδια μεταφοράς φυσικού αερίου (Πηγή: J.-Sharahi et al., 2021).

Η διαδικασία μεταφοράς του φυσικού αερίου είναι σύνθετη και περιλαμβάνει μία σειρά από στάδια που απαιτούν εξειδικευμένο τεχνολογικό εξοπλισμό και διαδικασίες για την ασφαλή και αποτελεσματική μεταφορά του από τα σημεία εξόρυξης και αποθήκευσης προς τους καταναλωτές (International Energy Agency,2020). Η εξόρυξη του πραγματοποιείται μέσω γεωτρήσεων από υπόγεια κοιτάσματα, από όπου εξάγεται μαζί με άλλες ακαθαρσίες, όπως νερό και θείο. Αυτές οι ακαθαρσίες απομακρύνονται μέσω ειδικών διαδικασιών επεξεργασίας, με στόχο την βελτίωση της ποιότητας του αερίου και την προετοιμασία του για την περαιτέρω μεταφορά του (Boiko et al., 2017).

Αμέσως μετά την εξόρυξη, το φυσικό αέριο συμπιέζεται σε υψηλές πιέσεις, συνήθως άνω των 70 bar , ώστε να μειωθεί ο όγκος του και να διευκολυνθεί η μεταφορά του μέσω αγωγών (Καραμανλής & Σταμούλης, 2017). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την αποδοτική μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων αερίου, δεδομένου ότι οι αγωγοί, οι οποίοι εκτείνονται σε χιλιάδες χιλιόμετρα, αποτελούν την βασική υποδομή για τη διασύνδεση των σημείων παραγωγής με τις περιοχές κατανάλωσης (Rios – Mercado & Borraz - Sanchez, 2015). Οι αγωγοί αυτοί κατασκευάζονται από ειδικά υλικά, όπως χάλυβας, ο οποίος είναι ανθεκτικός σε υψηλές πιέσεις και εξασφαλίζουν μακροχρόνια και ασφαλή λειτουργία του συστήματος (Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού αερίου 2024),



Σχήμα 2: Υποδομή αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου υψηλής πίεσης (Ecopress, 2022,

Πηγή: <https://ecopress.gr>)

Σε περιπτώσεις που η άμεση ζήτηση είναι μικρότερη από την προσφορά, το φυσικό αέριο μπορεί να αποθηκευτεί σε υπόγειες αποθήκες. Η αποθήκευση αυτή είναι απαραίτητη για την κάλυψη της ζήτησης και την αντιμετώπιση τυχόν διαταραχών στην παραγωγή και προμήθεια του, επιτρέποντας την τροφοδοσία ακόμη και σε περιόδους έκτακτης ανάγκης ή υψηλής ζήτησης (Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων Ενέργειας και Υδάτων, ΠΑΕΥΥ, 2023). Η διανομή του φυσικού αερίου γίνεται προς τους καταναλωτές μέσω μικρότερων δικτύων αγωγών, που συνδέουν τα κεντρικά δίκτυα μεταφοράς με νοικοκυριά, βιομηχανίες και άλλους χρήστες (American Gas

Association, 2021). Στο στάδιο αυτό, το αέριο πέφτει σε χαμηλότερες πιέσεις μέσω των σταθμών, προκειμένου να προσαρμοστεί στις ανάγκες των χρηστών του (CEN, 2021, European Committee for Standardization, CEN, 2021). Η ασφάλεια της μεταφοράς του αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα, καθώς οι διαρροές ή απερισκεψίες κατά το στάδιο μεταφοράς του, ενδέχεται να προκαλέσει σοβαρές συνέπειες (Davatgar et al., 2019). Για το λόγο αυτό, συντήρηση των αγωγών και η χρήση σύγχρονων συστημάτων ανίχνευσης διαρροών και παρακολούθησης είναι απαραίτητα για την αποτροπή ατυχημάτων (Gao et al., 2020).

Η τεχνολογία έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο όσο αναφορά την παρακολούθηση των αγωγών και την αξιολόγηση καταστάσεων κινδύνου, με τη χρήση εξελιγμένων συστημάτων GPS και αισθητήρων, που επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση και αντιμετώπιση προβλημάτων (Kumar et al., 2025). Παράλληλα, η χρήση χημικών ουσιών για τη συντήρηση και προστασία των υποδομών από φθορές, συντελεί στη διατήρηση της ακεραιότητας των αγωγών και στη μείωση του κόστους συντήρησης (Liu et al., 2020).

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου ως καύσιμο, η διαδικασία μεταφοράς του δεν είναι απαλλαγμένη από περιβαλλοντικούς κινδύνους. Αν και το φυσικό αέριο προκαλεί μικρότερες εκπομπές ρύπων σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα κατά την μεταφορά του, η διαρροή μεθανίου μπορεί ακόμη και σε μικρές ποσότητες να συμβάλλει στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Tsochatzidi & Tsochatzidis, 2023). Ακόμη, η κατασκευή των αγωγών ενδέχεται να έχει επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, καθώς μεγάλης κλίμακας έργα απαιτούν εκτεταμένες παρεμβάσεις στο έδαφος και ενδέχεται να επηρεάσουν τη βιοποικιλότητα των περιοχών από τις οποίες περνούν (Anderson, 2020).

2.2 Βασικές Δραστηριότητες στον Τομέα της Διανομής Φυσικού Αερίου

Η διανομή φυσικού αερίου συνιστά ένα από τα πιο σύνθετα και κρίσιμα στάδια στην ενεργειακή αλυσίδα εφοδιασμού, αποτελώντας τη γέφυρα μεταξύ των δικτύων μεταφοράς υψηλής πίεσης και των τελικών καταναλωτών. Η σημασία της έγκειται στην ικανότητα της να παρέχει αξιόπιστη, ασφαλή και αποδοτική παροχή φυσικού αερίου σε διάφορες κατηγορίες πελατών, οι οποίες περιλαμβάνουν οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς χρήστες. Η ομαλή λειτουργία του τομέα προϋποθέτει

την υλοποίηση ποικίλων τεχνικών και διοικητικών δραστηριοτήτων, οι οποίες θα διασφαλίζουν την συνεχή και ποιοτική παροχή του καυσίμου (Μπαλατζής, 2018).

Αρχικά η διανομή βασίζεται στην λειτουργία ενός εκτεταμένου δικτύου αγωγών χαμηλής και μέσης πίεσης, τα οποία συνδέουν τους Σταθμούς Μείωσης Πίεσης (ΣΜΠ) με τους τελικούς χρήστες. Οι ΣΜΠ αποτελούν κρίσιμα σημεία ελέγχου, όπου το φυσικό αέριο μειώνεται από τις υψηλές πιέσεις του δικτύου μεταφοράς σε ασφαλή επίπεδα κατάλληλα για διανομή και χρήση (ΔΕΣΦΑ, 2024). Η ακριβής ρύθμιση της πίεσης είναι ουσιώδης για την αποτροπή κινδύνων και την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας των εγκαταστάσεων φυσικού αερίου (CEN, 2021). Παράλληλα με το δίκτυο αγωγών, σημαντικό ρόλο λαμβάνουν και οι υποδομές μέτρησης και ελέγχου ροής του αερίου. Η εγκατάσταση μετρητικών διατάξεων σε κατάλληλα σημεία επιτρέπει την ακριβή καταγραφή της ποσότητας αερίου που διακινείται γεγονός που είναι απαραίτητο για τη διαχείριση των πόρων και την οικονομική αποτίμηση της κατανάλωσης. Οι σύγχρονες τεχνολογίες μέτρησης και οι «έξυπνοι» μετρητές ενισχύουν την ακρίβεια, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων (Kumar et al., 2025).

Η ασφάλεια αποτελεί αδιαπραγμάτευτο στοιχείο στον τομέα διανομής φυσικού αερίου. Δεδομένου της υψηλής πίεσης και της εύφλεκτης φύσης του καυσίμου, απαιτείται συνεχής επιτήρηση των δικτύων, με προληπτικές ενέργειες συντήρησης και τακτικές επιθεωρήσεις (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA, 2023). Η εφαρμογή αυστηρών προτύπων και κανονισμών λειτουργίας, καθώς και η υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών ανίχνευσης διαρροών και παρακολούθησης πίεσης, συμβάλλουν αποφασιστικά στην πρόληψη ατυχημάτων και στην προστασία τόσο των υποδομών όσο και των εργαζομένων (Zhang et al., 2025). Ειδικά προγράμματα εκπαίδευσης και κατάρτισης του προσωπικού διανομής ενισχύουν την ικανότητα αντιμετώπισης εκτάκτων περιστατικών και διασφαλίζουν την ορθή λειτουργία των εγκαταστάσεων (Jabbari et al., 2022).

Ακόμη η σωστή διαχείριση της ζήτησης είναι εξίσου σημαντική, καθώς η παροχή φυσικού αερίου πρέπει να προσαρμόζεται δυναμικά στις διακυμάνσεις της κατανάλωσης. Η ορθολογική διαχείριση περιλαμβάνει την πρόβλεψη της ζήτησης, την βελτιστοποίηση της ροής και τη συντονισμένη λειτουργία του δικτύου ώστε να

αποφεύγονται προβλήματα όπως η υπερφόρτωση ή η ακατάλληλη παροχή αερίου (9Ye et al.,2022). Επιπρόσθετα, η επέκταση και αναβάθμιση των δικτύων διανομής αποτελούν διαρκείς δραστηριότητες με στόχο την διεύρυνση της κάλυψης και την αύξηση της αποδοτικότητας. Η ανάπτυξη νέων δικτύων συνεπάγεται με την λεπτομερή μελέτη περιβαλλοντικών, τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων, καθώς και τη συμμόρφωση με τις ισχύουσες νομοθετικές και ρυθμιστικές διατάξεις. Τα έργα αυτά συμβάλλουν στην κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης και στην ενσωμάτωση νέων καταναλωτών, προωθώντας τη διείσδυση του φυσικού αερίου ως καθαρή πηγή ενέργειας (International Gas Union, IGU,2021).

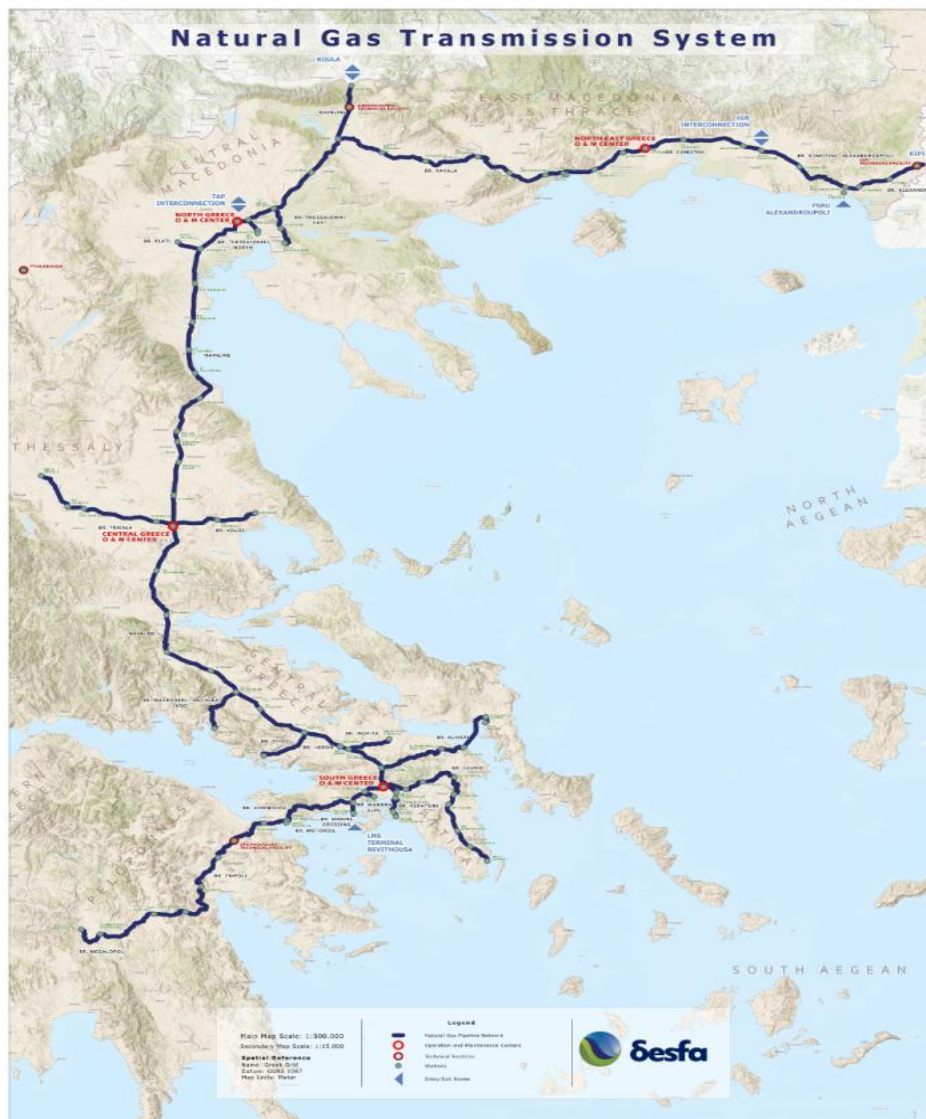
Η διαχείριση εκτάκτων περιστάσεων και η άμεση ανταπόκριση σε βλάβες και άλλες διαταραχές λειτουργίας είναι ουσιαστικές για την ασφάλεια και την συνέχεια της παραγωγής αλλά και της παροχής. Τα επιχειρησιακά σχέδια έκτακτης ανάγκης περιλαμβάνουν διαδικασίες για γρήγορη αποκατάσταση βλαβών, πρόληψη επιπτώσεων και επικοινωνία με τις αρμόδιες αρχές αλλά και τους καταναλωτές (Gas Networks Ireland, 2022). Τέλος, η διαρκής επικοινωνία και η υποστήριξη των πελατών συνιστούν βασικό στοιχείο για την καλή λειτουργία του τομέα διανομής. Η ενημέρωση σχετικά με θέματα ασφαλείας, τιμολόγησης, νέων υπηρεσιών και τεχνικών απαιτήσεων, καθώς και η παροχή άμεσης και αποτελεσματικής τεχνικής υποστήριξης, ενισχύουν την εμπιστοσύνη των χρηστών και προάγουν την βιωσιμότητα της ενεργειακής αλυσίδας.

Συνολικά , οι βασικές δραστηριότητες στον τομέα της διανομής φυσικού αερίου απαιτούν συνδυασμό τεχνικής αρτιότητας, ασφάλειας, περιβαλλοντικής ευαισθησίας και υψηλού επιπέδου εξυπηρέτησης, ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του δικτύου και η ασφαλής παροχή ενέργειας στον τελικό χρήστη.

2.3 Οργάνωση και Λειτουργία του Δικτύου Μεταφοράς

Το δίκτυο μεταφοράς του φυσικού αερίου αποτελεί το βασικότερο στάδιο της υποδομής για την αξιοποίηση του ως καύσιμο πρώτης ύλης και ενεργειακού πόρου. Η οργάνωση και η λειτουργία απαιτούν σαφή δομή, τεχνικά και ρυθμιστικά πλαίσια, καθώς και συντονισμό μεταξύ πολλαπλών εμπλεκόμενων φορέων. Η αρχική φάση περιλαμβάνει την εισαγωγή ,την παραγωγή του φυσικού αερίου και την επεξεργασία του φυσικού αερίου όπως αφαίρεση υδρογονανθράκων και εν συνεχεία την είσοδο στο σύστημα υψηλής πίεσης μεταφοράς (Boiko at al.,2017). Μέσω των μεγάλων αγωγών

και με υψηλή πίεση, κυρίως 50-80 bar το αέριο μεταφέρεται προς τους καταναλωτές, ενώ παράλληλα υπάρχουν διακλαδώσεις προς περιφερειακές αγορές με την δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα διεθνή δίκτυα (ΔΕΣΦΑ,2024). Στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς ΔΕΣΦΑ Α.Ε η κύρια γραμμή διατρέχει από τα σύνορα με την Βουλγαρία έως την Αττική με πίεση 70bar και διακλαδώσεις προς διάφορες Περιφέρειες(Asprofos,2013).



**Σχήμα 3:Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα
(ΔΕΣΦΑ,<https://www.desfa.gr>)**

Ως προς την οργάνωση, το σύστημα μεταφοράς διακρίνεται σε διαχειριστή του δικτύου, ο οποίος αναλαμβάνει τη λειτουργία, την συντήρηση, την ανάπτυξη και την διασφάλιση της μεταφορικής ικανότητας προς τους χρήστες. Στο ελληνικό παράδειγμα η ΔΕΣΦΑ Α.Ε έχει την ευθύνη για το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου

(ΕΣΜΦΑ) και το τερματικό υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) στην νησίδα Ρεβυθούσα (ΔΕΣΦΑ,2022). Η λειτουργία του δικτύου παρακολουθείτε σε συνεχή βάση μέσω κέντρων ελέγχου (SCADA/Dispatching Control Centers), στα οποία καταλήγουν μετρήσεις πίεσης, παροχής, θερμοκρασίας και άλλων φυσικοχημικών παραμέτρων στα όρια του δικτύου και στα σημεία εισόδου και εξόδου (Nguyen et al., 2025).Ο TSO (Transmission System Operator) εξασφαλίζει την ασφάλεια του εφοδιασμού, τη σταθερότητα της πίεσης , την ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών, την διαχείριση της ζήτησης και την διαθεσιμότητα της μεταφορικής υποδομής (European Network of Transmission System Operators for gas,(ENTSOG),2023.

Η λειτουργία του δικτύου μεταφοράς συνδέεται άμεσα με τις φυσικές, τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους του συστήματος. Τεχνικά, η μεταφορά του φυσικού αερίου διαμέσου σωληνώσεων απαιτεί τη διατήρηση κατάλληλης πίεσης από συμπιεστές (compressor stations) κατά μήκος του αγωγού για να αντισταθμιστούν οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών και άλλων φαινομένων, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η δυνατότητα αποθήκευσης εντός του δικτύου (line pack) για την κάλυψη μεταβατικών καταστάσεων (Καραμανλής & Σταμούλης, 2017). Από πλευράς διοικητικής λειτουργίας, σημαντικό ρόλο παίζουν οι διαδικασίες για τρίτους χρήστες , η τιμολόγηση της μεταφοράς, ρύθμιση μονοπωλιακών υποδομών και η διασύνδεση με διεθνείς αγορές (European Commission JRC,2022). Για παράδειγμα το σύστημα μεταφοράς των ΗΠΑ περιλαμβάνει πάνω από 180.000 μίλια (περίπου 290.000 χλμ.) αγωγών μεταφοράς καθώς και χιλιάδες σταθμούς μέτρησης, συσσώρευσης και διανομής (U.S. Energy Information Administration,2022).

Η οργάνωση και η λειτουργία απαιτούν επίσης πρόβλεψη για την επέκταση και τον σχεδιασμό του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τη μελλοντική ζήτηση, τις δυνατότητες διασύνδεσης και τις τεχνολογίες αποθήκευσης. Έχουν αναπτυχθεί μοντέλα ολοκληρωμένου σχεδιασμού που συμπεριλαμβάνουν επιλογές για τη δρομολόγηση νέων αγωγών η επέκταση των ήδη υπάρχων, εγκαταστάσεις συμπίεσης, χρονοδιαγράμματα υλοποίησης και πόρους για την υλοποίηση (Üster & Dilaveroğlu, 2014). Για παράδειγμα, η μελέτη « Optimization for design and operation of natural gas transmission networks », ενός μοντέλου που παρουσιάζει μικτό ακέραιο μη γραμμικό σχεδιασμό και λειτουργία δικτύου, που έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του επενδυτικού και λειτουργικού κόστους (Rios – Mercado & Borraz- Sanchez,2015).

Η ρύθμιση αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της οργάνωσης, το νομοθετικό πλαίσιο σε πολλές χώρες και στην Ελλάδα προβλέπει τη διαχωρισμένη λειτουργία μεταφοράς, διανομής και προμήθειας σε τρίτους στο δίκτυο. Στην Ελλάδα, οι σχετικές διατάξεις περιλαμβάνονται στον Ν.4001/2011 (Ελληνική Δημοκρατία, 2011), στον Ν.4336/2015 και σε αντίστοιχες τροποποιήσεις. Ακόμη ο διαχειριστής θα πρέπει να παρέχει πρόσβαση σε τρίτους υπό όρους διαφάνειας και αντικειμενικότητας, μέσω του «Οδηγού Πρόσβασης Τρίτου Χρήστη» που είναι δημοσιευμένο από την ΔΕΣΦΑ Α.Ε (ΔΕΣΦΑ,2024).

Η αποτελεσματικότητά του συστήματος μεταφοράς συναρτάται με την αξιοπιστία εφοδιασμού, την ασφάλεια λειτουργίας, την οικονομική αποδοτικότητα και την περιβαλλοντική συμμόρφωση. Οι διαχειριστές επιδιώκουν των ελαχιστοποίηση διακοπών, τη μείωση απωλειών πίεσης, τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συμπιεστών καθώς και την πρόληψη σε περιπτώσεις αστοχίας σε οποιαδήποτε τμήμα του δικτύου (Κοϊνυράλο et al.,2015). Συγκεκριμένα, στο Ευρωπαϊκό πλαίσιο είναι επιτακτική η ανάγκη για ευελιξία του δικτύου ώστε να αντιμετωπίζεται ο μεγάλος όγκος φορτίων και οι μεταβολές στην προμήθεια λόγω νέων πηγών εισαγωγής LNG (European Commission, 2022). Στην Ελλάδα, η πρόσφατη επέκταση διασύνδεσης μέσω αγωγού προς την Βουλγαρία αποτελεί παραδειγματικό έργο ενίσχυσης της δυνατότητας μεταφοράς και διασύνδεσης με τις περιφερειακές αγορές (ΠΑΕΥΥ,2024).

Η ανάπτυξη του δικτύου, τόσο σε τεχνικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο, απαιτεί συνεχείς επενδύσεις, συντήρηση και προσαρμογή στα μεταβαλλόμενα ενεργειακά δεδομένα, ώστε το σύστημα να παραμείνει μακροχρόνια βιώσιμο. Στην Ελλάδα η ΔΕΣΦΑ στοχεύει σε αυτό και στην διασύνδεση με την Ευρωπαϊκή αγορά (ΔΑΣΦΑ, 2023).

Κεφάλαιο 3: Αξιολόγηση Κινδύνων και Ασφαλιστικά Μέτρα

3.1 Κίνδυνοι που Αντιμετωπίζουν οι Εργαζόμενοι

Η μεταφορά και διανομή του φυσικού αερίου αποτελεί κρίσιμο κομμάτι της ενεργειακής υποδομής καθώς οι εργαζόμενοι έρχονται αντιμέτωποι με πολλαπλές μορφές επαγγελματικού κινδύνου. Ειδικότερα, οι εργαζόμενοι που συμμετέχουν σε εργασίες δικτύων, υπογείων σωληνώσεων, σταθμών συμπίεσης, διανομής και συντήρησης του φυσικού αερίου εκτίθενται τόσο σε τεχνικούς και μηχανικούς κινδύνους όσο και σε υγειονομικούς και οργανωτικούς παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την υγεία και ασφάλεια τους (Koivupalo et al.,2015).

Τα χαρακτηριστικά της εργασίας σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν έργα σε περιβάλλον όπου υφίστανται υψηλές πιέσεις, χρήση τεχνολογικών εγκαταστάσεων, δυνατότητα έκλυσης εύφλεκτων και τοξικών αερίων, περιορισμένοι χώροι, μετακινήσεις και εργασίες υπό δύσκολες συνθήκες (Zou et al.,2024). Ως εκ τούτου η καταγραφή και η ανάλυση των κινδύνων γίνεται απαραίτητη για την χάραξη μέτρων πρόληψης και προστασίας (ΕΛΙΝΥΑΕ,2020).

Οι παράγοντες κινδύνου μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Πρώτον, οι τεχνικοί και μηχανικοί κίνδυνοι: η ύπαρξη δικτύων υψηλής πίεσης, η πιθανότητα διαρροών, έκρηξης ή πυρκαγιάς, η χρήση βαρέων μηχανημάτων, ο κίνδυνος εγκλωβισμού ή πτώσεις σε υπόγειους χώρους ή σε ανοικτές εκσκαφές (Davatgar et al.,2019). Δεύτερον, οι υγειονομικοί και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι: έκθεση σε τοξικά αέρια, χαμηλό επίπεδο οξυγόνου, έκθεση σε θόρυβο, δονήσεις, διαρκής και επαναλαμβανόμενη χειρωνακτική εργασία, ανατομική καταπόνηση (Boiko et al.,2017). Τρίτον, οι οργανωτικοί και εργασιακοί κίνδυνοι: εργασία σε απομακρυσμένες περιοχές, μετακινήσεις, έλλειψη επαρκούς εκπαίδευσης και η γενική κουλτούρα ασφάλειας που δεν είναι επαρκώς ενσωματωμένη στους εργασιακούς κύκλους (Fernandez – Muniz et al.,2017).

Τα διεθνή δεδομένα καταδεικνύουν ότι οι εργαζόμενοι στον κλάδο εξόρυξης και μεταφοράς υδρογονανθράκων έχουν υψηλότερα ποσοστά επαγγελματικού τραυματισμού και θνησιμότητας σε σχέση με άλλες βιομηχανίες (Yuan et al.,2021). Σε ανασκόπηση των εκθέσεων επαγγελματικών κινδύνων για τον τομέα της εξόρυξης

υδρογονανθράκων, διαπιστώθηκε ότι παρά το χαμηλότερο ποσοστό τραυματισμών σε σχέση με τη βιομηχανία κατασκευών, όμως η θνησιμότητα ήταν υψηλότερη κατά πολύ (Mearns et al.,2003). Ειδικότερα, η Occupational safety and Health Administration (OSHA) αναφέρει ότι οι εργαζόμενοι στον χώρο του φυσικού αερίου και του πετρελαίου ενδέχεται να εκτεθούν σε υψηλής πίεσης σωληνώσεις, σε εύφλεκτα και τοξικά υλικά και σε χημικά αέρια.

Στο ελληνικό πλαίσιο η ανάπτυξη του δικτύου διανομής φυσικού αερίου και η διερεύνηση του σε πολλές πόλεις, καθιστά σαφές ότι η σημασία των μέτρων πρόληψης είναι επιτακτική. Επιπρόσθετα, μελέτες της ελληνικής ένωσης υγιεινής και ασφάλειας στην εργασία αναγνωρίζουν εργονομικούς κινδύνους, κινδύνους εκσκαφών, διανομής και εργασιών συντήρησης, όπως χειρωνακτική διακίνηση φορτίων, δονήσεις καθώς και άλλοι επιμέρους παράγοντες (ELINAYE, 2021). Μελέτη για δίκτυα διανομής φυσικού αερίου έδειξε ότι οι πιο κοινές αιτίες ατυχημάτων είναι εξωτερικοί παράγοντες, όπως διάβρωση και ρωγμές στα υλικά (EGIG,2022). Η ύπαρξη υψηλής πίεσης και σωληνώσεων, μαζί με ενδεχόμενες μηχανικές αστοχίες, επιβεβαιώνει την ανάγκη για ειδικά μέτρα ασφαλείας.

Σε ότι αφορά την υγεία των εργαζομένων, η έκθεση σε υγρά και αέρια παραπροϊόντα όπως υδρόθειο (H_2S) και υδρογονάνθρακες μπορεί να έχει άμεσες και μακροχρόνιες επιπτώσεις. Η έκθεση σε υδρογονάνθρακες έχει ήδη συσχετιστεί με θανάτους στην εργασία σύμφωνα με την μελέτη του National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), αναφέρει περιπτώσεις εργατών που έχασαν την ζωή τους σε περιπτώσεις μέτρησης υγρών σε δεξαμενές επειδή παρουσιάστηκαν υψηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων σε περιβάλλον με έλλειψη οξυγόνου (Boiko et al.,2017). Επιπλέον, ο εργονομικός παράγοντας δεν πρέπει να υποτιμάται. Οι χειρωνακτικές εργασίες, οι επαναλαμβανόμενες κινήσεις, η εργασία σε δυσμενείς στάσεις και η χρήση βαρέων εξοπλισμών αυξάνουν την πιθανότητα μυοσκελετικών προβλημάτων (Egyptian Journal of Occupational Medicine, 2017).

Οι οργανωτικοί παράγοντες παίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο. Η εργασία σε βάρδιες, η μετακίνηση σε απομακρυσμένες περιοχές, η αδυναμία επαρκούς εκπαίδευσης και η έλλειψη συντήρησης του εξοπλισμού αυξάνουν τις πιθανότητες ανθρώπινου λάθους ή ατυχήματος (Reason, 2000). Λαμβάνοντας τις παραπάνω διαστάσεις οι βασικές κατευθύνσεις για τον περιορισμό των κινδύνων είναι η τακτική συντήρηση των

δικτύων, η ανίχνευση και έλεγχος διαρροών και η εφαρμογή ασφαλών διαδικασιών εργασίας (Hale & Borgs, 2013). Ακόμη, η σωστή εκπαίδευση των εργαζομένων και η σωστή οργάνωση των εργοταξίων, οι εργαζόμενοι θα πρέπει να συμμετέχουν σε τακτικά επιμορφωτικά προγράμματα για τις διαδικασίες ασφάλειας, τους κινδύνους που επιφέρει ο κλάδος και την πρόληψη των απαραίτητων μέτρων για την αποφυγή ατυχημάτων. Επίσης, η δημιουργία ισχυρής κουλτούρας για την εργατική ασφάλεια με καταγραφή και ανάλυση κινδύνων που μπορούν να δημιουργηθούν θα μπορέσουν να αποτελέσουν βασικό στοιχείο για την δημιουργία ασφαλών εργοταξίων (Zohar, 1980).

3.2 Ανάλυση των Παραμέτρων Κινδύνου

Η μεταφορά και διανομή του φυσικού αερίου αποτελούν κρίσιμα στάδια της ενεργειακής αλυσίδας, τα οποία χαρακτηρίζονται από πολύπλοκες τεχνικές, οργανωτικές, περιβαλλοντικές και συστημικές ιδιαιτερότητες. Οι παράμετροι κινδύνου που τα επηρεάζουν εκτείνονται σε πολυδιάστατους τομείς, από φυσικούς παράγοντες και φθορά υλικών έως την ανθρώπινη παρέμβαση, τις τεχνολογικές εξελίξεις και το νομικό ρυθμιστικό πλαίσιο (Mandryk et al., 2021). Στην παρούσα ανάλυση παρουσιάζονται διεξοδικά οι βασικοί παράγοντες κινδύνου που σχετίζονται με τη μεταφορά και τη διανομή φυσικού αερίου.

3.2.1. Τεχνικοί και Υλικοί Παράγοντες

Η διάβρωση, η γήρανση και η κόπωση των υλικών αποτελούν σημαντικές αιτίες αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, η εξωτερική διάβρωση αγωγών που είναι θαμμένοι στο έδαφος ευνοεί την ανάπτυξη σημειακών αδυναμιών (Rusin et al., 2021). Επιπλέον, η γήρανση των υλικών, η καταπόνηση από εναλλασσόμενα φορτία και η ανεπαρκής συντήρηση αυξάνουν την πιθανότητα μηχανικών βλαβών (Davatgar et al., 2019). Κατασκευαστικές και σχεδιαστικές αδυναμίες, καθώς και λάθη κατά την εγκατάσταση, εντείνουν περαιτέρω τους κινδύνους διαρροής (Jabbari et al., 2022). Φυσικά φαινόμενα, όπως γεωλογικές μετακινήσεις, σεισμικές δονήσεις και διάβρωση από υπόγεια ύδατα, επηρεάζουν την ακεραιότητα των υποδομών (Chen et al., 2024). Επίσης, οι διακυμάνσεις στην πίεση και τη θερμοκρασία εντός των αγωγών δημιουργούν επιπρόσθετα μηχανικά φορτία που μπορεί να οδηγήσουν σε ρήξεις (Wang et al., 2025).

3.2.2.Κίνδυνοι Διαρροής, Έκρηξης και Πυρκαγιάς

Το φυσικό αέριο λόγω της υψηλής ευφλεκτότητας και της διαφυγής του, εγκυμονεί πολλούς και σημαντικούς κινδύνους σε περίπτωση αστοχίας. Οι παράγοντες που αυξάνουν την πιθανότητα διαρροής είναι κακή στεγανότητα, ελαττωματικές συγκολλήσεις, επεμβάσεις τρίτων και φυσικές καταπονήσεις (EGIG,2023). Οι διαρροές σε κατοικημένες περιοχές συνεπάγονται με αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς ή έκρηξης με σοβαρές συνέπειες για τους ανθρώπους και τις υποδομές (National Transportation Safety Board,2011).

3.2.3.Περιβαλλοντικοί και Κοινωνικοί κίνδυνοι

Η αστοχία αγωγών μπορεί να οδηγήσει στην διαφυγή μεθανίου, ενός ισχυρού αερίου που μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του εδάφους και των υδάτων (Reuters,2024). Κάτι τέτοιο μπορεί να προκαλέσει κοινωνικές αντιδράσεις και έλλειψη εμπιστοσύνης των πολιτών συνεπώς θα επηρεαστεί η αποδοχή των υποδομών και των μέτρων ασφαλείας (Anderson, 2020). Η έλλειψη εμπιστοσύνης μπορεί να οδηγήσει σε κοινωνικές εντάσεις και αρνητικές αντιδράσεις.

3.2.4.Οργανωτικοί,Λειτουργικοί και Ανθρώπινοι παράγοντες

Η ορθή λειτουργία του συστήματος απαιτεί αυστηρό έλεγχο, τακτική συντήρηση και επαρκή εκπαίδευση του προσωπικού. Ανθρώπινα λάθη και οργανωτικές ασυνέπειες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές καταστάσεις κινδύνου (Williams et al., 2023). Παράλληλα, οι παρεμβάσεις τρίτων, όπως εκσκαφές και κατασκευές κοντά σε αγωγούς, αποτελούν σημαντικό παράγοντα κινδύνου (EGIG, 2022). Η ικανότητα διαχείρισης κρίσεων και ανθεκτικότητας του συστήματος εξαρτάται από την ύπαρξη σχεδίων έκτακτης ανάγκης, την εμπειρία και τους διαθέσιμους πόρους. (Hosseinnia Davatgar et al.,2021).

3.2.5.Αγορά, Ρυθμιστικό πλαίσιο και Συστημικοί Παράγοντες

Η εξάρτηση από εξωτερικές παράγοντες και γεωπολιτικές εξελίξεις επηρεάζει την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς (International Energy Agency

(IEA),2022). Οι αλληλεξαρτήσεις με άλλα ενεργειακά δίκτυα, όπως το ηλεκτρικό σύστημα, μπορούν να επιφέρουν διαταραχές μεταξύ των τομέων (Wang & Xing, 2023). Η συμμόρφωση με το ρυθμιστικό και νομικό πλαίσιο, καθώς και με τα διεθνή και εθνικά πρότυπα ασφαλείας, είναι κρίσιμα για την μείωση των κινδύνων (Ελληνική Δημοκρατία, 2011).

3.2.6.Κίνδυνοι που Συνδέονται με Αλλαγές και Μεταβάσεις

Η μετάβαση σε νέες μορφές αερίων, όπως η ανάμιξη υδρογόνου με φυσικό αέριο, εισάγει νέους κινδύνους που σχετίζονται με τις σωληνώσεις και τις διαφορετικές διαρροές (Li et al., 2024) (Zou et al.,2024). Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή και τα ακραία καιρικά φαινόμενα αυξάνουν τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας των υποδομών (Lu et al.,2025).

Η μεταφορά και διανομή του φυσικού αερίου αποτελεί από τους πιο σύνθετους τομείς με πολυεπίπεδους κινδύνους. Η αποτελεσματική διαχείριση τους προϋποθέτει συνδυασμό, τεχνικών, οργανωτικών και συστημικών μέτρων. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση των παραμέτρων κινδύνου, με έμφαση στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων από αστοχίες και διαταραχές, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και την αξιοπιστία του ενεργειακού συστήματος (Patel et al., 2024).

3.3 Σύγχρονοι Μέθοδοι Εκτίμησης Κινδύνου

Η εκτίμηση επικινδυνότητας στον τομέα του φυσικού αερίου αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που υπερβαίνει την απλή στατική καταγραφή πιθανών βλαβών. Απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση, η οποία ενσωματώνει τεχνικές, λειτουργικές, γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους σε ένα ενιαίο πλαίσιο διαχείρισης (Hale et al., 1997). Οι σύγχρονες μέθοδοι, εκμεταλλευόμενες την τεχνολογική πρόοδο στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), την τηλεμετρία και τη Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), προσφέρουν πλέον υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας, επιτρέποντας την πρόβλεψη αστοχιών πριν αυτές εκδηλωθούν (Gao et al., 2020; hang et al, 2019). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτών των μοντέλων παραμένει άρρηκτα συνδεδεμένη με την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων, την κατανόηση των σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υποδομών και την υιοθέτηση προληπτικών μέτρων βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (Li et al., 2024).

Για τη συστηματική προσέγγιση του ζητήματος, η εκτίμηση ακολουθεί μια αυστηρά δομημένη αλληλουχία σταδίων, η οποία διασφαλίζει ότι κανένας κίνδυνος δεν θα παραλειφθεί (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2020):

Καταγραφή Κινδύνων (Hazard Identification): Αποτελεί το θεμέλιο της μελέτης και περιλαμβάνει τον εντοπισμό όλων των πιθανών σεναρίων που μπορεί να οδηγήσουν σε ατύχημα ή δομική βλάβη. Στο στάδιο αυτό εξετάζονται φαινόμενα όπως η διαρροή αερίου, η εσωτερική και εξωτερική διάβρωση των αγωγών, η αστοχία υλικού, καθώς και εξωγενείς παράγοντες όπως η εδαφική υποχώρηση ή η ακούσια παρέμβαση τρίτων (π.χ. κατά τη διάρκεια εκσκαφών) (EGIG, 2023; Rusin et al., 2021).

Ανάλυση Πιθανοτήτων και Συνεπειών (Risk Analysis): Στο στάδιο αυτό επιχειρείται ο ποσοτικός ή ποιοτικός προσδιορισμός δύο μεγεθών: της συχνότητας εμφάνισης ενός ανεπιθύμητου συμβάντος και της βαρύτητας των επιπτώσεών του. Οι συνέπειες αξιολογούνται σε πολλαπλά επίπεδα, περιλαμβάνοντας την απώλεια ανθρώπινης ζωής, τους σοβαρούς τραυματισμούς εργαζομένων ή πολιτών, τις περιβαλλοντικές καταστροφές από πυρκαγιές και τις τεράστιες οικονομικές απώλειες λόγω διακοπής της τροφοδοσίας (Amir – Heidari et al., 2014; Mandryk et al., 2021).

Αξιολόγηση Κινδύνων (Risk Evaluation): Τα ευρήματα της ανάλυσης συγκρίνονται με τα προκαθορισμένα επίπεδα "αποδεκτού κινδύνου" (Acceptable Risk Levels). Εδώ λαμβάνεται η απόφαση για το αν ένας κίνδυνος είναι ανεκτός, αν απαιτείται λήψη πρόσθετων μέτρων ή αν η λειτουργία του συστήματος πρέπει να ανασταλεί έως ότου εξαιρεθεί η απειλή (Hosseinnia Davatgar et al., 2021).

Διαχείριση Πιθανών Κινδύνων (Risk Management): Περιλαμβάνει την ανάπτυξη και υλοποίηση στρατηγικών για τον έλεγχο και τη μείωση της επικινδυνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του βέλτιστου σχεδιασμού, της χρήσης προηγμένων υλικών, της εγκατάστασης αυτόματων συστημάτων διακοπής ροής και της συνεχούς εκπαίδευσης του προσωπικού (Application Programming Interface (API) 2015 ; Fernadez – Muniz et al., 2017).

Επικοινωνία και Αναθεώρηση (Communication & Review): Η διαχείριση κινδύνου είναι μια κυκλική διαδικασία. Απαιτεί τη διαρκή ενημέρωση όλων των εμπλεκόμενων μερών (stakeholders), την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων που εφαρμόστηκαν και την αναθεώρηση των μοντέλων εκτίμησης βάσει νέων

δεδομένων ή αλλαγών στο περιβάλλον λειτουργίας του δικτύου (ISO,2018; PMC,2023).

Στον τομέα των αγωγών φυσικού αερίου, η πολυπλοκότητα των δικτύων επιβάλλει τη χρήση εξειδικευμένων τεχνικών μεθόδων, οι οποίες χωρίζονται σε κατηγορίες για την πληρέστερη αξιολόγησή τους. Οι Ποιοτικές Μέθοδοι (Qualitative Risk Assessment) αποτελούν το πρώτο και πιο κρίσιμο στάδιο της ανάλυσης, καθώς επιτρέπουν την ταχεία ταξινόμηση των κινδύνων με βάση περιγραφικά κριτήρια (Vinnem, 2014). Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω της ευελιξίας τους και της δυνατότητας εφαρμογής τους ακόμη και όταν τα διαθέσιμα στατιστικά δεδομένα είναι ελλιπή (Κελεπερτζής, 2019).

Η πλέον αναγνωρίσιμη ποιοτική μέθοδος είναι η Μήτρα Κινδύνου (Risk Matrix). Μέσω αυτού του εργαλείου, κάθε κίνδυνος τοποθετείται σε ένα πλέγμα (συνήθως 5x5), όπου ο ένας άξονας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα και ο άλλος τη σοβαρότητα. Η οπτικοποίηση αυτή βοηθά τους διαχειριστές να ιεραρχήσουν τις παρεμβάσεις τους, εστιάζοντας στους κινδύνους που κατατάσσονται στην "κόκκινη ζώνη" (υψηλή πιθανότητα και καταστροφικές συνέπειες) (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2020).

Συμπληρωματικά, η μέθοδος "Τι θα συμβεί αν;" (What-If Analysis) χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση μη τυποποιημένων σεναρίων. Μέσα από δομημένες συνεδρίες καταιγισμού ιδεών, οι ειδικοί εξετάζουν τις επιπτώσεις υποθετικών αστοχιών (π.χ. "Τι θα συμβεί αν αποτύχει το σύστημα τηλεμετρίας σε μια απομακρυσμένη βαλβίδα;"). Αυτή η προσέγγιση είναι ζωτικής σημασίας για την ανακάλυψη κινδύνων που συχνά διαφεύγουν από τα τυπικά πρωτόκολλα ελέγχου (Κελεπερτζής, 2019).

Για μια πιο λεπτομερή εξέταση των λειτουργικών παραμέτρων, εφαρμόζεται η μελέτη HAZOP (Hazard and Operability Study). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί "λέξεις-οδηγούς" (όπως Περισσότερο, Λιγότερο, Καθόλου) για να εντοπίσει αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία (π.χ. "Περισσότερη πίεση" ή "Λιγότερη ροή"). Η HAZOP είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στον εντοπισμό σφαλμάτων σχεδιασμού ή λειτουργικών κενών σε σταθμούς συμπίεσης και αποσυμπίεσης (Vinnem, 2014).

Τέλος, η Ανάλυση Τρόπων και Επιπτώσεων Αστοχίας (FMEA) εστιάζει στη μηχανική αξιοπιστία. Αναλύει κάθε εξάρτημα του συστήματος ξεχωριστά, εξετάζοντας

τους πιθανούς τρόπους αστοχίας του και το πώς αυτοί επηρεάζουν τη συνολική ασφάλεια του δικτύου. Η FMEA επιτρέπει τον προγραμματισμό της συντήρησης με βάση την κρισιμότητα κάθε εξαρτήματος, μειώνοντας δραστικά την πιθανότητα απρόβλεπτων ατυχημάτων (Davatgar et al., 2019).

Κεφάλαιο 4: Νομοθετικό Πλαίσιο και Κανονισμοί Υγείας

4.1 Διεθνής Κανονισμοί και Πρότυπα

Ο τομέας μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου αποτελεί μία από τα πιο απαιτητικές και επικίνδυνες βιομηχανίες, καθώς περιλαμβάνει χειρισμό εύφλεκτων και εκρηκτικών ουσιών, υψηλή πίεση σε αγωγούς και λειτουργία πολύπλοκων μηχανημάτων. Για το λόγο αυτό, η διεθνής κοινότητα έχει θεσπίσει ένα εκτεταμένο σύνολο κανονισμών και πρότυπων που αποσκοπούν στην προστασία της υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων, καθώς και στη διασφάλιση της σταθερής λειτουργίας των υποδομών (IEA,2020).

4.1.1. Ιστορικό Πλαίσιο και Εξέλιξη των Διεθνών Κανονισμών

Οι πρώτες προσπάθειες για τη θέσπιση διεθνών κανονισμών στον ενεργειακό τομέα ξεκίνησαν στις αρχές του 20ου αιώνα, κυρίως για την πρόληψη ατυχημάτων σε βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Καθώς η χρήση του φυσικού αερίου επεκτάθηκε διεθνώς, αναπτύχθηκε η ανάγκη για ένα πιο ολοκληρωμένο ρυθμιστικό πλαίσιο, που να καλύπτει τόσο την τεχνική ασφάλεια όσο και την υγειονομική προστασία των εργαζομένων (Mearns et al., 2003).

Η ίδρυση του Διεθνούς Οργανισμού Εργασίας (International Labour Organization) το 1919 αποτέλεσε σταθμό στην ανάπτυξη διεθνών κανονισμών για την υγεία και την ασφάλεια. Ο ΔΟΕ ανέπτυξε συμβάσεις και οδηγίες που καθιέρωσαν τις βασικές υποχρεώσεις των εργοδοτών, όπως την εκτίμηση των κινδύνων, την εκπαίδευση του προσωπικού και την παροχή ασφαλούς εξοπλισμού (ILO, 2023).

Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η επέκταση των δικτύων φυσικού αερίου σε Ευρώπη και Αμερική οδήγησε στη δημιουργία διεθνών πρότυπων από οργανισμούς όπως η ISO (International Organization for Standardization) και η CEN (European Committee for Standardization). Στις δεκαετίες του 1970 και του 1980, σημαντικές διαρροές και ατυχήματα, όπως το ατύχημα στον αγωγό Banqiao στην Κίνα και διαρροές στην Αλάσκα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, ώθησαν στην υιοθέτηση αυστηρότερων κανόνων ασφάλειας και στην ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης κινδύνων (Vinnem,2014).

4.1.2. Διεθνείς Οργανισμοί και το Έργο τους

Διεθνής Οργανισμός Εργασίας (ILO): Ο Διεθνής Οργανισμός Εργασία εκδίδει οδηγίες και συμβάσεις για την προστασία των εργαζομένων σε επικίνδυνες βιομηχανίες. Στον τομέα φυσικού αερίου, οι κύριες κατευθύνσεις του ΔΟΕ περιλαμβάνουν την παροχή εκτίμησης των επαγγελματικών κινδύνων, την παροχή κατάλληλης εκπαίδευσης και πιστοποίησης των εργαζομένων και την θέσπιση προληπτικών μέτρων για ατυχήματα και έκτακτες καταστάσεις (Yuan et al., 2021).



Σχήμα 4: Ο Διεθνής Οργανισμός Εργασίας (ILO), (Πηγή: <https://unric.org/>)

International Organization for Standardization (ISO): Η σειρά ISO 45001 είναι το κύριο διεθνές πρότυπο για τη διαχείριση της ασφάλειας και της υγείας στην εργασία. Το πρότυπο απαιτεί από τις εταιρείες να εντοπίζουν κινδύνους, να αναπτύσσουν διαδικασίες πρόληψης και να παρακολουθούν συστηματικά τα ατυχήματα και τα περιστατικά τυχόν ατυχημάτων (ISO, 2018). Άλλα πρότυπα ISO. Όπως το ISO 14224, παρέχουν οδηγίες για την συλλογή και ανάλυση δεδομένων αξιοπιστίας και συντήρησης σε ενεργειακές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 5: Το διεθνές πρότυπο ISO 45001 για τη Διαχείριση της Υγείας και Ασφάλειας στην Εργασία (Πηγή: <https://urs-me.com>)

American Petroleum Institute (API): Το API εκδίδει τεχνικά πρότυπα που αφορούν την ασφαλή μεταφορά και διανομή φυσικού αερίου, όπως API RP 1173, για την διαχείριση ασφάλειας των αγωγών. Τα πρότυπα αυτά περιλαμβάνουν απαιτήσεις για επιθεωρήσεις, συντήρηση, εκπαίδευση προσωπικού και αντιμετώπιση διαρροών (API, 2015).



Σχήμα 6: Το American Petroleum Institute (API) και η συμβολή του στη θέσπιση τεχνικών προτύπων ασφαλείας για τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, (Πηγή: <https://www.api.org/>)

European Committee for Standardization (CEN): Η CEN αναπτύσσει πρότυπα που εναρμονίζουν την Ευρωπαϊκή Πρακτική ασφάλειας σε εγκαταστάσεις φυσικού αερίου. Τα πρότυπα CEN καλύπτουν την κατασκευή αγωγών, τη μέτρηση της πίεσης, τις διαδικασίες ελέγχου διαρροών και την προστασία από εκρήξεις (CEN, 2021).



Σχήμα 7: Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) και ο ρόλος της στη διαμόρφωση ενιαίων τεχνικών προτύπων για την ασφάλεια των υποδομών φυσικού αερίου στην Ευρώπη, (Πηγή: <https://www.cencenelec.eu/>)

NFPA (National Fire Protection Association): Η NFPA των ΗΠΑ παρέχει πρότυπα για την πρόληψη πυρκαγιών και εκρήξεων σε βιομηχανίες φυσικού αερίου. Τα πρότυπα NFPA 54 και NFPA 59 καλύπτουν τον ασφαλή σχεδιασμό εγκαταστάσεων, τη διαχείριση εύφλεκτων ουσιών και την εκπαίδευση προσωπικού σε έκτακτες καταστάσεις (NFPA, 2021).



Σχήμα 8: Πρότυπα της National Fire Protection Association (NFPA) για την πρόληψη πυρκαγιών και τη διαχείριση εκρήξεων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις φυσικού αερίου, (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/National_Fire_Protection_Association)

4.1.3. Βέλτιστες Πρακτικές και Εφαρμογή Προτύπων

Στον διεθνή χώρο οι βέλτιστες πρακτικές περιλαμβάνουν:

1. Σύστημα διαχείρισης κινδύνων: Αναγνώριση, αξιολόγηση και μετριασμός κινδύνων σε κάθε στάδιο της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου (Fernandez – Muniz et al., 2017).
2. Προληπτική συντήρηση εξοπλισμού: Προγραμματισμένη συντήρηση αγωγών, βαλβίδων και αντλιών για αποφυγή ατυχημάτων (Davatgar et al., 2019).
3. Εκπαίδευση και Πιστοποίηση προσωπικού: Σεμινάρια για αναγνώριση κινδύνων, χειρισμό εκτάκτων καταστάσεων και χρήση προσωπικού προστατευτικού εξοπλισμού (Jabbari et al., 2022).
4. Τεχνολογία Παρακολούθησης: Χρήση αισθητήρων πίεσης, ανιχνευτών για τυχόν διαρροές και αυτόματων συστημάτων διακοπής ροής για την άμεση αντιμετώπιση διαρροών (Gao et al., 2020).
5. Αναφορά Ατυχημάτων: Συλλογή δεδομένων για την ανάλυση αιτιών ατυχημάτων και την βελτίωση διαδικασιών ασφάλειας (EGIG., 2023).

4.1.4. Παραδείγματα Ατυχημάτων και Επιρροή στη Νομοθεσία

Η μελέτη διεθνών ατυχημάτων αποδεικνύει ότι οι κύριες αιτίες εντοπίζονται στην ελλιπή εκπαίδευση, την παραβίαση των πρότυπων ασφάλειας και την ανεπαρκή συντήρηση (Zohar, 1980). Τα παρακάτω γεγονότα αποτέλεσαν «σημεία καμπής» για την εξέλιξη των κανονισμών:

Κάποια παραδείγματα είναι:

1. San Bruno, Καλιφόρνια (ΗΠΑ), 2010:
Η έκρηξη σε αγωγό φυσικού αερίου προκάλεσε τον θάνατο 8 ανθρώπων και την καταστροφή δεκάδων σπιτιών. Η έρευνα αποκάλυψε σοβαρές ελλείψεις στα αρχεία συντήρησης και στην ποιότητα των συγκολλήσεων του αγωγού που χρονολογούνταν γύρω στο 1956 (NTSB, 2011).
 - Το γεγονός αυτό οδήγησε στην αναθεώρηση του API RP 1173 (Pipeline Safety Management Systems), δίνοντας έμφαση στη συνεχή παρακολούθηση της ακεραιότητας των αγωγών και στη δημιουργία

συστημάτων διαχείρισης ασφάλειας που βασίζονται στην ανάλυση κινδύνου (API,2015).

2. Ghislenghien, Βέλγιο,2004:

Θεωρείται η χειρότερη καταστροφή σε αγωγό φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Η διαρροή προκλήθηκε από προγενέστερη ζημία που είχε γίνει στον αγωγό κατά την διάρκεια χωματοургικών εργασιών από τρίτους, η οποία δεν είχε αναφερθεί. Η έκρηξη στοίχισε τη ζωή σε 24 ανθρώπους (EGIG, 2022).

- Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ενίσχυση προτύπων CEN και στην αυστηροποίηση των κανόνων για τη σήμανση των αγωγών, τη χρήση συστημάτων αυτόματης διακοπής και την υποχρεωτική επιτήρηση των εργασιών που εκτελούνται πλησίον του δικτύου (CEN, 2021).

3. Διαρροή στη Γερμανία, 2004:

Αν και μικρότερης κλίμακας, το περιστατικό αυτό ανέδειξε την ανάγκη για συστηματική επιθεώρηση του εξοπλισμού υπό πίεση.

- Το γεγονός αυτό συνέβαλε στην περαιτέρω εξειδίκευση των προτύπων για τη συντήρηση και την εκπαίδευση του προσωπικού, διασφαλίζοντας ότι οι τεχνικοί είναι σε θέση να αναγνωρίζουν έγκαιρα σημάδια κόπωσης των υλικών από διάβρωση (Koivupalo et al., 2015).

4.2 Εθνική Νομοθεσία για την Υγεία και την Ασφάλεια στον Τομέα Φυσικού Αερίου

Η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της διεθνούς κοινότητας, έχει θεσπίσει νομοθεσία που προσαρμόζει τα διεθνή πρότυπα στις εθνικές ανάγκες του τομέα φυσικού αερίου. Η νομοθεσία καλύπτει τόσο την προστασία των εργαζομένων όσο και τις τεχνικές απαιτήσεις ασφαλούς μεταφοράς και διανομής αερίου, με στόχο τη μείωση ατυχημάτων και τη διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2021).

4.2.1. Νομοθετικό Πλαίσιο

1.Γενική Νομοθεσία για την ασφάλεια και υγεία στην εργασία

- Ν.3850/2010: Ρυθμίζει θέματα υγείας και ασφάλειας σε όλους τους τομείς εργασίας, θεσπίζοντας υποχρεώσεις για τους εργοδότες .

- Π.Δ. 17/1996: Προσαρμόζει την Οδηγία 89/391/ΕΟΚ για την εφαρμογή μέτρων πρόληψης εργατικών ατυχημάτων και κινδύνων σε όλες τις βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των εγκαταστάσεων φυσικού αερίου.

2.Ειδική Νομοθεσία για τον τομέα του φυσικού αερίου

- Ν.4001/2011:Ρυθμίζει την αγορά φυσικού αερίου και περιλαμβάνει πρόνοιες για την ασφάλεια των υποδομών, τους κανόνες συντήρησης αγωγών και τις διαδικασίες ελέγχου διαρροών.
- Κ.Υ.Α. 22752/2014: Προβλέπει τεχνικές προδιαγραφές για εγκαταστάσεις διανομής φυσικού αερίου ,μέτρα προστασίας των εργαζομένων και περιορισμό πρόσβασης σε μη εκπαιδευμένο προσωπικό.

3.Κανονισμοί και οδηγίες Υπουργείου Ενέργειας και Υγείας

- Οι κανονισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τακτικές επιθεωρήσεις, υποχρεωτική εκπαίδευση προσωπικού και εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης ασφάλειας στις εταιρείες μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου.

4.2.2. Υποχρεώσεις εργοδοτών και Εργαζομένων

Η ελληνική νομοθεσία ορίζει με σαφήνεια τις υποχρεώσεις τόσο των εργοδοτών όσο και των εργαζόμενων στον τομέα φυσικού αερίου, προκειμένου να διασφαλιστεί η υγεία και η ασφάλεια στην εργασία. Οι εργοδότες έχουν την ευθύνη να εκτιμούν και να διαχειρίζονται συστηματικά τους κινδύνους σε κάθε στάδιο της εργασίας, εξασφαλίζοντας παράλληλα την παροχή κατάλληλου προσωπικού προστατευτικού εξοπλισμού (PPE) (Κελεπερτζής, 2019). Επιπλέον, οφείλουν να οργανώνουν συνεχή εκπαίδευση και πιστοποίηση του προσωπικού σε θέματα ασφάλειας, καθώς και να φροντίζουν για τη συστηματική συντήρηση του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων, ώστε να περιορίζονται οι πιθανότητες ατυχημάτων και βλαβών (Fernandez – Muniz et al.,2017).



Σχήμα 9: Βασικός εξοπλισμός Μέσων Ατομικής Προστασίας (ΜΑΠ) για την εργασία σε εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου (Πηγή: <https://exyppgalanos.gr>)

Αντίστοιχα οι εργαζόμενοι υποχρεούνται να τηρούν αυστηρά τους κανόνες ασφάλειας και τις οδηγίες των εργοδοτών, να χρησιμοποιούν τον προβλεπόμενο προστατευτικό εξοπλισμό και να εφαρμόζουν τις διαδικασίες σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (Zohar, 1980). Ιδιαίτερη σημασία έχει η άμεση αναφορά οποιονδήποτε κινδύνου ή ανωμαλίας στους αρμόδιους, προκειμένου να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα πρόληψης. Η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ εργοδοτών και εργαζομένων αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για την πρόληψη ατυχημάτων και την ενίσχυση της ασφάλειας στον χώρο εργασίας (Zhang & Wu, 2021). Παράλληλα, νομοθεσία προβλέπει αυστηρές ποινικές και διοικητικές κυρώσεις για τις περιπτώσεις παραβίασης των διατάξεων αυτών, ενισχύοντας τη συμμόρφωση και τη λογοδοσία όλων των εμπλεκόμενων μερών .

4.2.3 Συστήματα Ελέγχου και Επιθεώρησης

Το ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο επιβάλλει ένα πολυεπίπεδο σύστημα ελέγχων και επιθεωρήσεων, το οποίο αποτελεί τον κεντρικό μηχανισμό για τη διασφάλιση της λειτουργικής ακεραιότητας των υποδομών φυσικού αερίου. Η στρατηγική αυτή δεν περιορίζεται στην απλή συμμόρφωση με τους κανόνες, αλλά αποσκοπεί στη δημιουργία ενός περιβάλλοντος εργασίας όπου ο κίνδυνος μειώνεται στο ελάχιστον δυνατό επίπεδο (Davatgar et al., 2019).

Στην πρώτη γραμμή ελέγχου βρίσκονται οι Διαχειριστές των Συστημάτων Μεταφοράς και Διανομής, οι οποίοι εφαρμόζουν πρωτόκολλα προληπτικής και προβλεπτικής συντήρησης. Οι επιθεωρήσεις αυτές είναι εξαιρετικά εξειδικευμένες και περιλαμβάνουν τη χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών, καθώς και τη μέθοδο του

intelligent pigging (Zhang et al., 2019). Η τελευταία επιτρέπει τη χαρτογράφηση του εσωτερικού των αγωγών υπό πίεση, εντοπίζοντας με ακρίβεια χιλιοστού φαινόμενα διάβρωσης, μικρορωγμές και παραμορφώσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καταστροφικές αστοχίες (Rusin et al., 2021). Παράλληλα, τα κέντρα ελέγχου χρησιμοποιούν εξελιγμένα συστήματα SCADA και λογισμικά ανίχνευσης διαρροών, τα οποία παρακολουθούν σε 24ωρη βάση τις μεταβολές πίεσης και παροχής επιτρέποντας την άμεση απομόνωση τμημάτων του δικτύου σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (Nguyen et al, 2025; Wang et al.,2025).

Πέρα από το τεχνικό σκέλος, η κρατική εποπτεία ενισχύει το πλαίσιο ασφάλειας μέσω της Ρυθμιστικής Αρχής Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΕΥΥ), η οποία ελέγχει τη συμμόρφωση των διαχειριστών με τους Κώδικες Διαχείρισης (ΔΕΣΦΑ, 2024). Ταυτόχρονα, η Ανεξάρτητη Αρχή Επιθεώρησης Εργασίας επιβλέπει την εφαρμογή του Ν.3850/2010. Οι επιθεωρητές εργασίας εστιάζουν στην ορθή σύνταξη της Γραπτής Εκτίμησης Επαγγελματικού Κινδύνου (ΓΕΕΚ) και στην τήρηση των Προεδρικών Διαταγμάτων, όπως το Π.Δ. 17/1996, διασφαλίζοντας ότι οι εργαζόμενοι διαθέτουν την απαραίτητη πιστοποιημένη εκπαίδευση και τα κατάλληλα Μέσα Ατομικής Προστασίας (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2020).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται πλέον στην διαχείριση της πληροφορίας που προκύπτει από την καταγραφή των ατυχημάτων και κυρίως των «παρ'ολίγον» ατυχημάτων. Η μεθοδολογία ανάλυσης των αιτιών επιτρέπει στις εταιρείες να εντοπίζουν οργανωτικές αδυναμίες πριν αυτές μετεξελιχθούν σε σοβαρά συμβάντα (Reason,2000). Αυτή η δυναμική προσέγγιση ευθυγραμμίζεται πλήρως με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 45001 για τα συστήματα Διαχείρισης Υγείας και Ασφάλειας, καθώς και με τις κατευθυντήριες οδηγίες API RP 1173 (ISO,2018; API,2015). Η υιοθέτηση αυτών των προτύπων εγγυάται ότι η ελληνική βιομηχανία φυσικού αερίου λειτουργεί βάσει των βέλτιστων διεθνών πρακτικών , προάγοντας μία κουλτούρα ασφάλειας που βασίζεται στην πρόληψη, τη συνεχή επιτήρηση και την τεχνολογική καινοτομία.

4.2.4. Εκπαίδευση και Πιστοποίηση Προσωπικού

Η εκπαίδευση και η διαρκής πιστοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού αποτελούν τον κρίσιμότερο παράγοντα για τη λειτουργία ενός αφαλούς συστήματος μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Η ισχύουσα νομοθεσία, με επίκεντρο τον Ν.3850/2010 και το Π.Δ 17/1996, καθορίζει ρητά την υποχρέωση των εργοδοτών να παρέχουν κατάλληλη και επαρκή εκπαίδευση στους εργαζομένους, προσαρμοσμένη στις ειδικές απαιτήσεις κάθε θέσης εργασίας (Ελληνική Δημοκρατία, 2010).

Στο πλαίσιο αυτό το προσωπικό που απασχολείται σε υποδομές υψηλής επικινδυνότητας οφείλει να παρακολουθεί εξειδικευμένα προγράμματα που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα κρίσιμων θεματικών ενοτήτων. Αυτές περιλαμβάνουν τη διαχείριση εύφλεκτων και εκρηκτικών ατμοσφαιρών (ATEX), τα πρωτόκολλα αντιμετώπισης διαρροών σε δίκτυα υπό πίεση, τη χρήση συσκευών ανίχνευσης αερίων, καθώς και προσαρμοσμένα σεμινάρια πυρασφάλειας και παροχής πρώτων βοηθειών (Zou et al., 2024). . Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ρόλο του Τεχνικού Ασφαλείας και του Γιατρού Εργασίας, οι οποίοι επιβλέπουν τη διαδικασία της συνεχιζόμενης επαγγελματικής κατάρτισης και διασφαλίζουν ότι οι εργαζόμενοι αντιλαμβάνονται πλήρως τους κινδύνους που αναγράφονται στη Γραπτή Εκτίμηση Επαγγελματικού Κινδύνου (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2021).

Στην Ελληνική πραγματικότητα, φορείς όπως η ΔΕΣΦΑ, η ΔΕΠΑ και οι Εταιρείες Διανομής, εφαρμόζουν εκτεταμένα εκπαιδευτικά προγράμματα που υπερβαίνουν τις τυπικές θεωρητικές διαλέξεις. Η εκπαίδευση περιλαμβάνει πλέον βιωματικές ασκήσεις και προσομοιώσεις ατυχημάτων μεγάλης κλίμακας (ΔΕΣΦΑ, 2023), όπου το προσωπικό καλείται να διαχειριστεί σενάρια κρίσεων σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η σύνδεση της θεωρίας με την πρακτική άσκηση είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της επιχειρησιακής ετοιμότητας.

Επιπλέον, η πιστοποίηση των δεξιοτήτων από αναγνωρισμένους φορείς διασφαλίζει ότι οι τεχνικοί που εκτελούν εργασίες συντήρησης ή επιθεώρησης διαθέτουν την απαιτούμενη επάρκεια σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Η υιοθέτηση τέτοιων αυστηρών διαδικασιών πιστοποίησης, σε συνδυασμό με την τακτική επανεκπαίδευση, εγγυάται τη διατήρηση υψηλών προδιαγραφών ασφάλειας, τη μείωση του ανθρώπινου λάθους και την πλήρη εναρμόνιση με τις απαιτήσεις του ISO 45001 και των διεθνών κανονισμών του κλάδου της ενέργειας (Yuan et al., 2021).

4.2.5. Σύγκριση με Διεθνή Πρότυπα

Η ελληνική έννομη τάξη στον τομέα της ασφάλειας των εργαζομένων παρουσιάζει υψηλό βαθμό κανονιστικής σύγκλισης με τα διεθνή πρότυπα, αποτελώντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που εδράζεται στην ευρωπαϊκή στρατηγική για την υγεία και την ασφάλεια. Θεμελιώδης λίθος αυτής της εναρμόνισης είναι η Οδηγία 89/391/ΕΟΚ, η οποία εισήγαγε την έννοια της αντικειμενικής ευθύνης του εργοδότη και την υποχρέωση για διαρκή εκτίμηση και διαχείριση των κινδύνων (Vinnem,2014). Πάνω σε αυτή τη βάση έχουν στηριχθεί όλα τα εθνικά Προεδρικά Διατάγματα, διασφαλίζοντας ότι οι ελληνικές επιχειρήσεις φυσικού αερίου λειτουργούν υπό ένα καθεστώς απόλυτης συμβατότητας με τις ενωσιακές απαιτήσεις.

Πέρα από το νομοθετικό σκέλος, η υιοθέτηση του διεθνούς προτύπου ISO 45001 από τους μεγάλους διαχειριστές του κλάδου, έχει μετατοπίσει το ενδιαφέρον από την παθητική τήρηση των νόμων στην ενεργητική διαχείριση της ασφάλειας (ISO,2018). Το πρότυπο αυτό, σε συνδυασμό με τις τεχνικές προδιαγραφές των οργανισμών API και CEN, παρέχει μια ολιστική μεθοδολογία για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση των υποδομών. Η ενσωμάτωση αυτών των προτύπων εγγυάται ότι οι τεχνικές παρεμβάσεις τους αγωγούς και στους σταθμούς συμπίεσης ακολουθούν τις παγκόσμιες βέλτιστες πρακτικές, μειώνοντας τις πιθανότητες αστοχίας ενός υλικού ή κάποιου ανθρώπινου σφάλματος.

Ωστόσο, η σύγκριση με διεθνή μοντέλα ασφάλειας αναδεικνύει ότι η θεωρητική εναρμόνιση δεν συνεπάγεται πάντα την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα. Ενώ το θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα είναι πλήρες, η πρόκληση έγκειται στην «κουλτούρα ασφάλειας» και στη συνέπεια των επιτόπιων ελέγχων (Zhang & Wu,2021). Σε αντίθεση με χώρες που διαθέτουν μακρά παράδοση στη βαριά βιομηχανία ενέργειας, η ελληνική πρακτική βασίζεται συχνά στην αυστηρή εποπτεία των αρχών για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση. Συνεπώς, η περαιτέρω σύγκλιση με τα διεθνή πρότυπα απαιτεί τη μετάβαση από ένα μοντέλο ελέγχου σε ένα μοντέλο αυτορρύθμισης και διαφανούς αναφοράς, όπου η ασφάλεια αντιμετωπίζεται ως επένδυση και όχι ως κανονιστικό βάρος (Hale & Boys,2013).

4.3 Πολιτικές και Πρακτικές Ασφάλειας σε Διάφορες Χώρες

Η αποτελεσματική διαχείριση της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων στον τομέα της μεταφοράς και της διανομής φυσικού αερίου αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τη βιωσιμότητα των ενεργειακών υποδομών και την προάσπιση της εργασιακής ασφάλειας (Koivupalo et al, 2015). Οι πολιτικές και οι πρακτικές ασφάλειας που έχουν υιοθετηθεί σε επιλεγμένες χώρες με ώριμες αγορές φυσικού αερίου, που έχουν ως στόχο την ανάδειξη των μέτρων εκείνων που έχουν συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των κινδύνων για τους εργαζόμενους, αλλά και την επισήμανση περιοχών όπου εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικές προκλήσεις, αναλύονται και παραθέτονται παρακάτω. Η συγκριτική προσέγγιση επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών προσεγγίσεων, παρέχοντας χρήσιμες ενδείξεις για την προσαρμογή βέλτιστων πρακτικών στο ευρωπαϊκό και ελληνικό πλαίσιο (Zou et al., 2024). Η μελέτη αυτή δίνει έμφαση στη σημασία της πρόληψης, της συνεχούς εκπαίδευσης, της συστηματικής επιθεώρησης και της υιοθέτησης καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων, ως βασικών παραμέτρων για την επίτευξη υψηλών πρότυπων ασφάλειας και υγείας στον κλάδο (Fernandez – Muniz et al., 2017).

4.3.1. Διεθνείς Πρακτικές και Εφαρμογές

Σε χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η ασφάλεια των εργαζομένων ενσωματώνει τόσο τεχνικές όσο και οργανωσιακές προσεγγίσεις. Μέσω φορέων όπως η American Gas Association (AGA), οι εταιρείες έθεσαν ως προτεραιότητα την εδραίωση μιας κουλτούρας ασφάλειας όπου η δέσμευση της διοίκησης, η αναφορά κινδύνων, ο έλεγχος διαδικασιών και η συνεχιζόμενη μάθηση αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία (Zohar, 1980). Ταυτόχρονα, η εφαρμογή πρότυπων όπως ISO 45001 για τη διαχείριση της υγείας και της ασφάλειας στην εργασία, ενισχύει την ομοιομορφία των πρακτικών και την πρόληψη (ISO, 2018). Επιπλέον, η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών συμβάλλει στην έγκαιρη ανίχνευση και διαχείριση των κινδύνων (Zhang et al., 2025). Ωστόσο, παρά την πρόοδο, παραμένουν προκλήσεις όπως τα παλαιά δίκτυα αγωγών και η χρήση μη εξιδεικευμένου προσωπικού (NTSB, 2011).

Η Αγγλοσαξονική αγορά όπως ο Καναδάς και η Αυστραλία, δίνει έμφαση σε στρατηγικές βασισμένες στην αξιολόγηση κινδύνου και στην ενσωμάτωση ανθρωπογενών και οργανωσιακών παραγόντων στην πρόληψη ατυχημάτων (Hale & Borgys, 2013). Η εκπαίδευση των εργαζομένων, η πιστοποίηση και η δημιουργία κουλτούρας ασφάλειας σε επίπεδο πεδίου αποτελούν βασικούς άξονες (Mearns et

al.,2003). Παράλληλα, η τεχνολογία και η καινοτομία όπως η χρήση drones για επιθεωρήσεις, αισθητήρες VOC για ανίχνευση διαρροών, μέθοδος μοναχικής εργασίας (lone worker system) ενισχύουν τις πρακτικές (Gao et al.,2020; Nguyen et al.,2025).

Στην Ευρώπη, παρά το ισχυρό και θεσμικό πλαίσιο, η εφαρμογή των πρακτικών ασφαλείας διαφοροποιείται ανά χώρα (Vinnem,2014). Οι εταιρίες αντιμετωπίζουν το στοίχημα της ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών, της ανανέωσης υποδομών και της ενίσχυσης της εκπαίδευσης των εργαζομένων (Mandryk et al.,2021). Στην Ελλάδα, οι εταιρείες διανομής, όπως η ΕΔΑ Αττική και η ΔΕΣΦΑ, έχουν εφαρμόσει συστήματα ελέγχου, διαδικασίες επιθεώρησης, εκπαίδευση προσωπικού και ενημέρωση των καταναλωτών. Παρόλα αυτά τα μέτρα, η ανάγκη για ενίσχυση της κουλτούρας ασφαλείας, της συμμετοχής των εργαζομένων σε επιμορφωτικά – εκπαιδευτικά προγράμματα και η τεχνολογική αναβάθμιση παραμένει επιτακτική (ELINYAE,2021).

Πίνακας 1:Κατανομή αιτιών συμβάντων σε αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου στην Ευρώπη για την περίοδο 1970-2022 (Πηγή:EGIG (European Gas pipeline Incident data Group), 2023. (period 1970–2022).

Αιτία Συμβάντος	Ποσοστό (%)	Παρατηρήσεις
Παρέμβαση Τρίτων	42-45%	Ζημιές από εκσκαφές, γεωργικά μηχανήματα ή κατασκευαστικά έργα
Διάβρωση	15-18%	Εσωτερική και εξωτερική οξείδωση των μετάλλων λόγω παλαιότητας ή κακής μόνωσης
Κατασκευαστικό Ελάττωμα/ Αστοχία Υλικού	15-17%	Προβλήματα στις συγκολλήσεις
Φυσικά Αίτια	12-14%	Κατολισθήσεις, καθιζήσεις εδάφους ή σεισμική δραστηριότητα
Ανθρώπινο Λάθος	7-10%	Λανθασμένοι χειρισμοί κατά την λειτουργία ή την συντήρηση

Όπως προκύπτει και από τον **Πίνακα 1**, η κυρίαρχη αιτία ατυχημάτων στην Ευρώπη παραμένει η παρέμβαση τρίτων (42-45%), γεγονός που υπογραμμίζει την κρισιμότητα των αυστηρών προτύπων σήμανσης και επιτήρησης των οδεύσεων των αγωγών (EGIG,2023). Παράλληλα, το σημαντικό ποσοστό της διάβρωσης και των κατασκευαστικών αστοχιών αναδεικνύει την ανάγκη για την υιοθέτηση προηγμένων συστημάτων επιθεώρησης και τη συμμόρφωση με πρότυπα API και CEN για τη διασφάλιση της τεχνικής ακεραιότητας των υποδομών (Rusin et al.,2021; API,2015).

4.3.2 Συγκριτική Ανάλυση

Η συγκριτική αξιολόγηση των διεθνών πρακτικών ασφάλειας αναδεικνύει ορισμένους κοινούς πυλώνες επιτυχίας. Η ενεργός συμμετοχή των εργαζομένων στη λήψη αποφάσεων, η διαρκής και βιωματική εκπαίδευση, καθώς και η συστηματική αξιοποίηση ψηφιακών δεδομένων για την πρόβλεψη αστοχιών, αποτελούν τα θεμέλια μιας ώριμης κουλτούρας ασφάλειας (Zohar,1980; Zhang & Wu,2021). Παρά ταύτα, εντοπίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας των υποδομών, τη διαθεσιμότητα οικονομικών πόρων και τις γεωγραφικές προκλήσεις, όπως η διαχείριση αγωγών σε απομακρυσμένες περιοχές (Wang & Xing,2023).

Για την ελληνική πραγματικότητα, τα διδακτικά στοιχεία εστιάζουν στην ανάγκη μετάβασης από μία απλή συμμόρφωση με τους κανονισμούς σε μια δυναμική διαχείριση επικινδυνότητας (Κελεπερτζής,2019). Η ενίσχυση της τεχνολογικής επιτήρησης, αυστηρή καταγραφή των ατυχημάτων και η ενδυνάμωση της συνεργασίας μεταξύ των Διαχειριστών και των ρυθμιστικών αρχών, μπορούν να οδηγήσουν σε ριζική βελτίωση των συνθηκών εργασίας (Hale & Borys,2013). Καθώς ο τομέας του φυσικού αερίου μετασχηματίζεται ενόψει της αποανθρακοποίησης και της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων αερίων, οι πολιτικές ασφάλειας οφείλουν να προσαρμόζονται δυναμικά στις νέες τεχνικές απαιτήσεις (Zou et al., 2024; Lu et al,2025).

4.4 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για την Προστασία των Εργαζομένων

Η προστασία και ασφάλεια των εργαζομένων αποτελεί βασικό πυλώνα της Ευρωπαϊκής Κοινωνικής Πολιτικής και αντικατοπτρίζει τη δέσμευση της Ευρωπαϊκής

Ένωσης για τη δημιουργία ασφαλούς εργασιακού περιβάλλοντος σε όλους τους τομείς της οικονομίας, συμπεριλαμβανομένου του τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Οι δραστηριότητες σε αυτόν τον τομέα συνδέονται με υψηλούς κινδύνους. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία παρέχει το πλαίσιο που καθορίζει τα ελάχιστα επίπεδα ασφάλειας για την προστασία των εργαζομένων. Η εφαρμογή των οδηγιών της ΕΕ ενισχύει τη συνεπή πρακτική ασφάλειας σε όλα τα κράτη-μέλη και διασφαλίζει ότι οι βασικές αρχές πρόληψης και προστασίας είναι κατανοητές και εφαρμόσιμες (.

4.4.1 Γενικό Νομοθετικό Πλαίσιο της ΕΕ

Η Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την υγεία και την ασφάλεια στην εργασία στηρίζεται συγκροτεί 'να συνεκτικό σύστημα κανόνων, το οποίο συνδυάζει οριζόντιες οδηγίες και πλαίσια με εξειδικευμένους κανονισμούς ανά κλάδο δραστηριότητας (European Commission, 2023; Mearns et al.,2003;Zwetsloot & Hale,2011; Hale & Borys,2013). Κεντρικός πυλώνας αυτού του οικοδομήματος είναι η Οδηγία 89/391/ΕΟΚ, η οποία εισήγαγε μια ριζική αλλαγή παραδείγματος, μετατοπίζοντας την ευθύνη από την απλή κατασταλτική ασφάλεια στην ενεργητική πρόληψη (Hale et al., 1997; Zohar,1980; Zhang & Wu,2021; Fernandez – Muniz et al.,2017). Η Οδηγία αυτή επιβάλλει στους εργοδότες την υιοθέτηση συστημάτων διαχείρισης κινδύνου, την ιεράρχηση των μέτρων προστασίας και την υποχρεωτική διαβούλευση με τους εργαζομένους (Hosseinnia Davatgar et al.,2021; Jabbari et al.,2022; Ye et al.,2022; Koivupalo et al.,2015).

Συμπληρωματικά η Οδηγία 92/91/ΕΟΚ καθορίζει τις ελάχιστες προδιαγραφές για τη βελτίωση της προστασίας της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων στις εξορυκτικές βιομηχανίες μέσω γεωτρήσεων, καλύπτοντας κρίσιμες πτυχές των εγκαταστάσεων φυσικού αερίου (Vinnem,2014; Yuan et al.,2021; Rusin et al.,2021 EGIG,2023). Παράλληλα, η Οδηγία 2012/18/ΕΕ (SEVESO III) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον τομέα των καυσίμων, καθώς επιβάλλει αυστηρά μέτρα ελέγχου για την πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων που σχετίζονται με επικίνδυνες ουσίες, διασφαλίζοντας την προστασία τόσο των εργαζομένων όσο και του κοινωνικού συνόλου (Amir – Heidari et al., 2014; Nguyen et al.,2025; Wang et al.,2025; Lu et al.,2025).

Το κανονιστικό αυτό πλαίσιο ολοκληρώνεται με εξειδικευμένες οδηγίες που στοχεύουν στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων φυσικών και χημικών παραγόντων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Οδηγία 2003/10/EK για την προστασία από την έκθεση σε θόρυβο, η Οδηγία 2013/35/EE για τους κινδύνους από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, καθώς και η Οδηγία 1999/98/EK (ATEX 137), η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τον κλάδο του φυσικού αερίου, καθώς αφορά την προστασία των εργαζομένων που εκτίθενται σε κίνδυνο από εκρηκτικές ατμόσφαιρες (Williams et al.,2023). Η συνδυαστική εφαρμογή αυτών των οδηγιών καθιστά υποχρεωτική τη συνεχή αξιολόγηση των επαγγελματικών κινδύνων και τη διαρκή εκπαίδευση του προσωπικού, εξασφαλίζοντας ένα ομοιόμορφο και υψηλό επίπεδο ασφάλειας σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ (Κελεπερτζής,2019).

4.4.2 Υποχρεώσεις Εργοδοτών και Δικαιώματα Εργαζομένων

Η διασφάλιση της υγείας και της ασφάλειας στον τομέα του φυσικού αερίου εδράζεται σε μία αμφίδρομη σχέση ευθύνης, η οποία ρυθμίζεται αυστηρά από το διεθνές και εθνικό θεσμικό πλαίσιο (N3850/2010; Π.Δ.17/1996). Οι εργοδότες φέρουν την αντικειμενική ευθύνη για τη διατήρηση ενός ασφαλούς εργασιακού περιβάλλοντος, υποχρέωση που υλοποιείται μέσω της εφαρμογής ολιστικών Συστημάτων Διαχείρισης Υγείας και Ασφάλειας (ISO 45001,2018; API RP 1173,2015). Κεντρικό εργαλείο αυτής της διαδικασίας είναι η Γραπτή Εκτίμηση Επαγγελματικού Κινδύνου (ΓΕΕΚ), η οποία πρέπει να είναι δυναμική και να αναθεωρείται τακτικά βάσει των τεχνολογικών εξελίξεων και των αναγνωρισμένων επικινδυνοτήτων (ΕΛΙΝΥΑΕ,2020; Amir- Heidari et al.,2014).

Ειδικότερα οι υποχρεώσεις των εργοδοτών περιλαμβάνουν:

- Την παροχή πιστοποιημένου Εξοπλισμού Ατομικής Προστασίας (PPE), ο οποίος στον κλάδο του φυσικού αερίου πρέπει να διαθέτει ειδικές προδιαγραφές (Κελεπερτζής,2019).
- Την διασφάλιση συνεχούς επίβλεψης μέσω εξειδικευμένων συμβούλων, όπως Τεχνικός Ασφαλείας και Γιατρός Εργασίας (Halse & Limborg,2006).
- Την οργάνωση συστηματικών προγραμμάτων κατάρτισης που εστιάζουν στη διαχείριση εκτάκτων αναγκών και στην πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων (Jabbari et al.,2022; Fernadez- Muniz et al.,2017).

Από την άλλη πλευρά οι εργαζόμενοι αναγνωρίζονται πλέον ως ενεργοί συντελεστές της ασφάλειας (Zohar,1980; Zhang &Wu,2021). Διαθέτουν δικαίωμα αλλά και επαγγελματική ευθύνη να συμμετέχουν στη διαδικασία αναγνώρισης κινδύνων και στη λήψη αποφάσεων μέσω των Επιτροπών Υγείας και Ασφάλειας (Hale et al.,1997; Gunningham,2020). Η ενθάρρυνση των εργαζομένων να αναφέρουν ατυχήματα χωρίς τον φόβο κυρώσεων είναι καθοριστική για τη μείωση του δείκτη συχνότητας ατυχημάτων (Reason,1997;Karanikas &Weber,2020). Η συνεργασία αυτή δημιουργεί μια κουλτούρα ασφάλειας όπου η πρόληψη ενσωματώνεται στην καθημερινή επιχειρησιακή πρακτική και δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως τυπική νομική συμμόρφωση (Cooper,2000;Mearns et al.,2003).

4.4.3 Εφαρμογή Οδηγιών σε Ευρωπαϊκές χώρες

Η ενσωμάτωση των ευρωπαϊκών οδηγιών στο εθνικό δίκαιο των κρατών – μελών ακολουθεί την αρχή της επικουρικότητας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορετικών επιπέδων επιχειρησιακής ωριμότητας (Walters,2011; Papaioannou et al.,2022). Στη Γερμανία, το σύστημα βασίζεται στην αυστηρή τυποποίηση και η εφαρμογή του ISO 45001 αποτελεί συχνά προαπαιτούμενο για τη λειτουργία μεγάλων διαχειριστών δικτύων φυσικού αερίου (ISO,2018; Smithers,2022). Η γερμανική προσέγγιση δίνει έμφαση στην τεχνική αρτιότητα και τον συστηματικό έλεγχο, με περιοδικές επιθεωρήσεις που διεξάγονται ανά εξάμηνο, διασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων αστοχίας (Hale&Borys,2013; Koivupalo et al.,2015).

Στη Γαλλία το μοντέλο εστιάζει περισσότερο στην προκαθορισμένη ασφάλεια και στην υποχρεωτική συνεχιζόμενη εκπαίδευση (Jabbari et al.,2022; Oude-Hengel et al.,2019). Η κατάρτιση δεν αποτελεί απλώς μίας τυπική διαδικασία, αλλά είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη των έργων, απαιτώντας από κάθε εργαζόμενο την επιτυχή ολοκλήρωση εξειδικευμένων σεμιναρίων πριν την είσοδο σε εργοτάξια υψηλής πίεσης (ΕΛΙΝΥΑΕ,2021; Burke et al., 2006).

Η Ελλάδα ακολουθώντας το ευρωπαϊκό πλαίσιο, έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο μέσω της εναρμόνισης με τα πρότυπα της ΕΕ και της διενέργειας τακτικών ελέγχων από την Επιθεώρηση Εργασίας και τη ΠΑΕΥΥ (ΠΑΕΥΥ,2024; Ν.3850/2010). Παρά τις εθνικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τις οικονομικές δυνατότητες και τις γεωγραφικές ιδιαιτερότητες κάθε χώρας, οι θεμελιώδεις αρχές παραμένουν

ενιαίες: η ιεράρχηση της πρόληψης, η διαρκής επένδυση στο ανθρώπινο κεφάλαιο και ο αυστηρός έλεγχος της συμμόρφωσης (ΔΕΣΦΑ,2023; European Commission,2023).

Πίνακας 2:Συγκριτική παρουσίαση πρακτικών ασφαλείας ανά χώρα

Χώρα	Κύριος Μηχανισμός Συμμόρφωσης	Συχνότητα Επιθεωρήσεων	Εστίαση Εκπαίδευσης
Γερμανία	Υποχρεωτική Πιστοποίηση ISO 45001	Εξαμηνιαία (Υψηλή ένταση)	Τεχνική Αρτιότητα & Standarization
Γαλλία	Ενσωμάτωση στο Management Έργου	Βάσει Φάσης Έργου	Βιωματική Μάθηση & Πρόληψη
Ελλάδα	Εναρμόνιση με Ν. 3850/2010	Ετήσια / Τακτική	Κανονιστική Συμμόρφωση & ΜΑΠ

Πίνακας 3:Δείκτες απόδοσης ασφαλείας σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Δείκτης (KPI)	Στόχος Ευρωπαϊκής Οδηγίας	Εφαρμογή στην Πράξη
LTI (Lost Time Injury)	Μηδενισμός ατυχημάτων (Vision Zero)	Υψηλή συμμόρφωση σε Β. Ευρώπη
Near Miss Reporting	Πλήρης καταγραφή συμβάντων	Αυξανόμενη τάση στην Ελλάδα
Training Hours/Employee	Ελάχιστες ετήσιες ώρες ανά θέση	Υποχρεωτική βάσει Π.Δ. 17/1996

4.4.4 Συστήματα Διαχείρισης και Πρόληψης Ατυχημάτων

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί συστηματικά την υιοθέτηση Συστημάτων Διαχείρισης Υγείας και Ασφάλειας, με κυρίαρχο το διεθνές πρότυπο ISO 45001:2018 (ISO,2018; Yuan et al.,2021). Τα συστήματα αυτά δεν αποτελούν απλώς ένα σύνολο κανόνων, αλλά ένα δυναμικό πλαίσιο που βασίζεται στη φιλοσοφία του κύκλου PDCA (Plan-Do-Check-Act) (Zwetsloot &Hale,2011;Fernadez – Muniz et al.,2017). Μέσω αυτού, οι επιχειρήσεις φυσικού αερίου ενσωματώνουν τη διαχείριση κινδύνου σε κάθε

επίπεδο της οργανωτικής τους δομής, μετατρέποντας την ασφάλεια από τυπική υποχρέωση σε στρατηγική προτεραιότητα (API RP 1173,2015; ΔΕΣΦΑ,2023).

Η αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων στηρίζεται στην ικανότητα τους να αναλύουν σε βάθος τα αίτια των ατυχημάτων μέσω μεθοδολογιών όπως η Ανάλυση Γενεσιουργών Αιτιών (Root Cause Analysis) (Reason,1997; Karanikas & Weber,2020). Αντί για την απλή απόδοση ευθυνών, τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης εστιάζουν στον εντοπισμό συστημικών αστοχιών και στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των υφιστάμενων προληπτικών μέτρων (Hale & Borys,2013; Amir -Heidari et al.,2014). Η χρήση ψηφιακών εργαλείων και συστημάτων Safety Management Intelligence επιτρέπει πλέον την παρακολούθηση δεικτών σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να προσαρμόζουν τις πρακτικές τους πριν εκδηλωθεί ένα επικίνδυνο συμβάν (Nguyen et al.,2025; Wang et al.,2025).

Επιπλέον, η συνεχής εκπαίδευση και η καλλιέργεια μιας κουλτούρας αναφοράς ενισχύουν την προστασία των εργαζομένων (Zohar,1980;Zhang & Wu,2021). Η ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής, όπως τα φορητά συστήματα ανίχνευσης και οι ψηφιακές πλατφόρμες καταγραφής περιστατικών, διασφαλίζει ότι κάθε πληροφορία που αφορά την ασφάλεια αξιοποιείται για τη συνεχή βελτίωση των εργασιακών συνθηκών (Gao t al.,2020; Lu et al.,2025). Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα διαχείρισης λειτουργούν ως «ασπίδα» προστασίας, μειώνοντας τη συχνότητα και τη σοβαρότητα βιομηχανικών ατυχημάτων (Vinnem,2014;EGIG,2023).

Κεφάλαιο 5: Στρατηγικές Πρόληψης Ατυχημάτων

Στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, η πρόληψη των ατυχημάτων αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για τη διασφάλιση βιώσιμων και ασφαλών ενεργειακών λειτουργιών. Λόγω του ότι το φυσικό αέριο είναι εξαιρετικά επικίνδυνο, λόγω της ευφλεκτότητας του, της εκρηκτικότητας του και των υψηλών πιέσεων λειτουργίας, είναι αδιαπραγμάτευτη η σχεδίαση και η εφαρμογή πολυεπίπεδων στρατηγικών πρόληψης. Η πρόληψη αποτελεί το σύνολο των μέτρων που επιδιώκουν να μειώσουν την πιθανότητα εμφάνισης ενός ανεπιθύμητου γεγονότος και ταυτόχρονα να περιορίσουν τις συνέπειες του, εστιάζοντας τόσο στην τεχνική όσο και στην ανθρώπινη διάσταση (Josseinnia et al.,2021). Η σύγχρονη προσέγγιση, από την άλλη, εδράζεται στην έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης κινδύνων (integrated risk management), σύμφωνα με αυτήν, οι προληπτικές στρατηγικές πρέπει να ενσωματώνονται σε κάθε φάση , δηλαδή από τον σχεδιασμό μέχρι την συντήρηση των δικτύων φυσικού αερίου (Davatgar et al.,2019).

5.1.1 Αρχές και Φιλοσοφία Πρόληψης

Η προληπτική στρατηγική στον τομέα αυτό αποτελεί τη βάση κάθε ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης ασφάλειας (Μπαλταζτής,2018; IGU,2021; BP,2023). Σκοπός είναι η συστηματική μείωση της πιθανότητας εμφάνισης ανεπιθύμητων γεγονότων, καθώς και η ελαχιστοποίηση των συνεπειών τους σε περίπτωση που αυτά συμβούν (IEA 2020; Καραμανλής * Σταμούλης ,2017). Για να επιτευχθεί αυτό, οι οργανισμοί που δραστηριοποιούνται στη βιομηχανία φυσικού αερίου υιοθετούν συγκεκριμένες φιλοσοφίες και αρχές, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο σχεδιασμού , λήψης αποφάσεων και λειτουργίας των συστημάτων ασφαλείας(Snyder,2015; Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας,2021; Devold,2013).

Η πρόληψη δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα σύνολο απομονωμένων τεχνικών μέτρων, αλλά ως μια ολιστική προσέγγιση διαχείρισης κινδύνου, η οποία εδράζεται στη γνώση, την εμπειρία, τη συμμετοχή και τη συνεχή μάθηση (Koo et al.,2016; Wood,2018;Mokhatab et al.,2018). Η φιλοσοφία της πρόληψης αποτυπώνεται μέσα από τρεις θεμελιώσεις αρχές, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

1. Πρόβλεψη αντί εραπείας

Η πρόληψη στηρίζεται στην αρχή της πρόβλεψης, δηλαδή την έγκαιρη αναγνώριση, ανάλυση και αξιολόγηση των κινδύνων πριν την εκδήλωση ενός ατυχήματος αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο ενός αποτελεσματικού συστήματος ασφάλειας. Η αρχή αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ατυχημάτων προέρχεται από προβλέψιμες αιτίες, οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν μέσω αναλυτικών μεθόδων και κατάλληλων διαδικασιών ελέγχου (Buddico et al., 2021).

Επιπλέον, η φιλοσοφία της πρόβλεψης απαιτεί συνεχή αξιολόγηση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Η χρήση τεχνολογιών προγνωστικής συντήρησης (predictive maintenance) και ανάλυσης δεδομένων λειτουργίας (data driven diagnostics) επιτρέπει την ανίχνευση ανωμαλιών πριν αυτές οδηγήσουν σε ατύχημα. Έτσι, η πρόληψη μετατρέπεται από παθητική αντίδραση σε ενεργό διαχείριση του ρίσκου. (Perrow, 1984; Leveson, 2011)

2. Συστηματική προσέγγιση

Η δεύτερη βασική αρχή αφορά τη θεώρηση της ασφάλειας ως σύστημα, όπου οι τεχνικές, οργανωτικές, περιβαλλοντικές και ανθρώπινες παράμετροι αλληλοεπιδρούν δυναμικά. Για παράδειγμα, σε μια αστοχία αγωγού φυσικού αερίου, η τελική έκρηξη μπορεί να οφείλεται:

- Ανεπαρκή συντήρηση (τεχνικός παράγοντας)
- Ελλιπή επιθεώρηση ή κακή επικοινωνία μεταξύ τμημάτων (οργανωτικός παράγοντας)
- Μη συμμόρφωση του εργαζόμενου στις διαδικασίες (ανθρώπινος παράγοντας) και
- Μη προβλεπόμενες περιβαλλοντικές επιδράσεις (π.χ διάβρωση λόγω υγρασίας)

Η συστηματική προσέγγιση απαιτεί τη χαρτογράφηση όλων των κρίσιμων διεργασιών και των μεταξύ τους αλληλεξαρτήσεων, ώστε να εντοπιστούν τα «αδύναμα σημεία» που μπορεί να οδηγήσουν σε αποτυχία. Εργαλεία όπως το Bow Tie Analysis ή το Fault Tree Analysis (FTA) χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση των διαδρομών κινδύνου και την αναγνώριση των σημείων όπου μπορούν να εφαρμοστούν προληπτικά μέτρα (Fleming & Lardner, 2019).

Η υιοθέτηση της συστημικής προσέγγισης στον τομέα του φυσικού αερίου έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενιαίων Συστημάτων Διαχείρισης Ασφάλειας (Safety

Management Systems), τα οποία ενσωματώνουν πολιτικές, διαδικασίες, τεχνικές και ανθρώπινους παράγοντες σε ένα ενιαίο πλαίσιο διοίκησης.

3.Συνεχής βελτίωση και ανατροφοδότηση

Η τρίτη και τελευταία αρχή αναγνωρίζει ότι η ασφάλεια δεν αποτελεί στατική κατάσταση αλλά μία δυναμική και εξελισσόμενη διαδικασία. Οι τεχνολογικές εξελίξεις, οι αλλαγές στις επιχειρησιακές πρακτικές και τα διδάγματα από προηγούμενα περιστατικά καθιστούν αναγκαία τη διαρκή προσαρμογή των στρατηγικών πρόληψης.

Η συστηματική βελτίωση (continuous improvement) στηρίζεται στην κυκλική διαδικασία που εισάγει το πρότυπο ISO 45001:2018. Σύμφωνα με αυτήν, οι οργανισμοί διανομής και μεταφοράς φυσικού αερίου:

- Σχεδιάζουν τα μέτρα πρόληψης έχοντας ως βάση την αξιολόγηση κινδύνων,
- Εφαρμόζουν τις ενέργειες πρόληψης και εκπαίδευσης,
- Ελέγχουν την αποτελεσματικότητα τους μέσω δεικτών ασφάλειας και επιθεωρήσεων ,
- Δρουν διορθωτικά, ενσωματώνοντας τη γνώση από τα αποτελέσματα ελέγχου.

Η ανατροφοδότηση από τα περιστατικά, ακόμη και από παραλίγο ατυχήματα, αποτελεί ανεκτίμητη πηγή πληροφόρησης. Η συλλογή, ανάλυση και κοινοποίηση των δεδομένων αυτών ενισχύει την μάθηση και επιτρέπει την έγκαιρη αναθεώρηση των προληπτικών μέτρων (Vinodkumar & Bhasi,2010).

Η εφαρμογή των τριών αυτών αρχών εξασφαλίζει ότι η πρόληψη αντιμετωπίζεται ως διαρκής, ολοκληρωμένη και αυτοτροφοδοτούμενη διαδικασία. Η φιλοσοφία αυτή μετατρέπει την ασφάλεια από μία « ανούσια υποχρέωση συμμόρφωση» σε ενεργό αξία, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή των ενεργειακών υποδομών.

5.1.2 Κατηγορίες Στρατηγικών Πρόληψης

Η αποτελεσματική πρόληψη ατυχημάτων στον τομέα διανομής και μεταφοράς φυσικού αερίου προϋποθέτει την εφαρμογή ενός πολυεπίπεδου πλαισίου στρατηγικών, που λαμβάνει υπόψη τόσο τις τεχνικές όσο και τις οργανωτικές και ανθρώπινες διαστάσεις του κινδύνου (Papaioannou et al.,2022; Karanikas & weber,2020; IEA,2020). Σύμφωνα με διεθνείς πρακτικές και ερευνητικά δεδομένα οι στρατηγικές

πρόληψης διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: τεχνικές, οργανωτικές, ανθρώπινες και τεχνολογικές (CEN,2021; ISO,2018,Mearns et al.,2003).

Η διασύνδεση των τεσσάρων αυτών κατηγοριών δημιουργεί ένα ολιστικό σύστημα διαχείρισης της ασφάλειας, στο οποίο οι τεχνολογικές λύσεις υποστηρίζονται από οργανωτικές δομές, οι διαδικασίες ενισχύονται από εκπαιδευμένα άτομα και η συνολική λειτουργία στηρίζεται στη συνεχή παρακολούθηση και βελτίωσή της (Zwetloot &Hale,2011; Hale&Borys,2013; Koivupalo).

1. Τεχνικές Στρατηγικής Πρόληψης

Οι τεχνικές στρατηγικές αποτελούν τη βάση της φυσικής ασφάλειας του συστήματος. Αφορούν τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων φυσικού αερίου με τρόπο που ελαχιστοποιεί την πιθανότητα αστοχία ή διαρροής(Devold,2013; Speight,2018). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται, στην επιλογή κατάλληλων υλικών για τους αγωγούς τα οποία πληρούν τα διεθνή πρότυπα αντοχής, θερμοκρασιακής σταθερότητας και ανθεκτικότητας στην διάβρωση, στη σωστή μέθοδο συγκόλλησης και στεγανοποίησης που εξασφαλίζει την μηχανική ακεραιότητα του δικτύου, στην τακτική επιθεώρηση και συντήρηση των αγωγών με τεχνικές όπως η εσωτερική επιθεώρηση με “rigs”, οι δοκιμές πίεσης και η παρακολούθηση της καθοδικής προστασίας και τέλος την εγκατάσταση συστημάτων ανίχνευσης διαρροών, με αισθητήρες αερίου και πίεσης που ενεργοποιούν αυτόματα ειδοποιήσεις και απομονώνουν τμήματα του δικτύου μέσω βαλβίδων απομόνωσης (Meyers,2004;Khan&Abbasi,1999).

Σύμφωνα με την έρευνα των Davatgar το 2019. Η συστηματική επιθεώρηση και συντήρηση των υποδομών μπορεί να μειώσει την πιθανότητα αστοχίας αγωγών έως και 70%, ενώ η έγκαιρη ανίχνευση διαρροών μειώνει δραστικά τις περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες. Ακόμη, τα συστήματα πρόληψης απότομης αύξησης πίεσης και οι βαλβίδες ασφάλειας αποτελούν κρίσιμα τεχνικά μέτρα για την αποτροπή εκρήξεων, ιδιαίτερα σε σταθμούς συμπίεσης και δεξαμενές αποθήκευσης (Mannan,2012;Kletz,2009). Η τεχνική ασφάλεια ενισχύεται περαιτέρω με τη χρήση διπλών εφεδρικών συστημάτων, που εξασφαλίζουν τη λειτουργία ακόμη και σε περίπτωση μερικής αστοχίας του εξοπλισμού (Bubbico et al., 2021).

2. Οργανωτικές στρατηγικές πρόληψης

Οι οργανωτικές στρατηγικές πρόληψης συνδέονται με τη διαχείριση της ασφάλειας σε επίπεδο διοίκησης και τη δημιουργία κατάλληλων δομών που εξασφαλίζουν τη συνέπεια και τη συμμόρφωση των διαδικασιών. Η αποτελεσματική οργάνωση ενισχύει την ικανότητα του οργανισμού να αναγνωρίζει, να αξιολογεί και να αντιμετωπίζει τους κινδύνους σε όλα τα επίπεδα λειτουργίας (Weick & Sutcliffe, 2007; Stolzer & Goglia, 2015). Οι κεντρικοί πυλώνες αυτής της κατηγορίας είναι:

- Ο καθορισμός σαφών ρόλων, ευθυνών και ιεραρχίας στα θέματα ασφάλειας (ΔΕΣΦΑ, 2023),
- Η τεκμηρίωση διαδικασιών για τη συντήρηση, επιθεώρηση, αναφορά συμβάντων και διαχείριση αλλαγών (Ν.3850/2010; Π.Δ.17/1996),
- Η δημιουργία συστήματος αναφοράς και διερεύνησης συμβάντων, το οποίο συλλέγει δεδομένα για ανάλυση αιτιών και καθοδήγηση προληπτικών δράσεων (Karanikas & Weber, 2020),
- Η εφαρμογή εσωτερικών και εξωτερικών ελέγχων ασφαλείας, με βάση τα διεθνή πρότυπα ISO 45001 (Smithers, 2022).

Η οργανωτική διάσταση της πρόληψης βασίζεται στην κουλτούρα λογοδοσίας και διαφάνειας, όπου η ασφάλεια θεωρείται κοινή ευθύνη και όχι ατομική υποχρέωση. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι οργανισμοί με σαφή διοικητική δέσμευση στην ασφάλεια παρουσιάζουν έως και 50% λιγότερα περιστατικά σε σχέση με οργανισμούς που λειτουργούν με αποσπασματικές διαδικασίες. (Vinodkumar & Bhasi, 2010).

3. Ανθρώπινες στρατηγικές πρόληψης

Ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί τον πιο κρίσιμο αλλά και τον πιο ευμετάβλητο παράγοντα της πρόληψης (Flin et al, 2008; Stanton et al., 2005). Παρά την τεχνολογική ανάπτυξη και πρόοδο, ένα σημαντικό ποσοστό ατυχημάτων σε εγκαταστάσεις φυσικού αερίου αποδίδεται σε ανθρώπινο λάθος, έλλειψη γνώσης και ανεπαρκή εκπαίδευση των εργαζομένων (Hosseinnia, 2021).

Για τον λόγο αυτό η εκπαίδευση του προσωπικού αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την πρόληψη. Οι βασικοί άξονες περιλαμβάνουν:

- Εκπαίδευση σε ασφαλείας πρακτικές εργασίας, χειρισμό εξοπλισμού υπό πίεση, χρήση ατομικών μέσων προστασίας και διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης,
- Περιοδική επανεκπαίδευση με ασκήσεις προσομοίωσης και σενάρια ατυχημάτων, ώστε οι εργαζόμενοι να διατηρούν υψηλό επίπεδο ετοιμότητας,
- Προώθηση της ‘‘Just culture’’, δηλαδή ενός περιβάλλοντος όπου οι εργαζόμενοι θα μπορούν να αναφέρουν λάθη ή κινδύνους χωρίς τον φόβο ποινών (Reason, 1997).

4. Τεχνολογικές καινοτομίες

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει μετασχηματίσει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται τα μέτρα πρόληψης και οι στρατηγικές πρόληψης (Mokhatab et al., 2018; Koo et al., 2016). Οι τεχνολογικές καινοτομίες στον τομέα της ψηφιακής παρακολούθησης, των αισθητήρων και της ανάλυσης δεδομένων έχουν δημιουργήσει ένα επίπεδο ασφάλειας και διαφάνειας στη λειτουργία των συστημάτων (Nguyen et al., 2025; Wang et al., 2025).

Η χρήση έξυπνων συστημάτων ελέγχου επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση των ροών, των πιέσεων και των θερμοκρασιών σε πραγματικό χρόνο, επισημαίνοντας αυτόματα οποιαδήποτε απόκλιση από τα κανονικά όρια λειτουργίας (Hollnagel, 2014; Dekker, 2011). Παράλληλα, η ενσωμάτωση αισθητήρων IoT σε αγωγούς και σταθμούς ενισχύει την δυνατότητα προγνωστικής συντήρησης, μέσω αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης που εντοπίζουν γρήγορα φαινόμενα αστοχίας (Lu et al., 2025; Patel et al., 2024).

Επιπλέον, τα συστήματα big data analytics επιτρέπουν τη σύνθεση πληροφοριών από διαφορετικές πηγές για την προληπτική λήψη αποφάσεων. Η χρήση drones για την επιθεώρηση δικτύων, καθώς και η αξιοποίηση τεχνολογιών για την αναγνώριση μοτίβων κινδύνου, συμβάλλουν στη μετάβαση από την αντιδραστική στην προγνωστική ασφάλεια (Bubbico, 2021).

Τέλος, οι ψηφιακές στρατηγικές αποτελούν, σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση κρίσεων, καθώς επιτρέπουν την άμεση ειδοποίηση, τον απομακρυσμένο έλεγχο βαλβίδων και τη βελτιωμένη επικοινωνία μεταξύ επιχειρήσεων και πεδίου (Porter, 1985; Schein, 2010).

5.1.3 Ανάπτυξη Κουλτούρας Ασφάλειας στον Τομέα Μεταφοράς και Διανομής Φυσικού Αερίου

Η κουλτούρα της ασφάλειας αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για τη διασφάλιση της επιχειρησιακής συνέχειας και της προστασίας του ανθρώπινου δυναμικού στον τομέα του φυσικού αερίου (Stolzer & Goglia, 2015; Helath and Safety Executive (HSE), 2005). Σύμφωνα με τους κλασικούς ορισμούς των Reason (1997) και Flin (2000), η κουλτούρα ασφάλειας αντιπροσωπεύει το σύνολο των αξιών, των στάσεων και των συμπεριφορών που καθορίζουν τη δέσμευση ενός οργανισμού στη διαχείριση της επικινδυνότητας (Flin et al., 2008; Stanton et al. 2005; Weick & Sutcliffe, 2007). Στον κλάδο της ενέργειας, η κουλτούρα αυτή λειτουργεί ως ένα δυναμικό σύστημα που υπερβαίνει την απλή κανονιστική συμμόρφωση, στοχεύοντας στην πρόληψη συμβάντων υψηλής κλίμακας (Hopkins, 2005; Mannan, 2012; Kletz, 2009).

Η ανάπτυξη μια ώριμης κουλτούρας ασφάλειας στον τομέα αυτόν δομείται πάνω σε τέσσερις κρίσιμους άξονες:

1. **Ηγετική Δέσμευση και Safety Leadership:** Η ηγεσία ενός οργανισμού είναι υπεύθυνη για τη χάραξη της στρατηγικής ασφάλειας. Όπως επισημαίνει η Guldenmund (2000), η δέσμευση της διοίκησης δεν πρέπει να περιορίζεται σε διακηρύξεις, αλλά να αντικατοπτρίζει στην κατανομή πόρων για προληπτικά μέτρα και στην υιοθέτηση πολιτικών όπου η ασφάλεια προηγείται της παραγωγικότητας. Η οπτικοποίηση αυτής της πορείας προς την ωριμότητα αποδίδεται ιδανικά μέσω της «Σκάλας του Hudson».
2. **Πληροφοριακή ροή και Ανοικτή επικοινωνία:** Ένας οργανισμός με ισχυρή κουλτούρα ενθαρρύνει τη διαρκή ροή πληροφοριών από το προσωπικό πρώτης γραμμής προς τη διοίκηση. Ο Cooper (2000) τονίζει ότι η αναγνώριση των κινδύνων εξαρτάται από την ικανότητα των εργαζομένων να επικοινωνούν ελεύθερα τις παρατηρήσεις τους, διασφαλίζοντας ότι τα αδύναμα σήματα δυνητικών κινδύνων εντοπίζονται έγκαιρα.
3. **Καθιέρωση Δίκαιης κουλτούρας (Just Culture):** Η προσέγγιση της ανάλυσης συμβάντων χωρίς την εκ των προτέρων απόδοση ευθυνών είναι κεντρική για τη συλλογική μάθηση. Ο Reason (1997) υποστηρίζει ότι η διερεύνηση των ατυχημάτων πρέπει να εστιάζει στις συστημικές αδυναμίες και όχι στην τιμωρία

του ανθρώπινου λάθους. Αυτό το μοντέλο εξηγείται μέσω του μοντέλου του «Ελβετικού Τυριού».

4. **Ενεργός συμμετοχή:** Η συμμετοχή των εργαζομένων στη λήψη αποφάσεων ενισχύει την προσωπική υπευθυνότητα. Όπως ανέφερε ο Hudson (2001), όταν οι εργαζόμενοι αισθάνονται συνιδιοκτήτες των μέτρων ασφαλείας, η συμμόρφωση αυξάνεται και η ανταπόκριση σε κρίσιμες καταστάσεις γίνεται πιο αποτελεσματική.

Η ενίσχυση της κουλτούρας ασφαλείας μειώνει αποδεδειγμένα τη συχνότητα των ατυχημάτων και βελτιώνει την ανθεκτικότητα των υποδομών (Kaplan & Norton, 1996; Neely, 2002; Porter, 1985). Μέσα από τη διαρκή εκπαίδευση, την ανοικτή επικοινωνία και τη συστηματική ανασκόπηση των δεδομένων, δημιουργείται ένα περιβάλλον ασφαλούς και βιώσιμης λειτουργίας που ευθυγραμμίζεται με τα υψηλότερα διεθνή πρότυπα (Schein, 2010; Davenport, 1993; Deming, 1986).

5.1.4.Ειδικές Προληπτικές Πρακτικές

Στο πλαίσιο των συστημάτων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, η εφαρμογή εξειδικευμένων προληπτικών πρακτικών αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τη διασφάλιση της επιχειρησιακής ακεραιότητας, της προστασία του περιβάλλοντος και της ασφαλείας των εργαζομένων και των τοπικών κοινοτήτων (Μπαλτατζής, 2018). Οι πρακτικές αυτές εστιάζουν τόσο στην τεχνική κατάσταση των υφιστάμενων υποδομών όσο και στη διαχείριση των εξωτερικών παραγόντων που δύναται να επηρεάσουν τη λειτουργία τους (Καραμανλής & Σταμούλης, 2022). Ειδικότερα, οι πλέον κρίσιμες προληπτικές παρεμβάσεις περιλαμβάνουν:

- **Περιοδική αξιολόγηση της ακεραιότητας των αγωγών:**

Η συστηματική αξιολόγηση της μηχανικής και λειτουργικής ακεραιότητας των αγωγών αποτελεί βασικό μηχανισμό πρόληψης αστοχιών και διαρροών. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση προηγμένων μεθόδων επιθεώρησης, όπως διαγνωστικοί εμβολείς, εξωτερικοί έλεγχοι με υπερήχους, καθώς και ανάλυση ιστορικών δεδομένων λειτουργίας. Μέσω αυτής της προσέγγισης, εντοπίζονται έγκαιρα φαινόμενα διάβρωσης, ρωγμές ή οποιοσδήποτε άλλες δομικές ανωμαλίες, επιτρέποντας την έγκαιρη επέμβαση πριν από την εξέλιξη τους σε σοβαρά περιστατικά (Meyers, 2004; Khan & Abbasi, 1999; CCPS, 2010)).

- **Αξιολόγηση κινδύνων από εξωτερικές παρεμβάσεις:**

Ένα σημαντικό ποσοστό των αστοχιών σε αγωγούς φυσικού αερίου αποδίδεται σε δραστηριότητες τρίτων, όπως εκσκαφές, αναπτυξιακά έργα ή βαριές κατασκευές πλησίον του δικτύου. Για τον περιορισμό των σχετικών κινδύνων, εφαρμόζονται διαδικασίες χαρτογράφησης του δικτύου, προληπτικές ειδοποιήσεις προς εργολάβους, καθώς και επιτόπου επίβλεψη από εξειδικευμένο και καταρτισμένο προσωπικό. Η συστηματική εκτίμηση της πιθανότητας και των συνεπειών εξωτερικών παρεμβάσεων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης της ασφάλειας (Hollnagel,2014; Dekker,2011).

- **Διαχείριση domino effects στην περίπτωση πυκνών ενεργειακών υποδομών:**

Σε περιοχές όπου οι αγωγοί και οι εγκαταστάσεις συνυπάρχουν με άλλες βιομηχανικές υποδομές, η πιθανότητα αλυσιδωτών ατυχημάτων (domino effects) αυξάνεται συστηματικά. Η προληπτική διαχείριση αυτών των κινδύνων περιλαμβάνει μοντέλα ανάλυσης διάδοσης βλαβών, αξιολόγηση σεναρίων πολλαπλής αστοχίας και ανάπτυξη στρατηγικών απομόνωσης συμβάντων. Η στοχευμένη εκτίμηση των domino effects ενισχύει την ανθεκτικότητα των ενεργειακών δικτύων και περιορίζει τις πιθανές συνέπειες μεγάλης κλίμακας ατυχημάτων. (Stolzer & Goglia,2015; Health and Safety Executive (HSE); OSHA,2016).

- **Συστηματική ενημέρωση και εκπαίδευση τοπικών κοινοτήτων και υπηρεσιών πολιτικής προστασίας:**

Η αποτελεσματική διαχείριση εκτάκτων περιστατικών προϋποθέτει την ύπαρξη ενημερωμένων και καλά συντονισμένων τοπικών φορέων. Για τον λόγο αυτό, οι εταιρείες θα πρέπει να υλοποιούν προγράμματα ενημέρωσης κοινοτήτων, δημοτικών αρχών και υπηρεσιών πολιτικής προστασίας, τα οποία περιλαμβάνουν παρουσίαση των σχεδίων αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης και αναφοράς ύποπτων ενδείξεων διαρροής. Η ενίσχυση της κοινωνικής ετοιμότητας συμβάλλει ουσιαστικά στην μείωση των συνεπειών πιθανών περιστατικών (Zou et al.,2024;Williams et al.,2023 ;Porter,1985).

5.1.5 Εφαρμογή στην Ελληνική Πραγματικότητα

Η ελληνική πραγματικότητα παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες ως προς την ανάπτυξη, τη λειτουργία και τη ρύθμιση των δικτύων φυσικού αερίου, οι οποίες καθιστούν απαραίτητη την υιοθέτηση εξειδικευμένων στρατηγικών πρόληψης και διαχείρισης κινδύνων(Μπαλτατζής,2018; ΔΕΣΦΑ,2024). Κατά την τελευταία

δεκαετία, το εθνικό σύστημα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου έχει γνωρίσει σημαντική επέκταση, με αποτέλεσμα την αύξηση του μήκους αγωγών, της πολυπλοκότητας του δικτύου και του αριθμού των εμπλεκόμενων φορέων. Η εξέλιξη αυτή επιβάλλει την προσαρμογή των πρακτικών ασφάλειας στις σύγχρονες τεχνικές και θεσμικές απαιτήσεις, καθώς και την εναρμόνιση τους με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα. (Papaioannou et al.,2022)

Πρώτον, η συμμόρφωση με το θεσμικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τη λειτουργική ασφάλεια του συστήματος. Η Οδηγίας 2014/68/EE (Pressure Equipment Directive) και ο Κανονισμός 2017/952(EE) καθορίζουν απαιτήσεις σχετικά με τον σχεδιασμό, την κατασκευή, την πιστοποίηση και την τεχνική εποπτεία του υπό πίεση εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα φυσικού αερίου (Snyder,2015; Devold,2013; Kidnay et al.,2011). Η πλήρης ενσωμάτωση των ευρωπαϊκών αυτών διατάξεων στο ελληνικό ρυθμιστικό πλαίσιο συμβάλλει στη διασφάλιση της ποιότητας, της λειτουργικής αξιοπιστίας και της ελαχιστοποίησης των κινδύνων αστοχίας (N.3850/2010; Π.δ.17/1996).

Δεύτερον, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη και υιοθέτηση εθνικών τεχνικών προτύπων που θα καθορίζουν ενιαίες διαδικασίες συντήρησης, επιθεώρησης και αξιολόγησης της ακεραιότητας των αγωγών. Η ύπαρξη κοινά αποδεκτών τεχνικών προδιαγραφών επιτρέπει την ομογενοποίηση των πρακτικών μεταξύ των διαχειριστών, την βελτίωση της ανταλλαγής τεχνικής πληροφορίας και την ενίσχυση της συνολικής ασφάλειας του δικτύου (Speight,2018).

Επιπλέον, η δημιουργία ενός κεντρικού μητρώου καταγραφής συμβάντων και τεχνικών δεδομένων, υπό τον συντονισμό του ΔΕΣΦΑ και σε συνεργασία με τις επιμέρους Εταιρείες Διανομής Αερίου (ΕΔΑ), αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την πρόληψη ατυχημάτων. Ένα τέτοιο μητρώο θα επέτρεπε τη συστηματική συλλογή, ταξινόμηση και ανάλυση περιστατικών, τεχνικών βλαβών, εργασιών συντήρησης και παραβιάσεων ορίων λειτουργίας. Η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων θα μπορούσε να συνεισφέρει ουσιαστικά στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης κινδύνων και στη διαμόρφωση στοχευμένων δράσεων πρόληψης (Hosseinnia Davatgar et al.,2021; Bubbico et al.,2021; Yuan et al.,2021).

Τέλος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ενίσχυση της εκπαίδευσης, της κατάρτισης και πιστοποίησης του τεχνικού προσωπικού που εμπλέκεται στη λειτουργία και συντήρηση των δικτύων. Η υιοθέτηση διεθνώς αναγνωρισμένων πρότυπων, όπως ISO45001:2018 για τη διαχείριση της υγείας και ασφάλειας στην εργασία, μπορεί να συμβάλει στη διαμόρφωση υψηλού επιπέδου επαγγελματικών δεξιοτήτων και κουλτούρας ασφάλειας. Παράλληλα, η συνεχής επιμόρφωση και η αξιολόγηση της τεχνικής επάρκειας του προσωπικού αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τον περιορισμό των ανθρώπινων λαθών και την αποτελεσματικότερη απόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Flin et al., 2008; Stanton et al., 2005; ye et al., 2022).

5.2 Σχέδιο Εκπαίδευσης και Κατάρτισης για την Ασφάλεια των Εργαζομένων

Η εκπαίδευση και η κατάρτιση του ανθρώπινου δυναμικού αποτελεί έναν από τους πλέον πιο κρίσιμους παράγοντες για τη διασφάλιση της λειτουργικής ακεραιότητας και της επιχειρησιακής συνέχειας στον τομέα της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Οι δραστηριότητες του κλάδου χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα τεχνικής πολυπλοκότητας, αυστηρές λειτουργικές απαιτήσεις και αυξημένες πιθανότητες ατυχημάτων που συνδέονται με παράγοντες όπως η υψηλή πίεση, η διαβρωτική δράση, η πιθανότητα διαρροών, η γήρανση των υποδομών και τα σφάλματα χειρισμού. Σε αυτό το περιβάλλον, το ανθρώπινο λάθος αναγνωρίζεται διεθνώς ως καθοριστικός παράγοντας κινδύνου, γεγονός που αναδεικνύει την εκπαίδευση ως θεμέλιο μηχανισμό πρόληψης (Reason, 1997).

Στις σύγχρονες βιομηχανίες υψηλού κινδύνου, επιβεβαιώνεται ότι τα προγράμματα εκπαίδευσης δεν αποτελούν απλά μία διαδικαστική υποχρέωση αλλά βασικό στρατηγικό εργαλείο διαχείρισης κινδύνων. Η αποτελεσματική κατάρτιση συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού ικανό να αναγνωρίζει και να αξιολογεί κινδύνους, να εφαρμόζει σύνθετες τεχνικές διαδικασίες με ακρίβεια και να ανταποκρίνεται με ψυχραιμία σε καταστάσεις εκτάκτων αναγκών. Παράλληλα, ενισχύει την ικανότητα λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων και προάγει στη διαμόρφωση μίας συνεκτικής κουλτούρας ασφάλειας, όπου οι αξίες της πρόληψης και της συνεχούς βελτίωσης καθίστανται δομικά στοιχεία της καθημερινής εργασίας (Mearns, 2003).

Επιπλέον, οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στους τομείς των συστημάτων ελέγχου, της αυτοματοποίησης, της διαχείρισης ακεραιότητας αγωγών και της ψηφιακής παρακολούθησης απαιτούν από το προσωπικό όχι μόνο βασικές γνώσεις ασφάλειας, αλλά και εξειδικευμένες δεξιότητες. Σε αυτό το πλαίσιο, η εκπαίδευση οφείλει να είναι πολυεπίπεδη, διαρκής και προσαρμοστική αντανακλώντας την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των υποδομών και τις απαιτήσεις διεθνών προτύπων όπως τα ISO 45001 και EN 1594.

Ταυτόχρονα, η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι οι εκπαιδευτικές παρεμβάσεις είναι αποτελεσματικές μόνο όταν εντάσσονται σε ένα ευρύτερο οργανωτικό πλαίσιο που προάγει ενεργά την ασφάλεια. Η υποστήριξη της ανώτερης διοίκησης, η ύπαρξη σαφών διαδικασιών, η συνεχής παρακολούθηση της επίδρασης της εκπαίδευσης και η ενσωμάτωση ανατροφοδότησης από εργαζόμενους και τεχνικά στελέχη αποτελούν προϋποθέσεις για την διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου και βιώσιμου συστήματος μάθησης (Flin & Yule, 2004). Χωρίς αυτές τις συνθήκες, ακόμη και τα πιο καλά σχεδιασμένα εκπαιδευτικά προγράμματα παρουσιάζουν μειωμένη αποτελεσματικότητα.

5.2.1 Σκοπός και Θεμελιώδεις Αρχές του Προγράμματος Εκπαίδευσης

Η εκπαίδευση των εργαζομένων συνιστά έναν θεμελιώδη άξονα των στρατηγικών πρόληψης ατυχημάτων, καθώς το ανθρώπινο δυναμικό αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή, αποδοτική και αδιάλειπτη λειτουργία των ενεργειακών υποδομών (Karanikas & Weber, 2020 ; Mearns et al., 2003; ΔΕΣΦΑ, 2023) . Η εν λόγω βιομηχανία χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα τεχνικής πολυπλοκότητας και εγγενείς κινδύνους, που απορρέουν από τη διαχείριση εύφλεκτων ουσιών υπό υψηλή πίεση, την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης της ακεραιότητας των αγωγών, καθώς και τη δυνατότητα εμφάνισης απρόβλεπτων τεχνικών αστοχιών (EGIG, 2023 ; NTSB, 2003; Vinnem, 2014). Σε αυτό το πλαίσιο, το προτεινόμενο πρόγραμμα εκπαίδευσης στοχεύει στη δημιουργία ενός συνεκτικού, επιστημονικά τεκμηριωμένου και προσαρμοστικού προγράμματος κατάρτισης (API RP 1173, 2015; European Commission, 2023).

Ο βασικός σκοπός του προγράμματος είναι η ενίσχυση της γνώσης και των δεξιοτήτων των εργαζομένων, με τρόπο που να τους επιτρέπει:

- Να κατανοούν σε βάθος τους φυσικούς, χημικούς και τεχνικούς κινδύνους που συνδέονται με τη λειτουργία αγωγών υψηλής πίεσης
- Να εφαρμόζουν με συνέπεια και ακρίβεια τις προβλεπόμενες διαδικασίες ασφάλειας
- Να εντοπίζουν έγκαιρα αποκλίσεις και ανωμαλίες
- Να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης
- Να αναπτύσσουν μια διαρκή επαγγελματική κουλτούρα πρόληψης

Αναπόσπαστο στοιχείο του στόχου είναι η καλλιέργεια μιας κουλτούρας ασφάλειας, όπου η προληπτική συμπεριφορά, η υπευθυνότητα και η συμμόρφωση με τις διαδικασίες αποτελούν αδιαπραγμάτευτες αξίες. Η κουλτούρα αυτή δεν προκύπτει αυτόματα, αλλά οικοδομείται συστηματικά μέσα από κατάλληλα δομημένα εκπαιδευτικά προγράμματα τα οποία ενσωματώνουν αρχές μάθησης, συνεχιζόμενης ανάπτυξης και ενεργής συμμετοχής του προσωπικού (Reason,1997, Mearns,2003). Τα αποτελεσματικά εκπαιδευτικά προγράμματα για βιομηχανίες υψηλού κινδύνου πρέπει να εδράζονται σε τρεις θεμελιώδεις αρχές:

A) Συστηματικότητα

Η συστηματικότητα αναφέρεται στον σαφή προσδιορισμό των μαθησιακών στόχων, στη μεθοδική ανάλυση των εκπαιδευτικών αναγκών και στον προσεκτικό σχεδιασμό της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Ένα συστηματικό πρόγραμμα διασφαλίζει ότι το περιεχόμενο είναι επιστημονικά έγκυρο, λειτουργικά σχετικό και πλήρως εναρμονισμένο με τις επιχειρησιακές απαιτήσεις του οργανισμού. Η συστηματική προσέγγιση περιλαμβάνει την τυποποίηση των εκπαιδευτικών διαδικασιών, την ενσωμάτωση τεχνικών μάθησης ενηλίκων και τη συνεχή επικαιροποίηση του περιεχομένου βάσει ανατροφοδότησης και νέων τεχνολογικών εξελίξεων. Η συστηματικότητα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που διαφοροποιεί τα αποτελέσματα από τα μη αποτελεσματικά προγράμματα ασφάλειας (Oude-Hengel,2019).

B) Προσαρμοστικότητα

Ο τομέας του φυσικού αερίου εξελίσσεται ραγδαία, τόσο σε επίπεδο τεχνολογιών όσο και σε επίπεδο κανονιστικών απαιτήσεων. Συνεπώς, η εκπαίδευση οφείλει να προσαρμόζεται διαρκώς σε αυτά τα δεδομένα, ενσωματώνοντας νέες γνώσεις και δεξιότητες που απαιτούνται για την αποτελεσματική λειτουργία του προσωπικού. Η

προσαρμοστικότητα περιλαμβάνει επίσης την εξατομίκευση της εκπαίδευσης, ανάλογα με τον βαθμό εμπειρίας, τις αρμοδιότητες και τον βαθμό τεχνικής εξειδίκευσης του κάθε εργαζόμενου. Μελέτες δείχνουν ότι η προσαρμοστικότητα βελτιώνει την εμπλοκή των εργαζομένων και αυξάνει την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα (Oude-Hengel,2019).

Γ) Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ενός προγράμματος εκπαίδευσης αποτελεί προϋπόθεση για τη συνεχή βελτίωση και ανανέωση του. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται σε μετρήσιμους δείκτες απόδοσης οι οποίοι μπορεί να περιλαμβάνουν: την αύξηση των γνώσεων, τη βελτίωση των πρακτικών δεξιοτήτων, τη συμμόρφωση με τις διαδικασίες, τη μείωση των σφαλμάτων και των ατυχημάτων, καθώς και την ενίσχυση της ασφάλειας σε πραγματικές συνθήκες εργασίας (Kaplan & Norton,1996 ; Neely,2002). Η διεθνής εμπειρία έχει καταδείξει ότι η χρήση δομημένων συστημάτων αξιολόγησης ενισχύει σημαντικά την αξία των εκπαιδευτικών παρεμβάσεων και καθιστά τις επενδύσεις στην εκπαίδευση περισσότερο αποδοτικές (Burke,2006).

5.2.2 Δομή και Περιεχόμενο των Προγραμμάτων Εκπαίδευσης

Το πρόγραμμα κατάρτισης προτείνεται να οργανωθεί σε τέσσερις κύριες ενότητες, οι οποίες καλύπτουν το σύνολο των κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας και ασφάλειας του δικτύου φυσικού αερίου (Κελεπερτζής,2019; ΕΛΙΝΥΑΕ,2021).

A. Θεωρητική Εκπαίδευση

Η πρώτη ενότητα αφορά την παροχή θεμελιωδών γνώσεων σχετικά με:

1. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου
2. Τη λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς και διανομής
3. Τις κύριες αιτίες αστοχίας των αγωγών
4. Τα ισχύοντα νομοθετικά και κανονιστικά πλαίσια
5. Τις διεθνείς προδιαγραφές ασφάλειας π.χ ISO45001

Η θεωρητική εκπαίδευση συμβάλει στην κατανόηση των βασικών μηχανισμών κινδύνου και στην ανάπτυξη κοινής τεχνικής γλώσσας μεταξύ των εργαζομένων. Ταυτόχρονα, ενισχύει την ικανότητα αναγνώρισης παραγόντων κινδύνου και τη λήψη ορθών αποφάσεων (Dejoy,2005).

Β. Πρακτική εκπαίδευση και Βιωματική μάθηση

Η πρακτική εκπαίδευση θεωρείται κρίσιμος πυλώνας του προγράμματος, καθώς η ασφαλής απόδοση σε πραγματικές συνθήκες απαιτεί συστηματική εξάσκηση. Πιο συγκεκριμένα:

- Χρήση εξοπλισμού ανίχνευσης διαρροών
- Εφαρμογή διαδικασιών απομόνωσης αγωγών
- Χειρισμό βαλβίδων υψηλής πίεσης
- Εξοικείωση με προσωπικό προστατευτικό εξοπλισμό
- Πραγματοποίηση επιθεωρήσεων σε πεδίο και αναγνώριση ανωμαλιών.

Η πρακτική εκπαίδευση μειώνει σημαντικά την πιθανότητα ανθρώπινου λάθους και βοηθά τους εργαζόμενους να αναπτύξουν αυτοματοποιημένες και ασφαλείς συμπεριφορές (Jabbari,2022).

Γ. Προσομοιώσεις και εκπαίδευση σε σενάρια έκτακτης ανάγκης

Εκπαίδευση μέσω προσομοιώσεων και ασκήσεις ετοιμότητας. Οι προσομοιώσεις συνιστούν διεθνώς αναγνωρισμένη μέθοδος εκπαίδευσης σε βιομηχανίες υψηλού κινδύνου, διότι επιτρέπουν στους εργαζόμενους να εξασκηθούν σε σπάνια αλλά κρίσιμα συμβάντα χωρίς πραγματική έκθεση στον κίνδυνο.

Τα σενάρια μπορούν να αφορούν:

1. Διαρροές και εκρήξεις,
2. Μηχανικές αστοχίες αγωγών
3. Πυρκαγιές σε σταθμούς συμπίεσης
4. Διαδικασίες άμεσης εκκένωσης περιοχών
5. Επικοινωνία με κέντρο επιχειρήσεων.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η συμμετοχή σε δομημένα σενάρια κρίσης ενισχύει την ετοιμότητα, βελτιώνει την ομαδικότητα και μειώνει τον χρόνο απόκρισης σε πραγματικά περιστατικά (Mearns,2003, Wu,2008).

Δ. Εξειδικευμένη εκπαίδευση και συνεχής επιμόρφωση

Η εκπαίδευση ειδικευμένων τεχνικών, όπως επιθεωρητές αγωγών, μηχανικούς διαχείρισης ακεραιότητας, τεχνικούς συντήρησης και υπεύθυνους ασφάλειας, περιλαμβάνει:

- Μεθόδους ανάλυσης κινδύνων
- Τεχνικές επιθεώρησης βάσει κινδύνου
- Συστήματα διαχείρισης ακεραιότητας αγωγών
- Αξιολόγηση δεδομένων από SCADA
- Πρότυπα συμμόρφωσης και επιθεώρησης

Η συνεχής επιμόρφωση ενισχύει την τεχνική επάρκεια και ευθυγραμμίζει τον οργανισμό με τις εξελίξεις της τεχνολογίας και της νομοθεσίας (Oude-Hengel,2019).

5.2.3 Εκπαιδευτικές Μέθοδοι και Παιδαγωγικές Προσεγγίσεις

Η επιλογή κατάλληλων εκπαιδευτικών μεθόδων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας κάθε προγράμματος κατάρτισης στον τομέα της μεταφοράς και της διανομής φυσικού αερίου (Davenport,1993; Nonaka &Takeuchi,1995). Ο συγκεκριμένος τομέας χαρακτηρίζεται από υψηλές τεχνικές απαιτήσεις, αυστηρά πρωτόκολλα ασφάλειας και διαρκώς εξελισσόμενα πρότυπα και τεχνολογίες. Ως εκ τούτου, η υιοθέτηση ενός πολυδιάστατου παιδαγωγικού πλαισίου κρίνεται αναγκαία για την πλήρη κάλυψη των εκπαιδευτικών αναγκών των εργαζομένων (Porter,1985; Schein,2010).

Προτείνεται η εφαρμογή ενός μικτού μοντέλου μάθησης, το οποίο αξιοποιεί πλεονεκτήματα τόσο της παραδοσιακής όσο και της ψηφιακής εκπαίδευσης. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τα εξής:

1.Δια ζώσης διδασκαλία

Η παραδοσιακή διά ζώσης εκπαίδευση παραμένει θεμελιώδης, ιδιαίτερα για την κατανόηση κρίσιμων θεμάτων όπως οι διαδικασίες ασφάλειας, η χρήση ειδικού εξοπλισμού και η εφαρμογή κανονισμών. Η αλληλεπίδραση εκπαιδευτή-εκπαιδευόμενων ενισχύει τη συνεργατική μάθηση και προσφέρει άμεση ανατροφοδότηση. Επιπλέον, συμβάλλει στην καλλιέργεια επαγγελματικής κουλτούρας

ασφάλειας, στοιχείο απαραίτητο για έναν κλάδο όπως αυτός, με υψηλούς κινδύνους.(Zohar, 1980-2010)

2.Ηλεκτρονική μάθηση (e-learning)

Η ηλεκτρονική μάθηση αξιοποιείται για τη διδασκαλία θεωρητικών εννοιών, όπως η νομοθεσία, οι τεχνικές προδιαγραφές και οι αρχές λειτουργίας του συστήματος φυσικού αερίου (Mearns et al.,2003; Koivunpalo et al., 2015). Προσφέρει ευελιξία, εξατομίκευση του ρυθμού μάθησης και τη δυνατότητα άμεσης πρόσβασης σε ψηφιακό υλικό και αξιολογήσεις. Επιπλέον, η τεχνολογία e-learning επιτρέπει τη συνεχή ενημέρωση του περιεχομένου, ώστε αυτό να ανταποκρίνεται στις τρέχουσες τεχνικές και κανονιστικές εξελίξεις. Σε οργανισμούς με γεωγραφικά κατακεκομμένο προσωπικό, το e-learning μειώνει σημαντικά το κόστος και τον χρόνο μετακίνησης (Smithers,2022).

3.Εργαστηριακές δραστηριότητες και πρακτική άσκηση

Οι πρακτικές ασκήσεις σε ελεγχόμενο περιβάλλον αποτελούν τη βάση της τεχνικής κατάρτισης. Μέσω αυτών, οι εργαζόμενοι αναπτύσσουν δεξιότητες χειρισμού πραγματικού εξοπλισμού, κατανόησης λειτουργίας δικτύων και εφαρμογής διαδικασιών συντήρησης. Οι εργαστηριακές δραστηριότητες επιτρέπουν την ενσωμάτωση των αρχών της βιωματικής μάθησης, σύμφωνα με το μοντέλο του Kolb, όπου η μάθηση προκύπτει από τον κύκλο εμπειρίας, στοχασμού, εννοιολογικής κατανόησης και εφαρμογής. Για κλάδους υψηλής επικινδυνότητας, όπως ο κλάδος της διανομής και της μεταφοράς φυσικού αερίου, η βιωματική αυτή προσέγγιση θεωρείται απαραίτητη για την εδραίωση επαγγελματικής αυτοπεποίθησης και τήρησης των κανόνων ασφάλειας (Reason, 1997 ; Flin et al.2008).

4.Προσομοιώσεις και εικονική πραγματικότητα

Η χρήση προσομοιώσεων και τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας συνιστά καινοτόμους μεθόδους κατάρτισης που επιτρέπει στους εργαζόμενους να εξασκηθούν σε σύνθετα και επικίνδυνα σενάρια χωρίς φυσικό ρίσκο. Τα προσομοιωμένα περιβάλλοντα μπορούν να αναπαράγουν καταστάσεις όπως διαρροές, αστοχίες εξοπλισμού και επείγουσες παρεμβάσεις, ενισχύοντας την κρίσιμη σκέψη και την ετοιμότητα. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, η πολυαισθητηριακή μάθηση που

επιτυγχάνεται μέσω εικονικής πραγματικότητας, έχει ισχυρό αντίκτυπο στην απόκτηση πρακτικών δεξιοτήτων και στη διατήρηση της γνώσης (Patel et al.,2024).

Έρευνες στον τομέα τη ασφάλειας καταδεικνύουν ότι ο συνδυασμός πολλαπλών εκπαιδευτικών τεχνικών αυξάνει την αποτελεσματικότητα της μάθησης. Ενδεικτικά, η ανάλυση των Burket,2006, έδειξε ότι η ενσωμάτωση ενεργητικών και βιωματικών μεθόδων οδηγεί σε σημαντικά ανώτερη απόδοση των εκπαιδευομένων, σε σύγκριση με αποκλειστικά θεωρητικές προσεγγίσεις. Τα ευρήματα αυτά υποστηρίζουν την ανάγκη για πολυτροπικές παιδαγωγικές στρατηγικές, ιδίως σε επαγγέλματα που συνδυάζουν υψηλές τεχνικές απαιτήσεις με αυξημένους κινδύνους.

5.2.4 Αξιολόγηση Αποτελεσματικότητας Εκπαίδευσης

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ενός εκπαιδευτικού προγράμματος αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του κύκλου της εκπαίδευσης και της επαγγελματικής ανάπτυξης, ιδιαίτερα σε τεχνικούς και υψηλού κινδύνου κλάδους (Deming,1986 ; Juran,1988). Η συστηματική και δομημένη αξιολόγηση επιτρέπει την ανατροφοδότηση προς τους εκπαιδευτές, την αναθεώρηση του εκπαιδευτικού περιεχομένου και τη συνεχή βελτίωση της ποιότητας του προγράμματος. Παράλληλα, συμβάλλει στην ενίσχυση της κουλτούρας ασφάλειας και στην πρόληψη βιομηχανικών ατυχημάτων (Schein,2010). Στο πλαίσιο αυτό, προτείνονται τέσσερις βασικοί άξονες αξιολόγησης, οι οποίοι συνδυάζουν ποσοτικές και ποιοτικές μεθόδους, καλύπτοντας τόσο τις γνωστικές όσο και τις πρακτικές και συμπεριφοριακές διαστάσεις της εκπαίδευσης:

1.Αξιολόγηση Γνώσεων

Η αποτίμηση των γνωστικών δεξιοτήτων πραγματοποιείται μέσω γραπτών ή ηλεκτρονικών εξετάσεων, κουίζ και δομημένων τεστ πολλαπλής επιλογής. Οι εξετάσεις αυτές ελέγχουν την κατανόηση θεωρητικών εννοιών, κανονισμών, τεχνικών οδηγιών και διαδικασιών ασφαλούς λειτουργίας των δικτύων φυσικού αερίου. Η χρήση ηλεκτρονικών αξιολογήσεων επιτρέπει την αυτοματοποιημένη βαθμολόγηση, την άμεση ανατροφοδότηση και τη στατιστική παρακολούθηση της προόδου των εκπαιδευόμενων με την πάροδο του χρόνου (Smithers,2022).

2.Αξιολόγηση πρακτικών δεξιοτήτων

Η αξιολόγηση των πρακτικών δεξιοτήτων είναι καθοριστική για έναν τεχνικό κλάδο όπου η ορθή εφαρμογή διαδικασιών μπορεί να αποτρέψει σοβαρά ατυχήματα (Flin et al.,2008). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει:

- Παρατήρηση στο πεδίο, όπου ο εκπαιδευτής αρμόδιος αξιολογητής παρακολουθεί τον εργαζόμενο κατά την εκτέλεση πραγματικών ή προσομοιωμένων εργασιών, εξετάζοντας την ορθή χρήση εξοπλισμού, την ακρίβεια τεχνικών χειρισμών και την εφαρμογή των πρωτοκόλλων ασφαλείας (Mannan,2012; Kletz,2009).
- Drills και σενάρια έκτακτης ανάγκης, τα οποία επιτρέπουν την αξιολόγηση της ετοιμότητας, της ταχύτητας απόκρισης και της ικανότητας συνεργασίας σε συνθήκες πίεσης (NTSB,2011; Jabbari et al., 2022).

Η πρακτική αξιολόγηση συνδέεται άμεσα με την έννοια της βιωματικής μάθησης και συμβάλλει στην εδραίωση επαγγελματικών δεξιοτήτων υψηλής αξιοπιστίας (Stanton et al.,2005).

3.Αξιολόγηση Συμπεριφορών

Η εκτίμηση των συμπεριφορών όλων όσων σχετίζονται με την τήρηση των κανόνων ασφαλείας, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση υψηλών προτύπων λειτουργίας. Η αξιολόγηση συμπεριφορών μπορεί να περιλαμβάνει:

1. Συστηματική παρακολούθηση συμμόρφωση με τις διαδικασίες εργασίας (N.3850/2010; Π.Δ.17/1996),
2. Ανάλυση περιστατικών μη συμμόρφωσης και επαναλαμβανόμενων αποκλίσεων(Karanikas & Weber,2020).

Η διάσταση αυτή εστιάζει όχι μόνο στο *τι* κάνει ο εργαζόμενος, αλλά και στο *πως* το κάνει, αναδεικνύοντας τη σημασία της προληπτικής συμπεριφοράς και της επαγγελματικής ευθύνης.

4.Μετρήσιμοι δείκτες απόδοσης

Οι δείκτες απόδοσης επιτρέπουν την ποσοτική αποτίμηση της επίδρασης της εκπαίδευσης σε οργανωτικό επίπεδο. Ενδεικτικοί δείκτες περιλαμβάνουν:

- Μείωση συμβάντων (π.χ. ατυχημάτων, τεχνικών αστοχιών)
- Βελτίωση χρόνου απόκρισης σε περιστατικά ή τεχνικά προβλήματα
- Αύξηση συμμετοχής και ολοκλήρωσης εκπαιδευτικών προγραμμάτων
- Βελτίωση αποτελεσμάτων επιθεωρήσεων και ελέγχων συμμόρφωσης,

Η αξιοποίηση KPIs αποτελεί διεθνώς καθιερωμένη πρακτική στις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς επιτρέπει την αντικειμενική παρακολούθηση της απόδοσης και τη σύνδεση της εκπαίδευσης με επιχειρησιακούς στόχους. Η συστηματική τους χρήση ενισχύει τη λογοδοσία και παρέχει ισχυρά δεδομένα για τη λήψη αποφάσεων (Fernandez -Munitz.2017).

5.2.5 Οργανωτική Υποστήριξη και Κουλτούρα Ασφάλειας

Η αποτελεσματικότητα των προγραμμάτων κατάρτισης σε θέματα υγείας και ασφάλειας στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από την ποιότητα της οργανωσιακής υποστήριξης και την καλλιέργεια μίας ώριμης και λειτουργικής κουλτούρας ασφάλειας. Πρόκειται για έναν τομέα όπου οι εργασιακές διαδικασίες χαρακτηρίζονται από υψηλή τεχνική εξειδίκευση και αυξημένη επικινδυνότητα, κατατάσσοντας τις εταιρείες του κλάδου στους Οργανισμούς Υψηλής Αξιοπιστίας (High Reliability Organizations). Υπό αυτές τις συνθήκες, η ύπαρξη ενός σταθερού πλαισίου διοίκησης που προάγει την πρόληψη, την υπευθυνότητα και τη συνεχή μάθηση αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των συστημάτων και την αποφυγή καταστροφικών συμβάντων (Mannan, 2012).

Ο ρόλος της διοίκησης είναι κομβικός στη διαμόρφωση της κουλτούρας ασφάλειας μέσω του Safety Leadership. Σύμφωνα με το μοντέλο του Reason (1997), η διοίκηση φέρει την ευθύνη για τη δημιουργία και τη συντήρηση των αμυνών που προστατεύουν έναν οργανισμό. Αυτές οι άμυνες, η εκπαίδευση, η τεχνολογική επιτήρηση, η επικοινωνία και η διάθεση πόρων λειτουργούν ως διαδοχικά στρώματα προστασίας.

Το μοντέλο αυτό, οι αδυναμίες κάθε στρώματος αναπαρίστανται ως οπές. Όταν οι οπές αυτές ευθυγραμμιστούν λόγω οργανωτικών ελλείψεων ή λανθασμένων διοικητικών αποφάσεων, δημιουργείται μία τροχιά ατυχήματος. Στον τομέα του φυσικού αερίου, η οργανωτική υποστήριξη πρέπει να διασφαλίζει ότι αυτές οι οπές παραμένουν ασύμπτωτες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας κουλτούρας ασφάλειας που

ενθαρρύνει την αναφορά λαθών και εστιάζει στη συστημική βελτίωση αντί για την ατομική τιμωρία, ενισχύοντας έτσι την ανθεκτικότητα του οργανισμού (Senge,2006; Argyris & Schon,1978).

Κεφάλαιο 6: Μελέτες Περίπτωσης και Στατιστικά Ατυχημάτων

6.1 Επισκόπηση Πραγματικών Ατυχημάτων στον Τομέα

Η ασφάλεια στον τομέα της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την προστασία του ανθρώπινου δυναμικού, της περιουσίας και τους περιβάλλοντος. Τα ατυχήματα σε αυτόν τον τομέα, αν και σχετικά σπάνια, έχουν συχνά σοβαρές συνέπειες λόγω της εύφλεκτης και υπό πίεσης φύσης του αερίου. Η μελέτη αυτών των ατυχημάτων και η ανάλυση των αιτιών τους, προσφέρει κρίσιμα δεδομένα για τη βελτίωση της ασφάλειας, την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων και την πρόληψη τυχόν συμβάντων.

6.1.1. Διεθνή Ατυχήματα στον τομέα

Όπως αναλύθηκε στις στατιστικές τάσεις της ενότητας 4.3.2., η ασφάλεια των αγωγών απειλείται σταθερά από τρεις κύριους άξονες: την παρέμβαση τρίτων, τα κατασκευαστικά ελαττώματα και τη διάβρωση (EGIG,2023; PHMSA,2022; UKOPA,2023). Στην παρούσα ενότητα, εξετάζονται διεξοδικά τρία εμβληματικά διεθνή ατυχήματα που αντιστοιχούν στις παραπάνω αιτίες. Η ανάλυση αυτή δεν εστιάζει μόνο στα τεχνικά αίτια, αλλά και στις οργανωτικές αστοχίες προσφέροντας πολύτιμα διδάγματα για τη διαχείριση της ακεραιότητας των δικτύων.

Α. Ατυχήματα που οφείλονται σε παρεμβάσεις τρίτων: Καταστροφή στο Ghislenghien, Βέλγιο, 2004 (Ref).

Το ατύχημα αυτό αποτελεί την πιο δραματική επιβεβαίωση των στατιστικών του EGIG, όπου η παρέμβαση τρίτων κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (44%) (Belvaux et al.,2009).

1. Το Συμβάν: Ρήξη αγωγού υψηλής πίεσης που οδήγησε σε έκρηξη με 24 θανάτους.

2. Βαθύτερη αιτία: Ένας εργολάβος που εκτελούσε χωματουργικά έργα εβδομάδες πριν, χτύπησε τον αγωγό. Η ζημιά δεν αναφέρθηκε ποτέ από τον Διαχειριστή του αγωγού.
3. Δίδαγμα: Η τεχνολογία από μόνη της δεν αρκεί. Απαιτείται αυστηρή επιτήρηση της ζώνης οδεύσεως και καλλιέργεια κουλτούρας αναφοράς συμβάντων από το ευρύ κοινό και τους εργολάβους.

B. Κατασκευαστικά Ελαττώματα & Διαχείριση Δεδομένων: San Bruno (Καλιφόρνια,2010), (NTSB,2011)

Το ατύχημα αυτό αναδεικνύει πως η κακή υποστήριξη ακυρώνει την ασφάλεια

1. Το Συμβάν: Έκρηξη σε αστική περιοχή με 8 θανάτους και καταστροφή 38 κατοικιών.
2. Βαθύτερη αιτία: Μία ελαττωματική συγκόλληση από το 1956 παρέμεινε στο σύστημα για δεκαετίες. Η εταιρεία (PG&E) δεν διέθετε ακριβή σχέδια και δεν γνώριζε τις τεχνικές προδιαγραφές του συγκεκριμένου τμήματος.
3. Δίδαγμα: Η σημασία της ψηφιοποίησης των αρχείων και της χρήσης Digital Twins για την παρακολούθηση της ιστορικότητας των υποδομών.

Πίνακας 4:Σύνοψη Αιτιών ατυχημάτων και οι Προτεινόμενες Λύσεις

Ατύχημα	Κύριο Αίτιο	Τεχνολογικό/Οργανωτικό Κενό	Προτεινόμενη Λύση
Ghislenghien	Παρέμβαση Τρίτων	Έλλειψη επικοινωνίας τρίτων – Διαχειριστή	Συστήματα επιτήρησης (Drones, PIGS)
San Bruno	Αστοχία Υλικού	Ελλιπή αρχεία & κακή διαχείριση δεδομένων	Ψηφιοποίηση αρχείων & ISO 45001
Carlsbad	Εσωτερική Διάβρωση	Παράλειψη εσωτερικής επιθεώρησης	Υποχρεωτικό Intelligent Pigging

6.1.2.Ελληνικά Παραδείγματα

Στην Ελληνική επικράτεια, η συστηματική καταγραφή και δημοσιοποίηση ατυχημάτων που σχετίζονται με τη μεταφορά και διανομή φυσικού αερίου παραμένει περιορισμένη. Το γεγονός αυτό αποδίδεται τόσο στο υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας των σχετικά σύγχρονων υποδομών της χώρας, όσο και στο αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τη λειτουργία των Διαχειριστών (ΔΕΣΦΑ, ΔΕΔΑ, ΕΔΑ). Ωστόσο, η ανάλυση των ετήσιων εκθέσεων της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας και των απολογισμών ασφάλειας των Διαχειριστών, αναδεικνύει περιστατικά μικρής κλίμακας, τα οποία επικεντρώνονται κυρίως στα δίκτυα μέσης και χαμηλής πίεσης (ΔΕΣΦΑ,2024 ; Papaioannou et al., 2022).

Τα περιστατικά ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

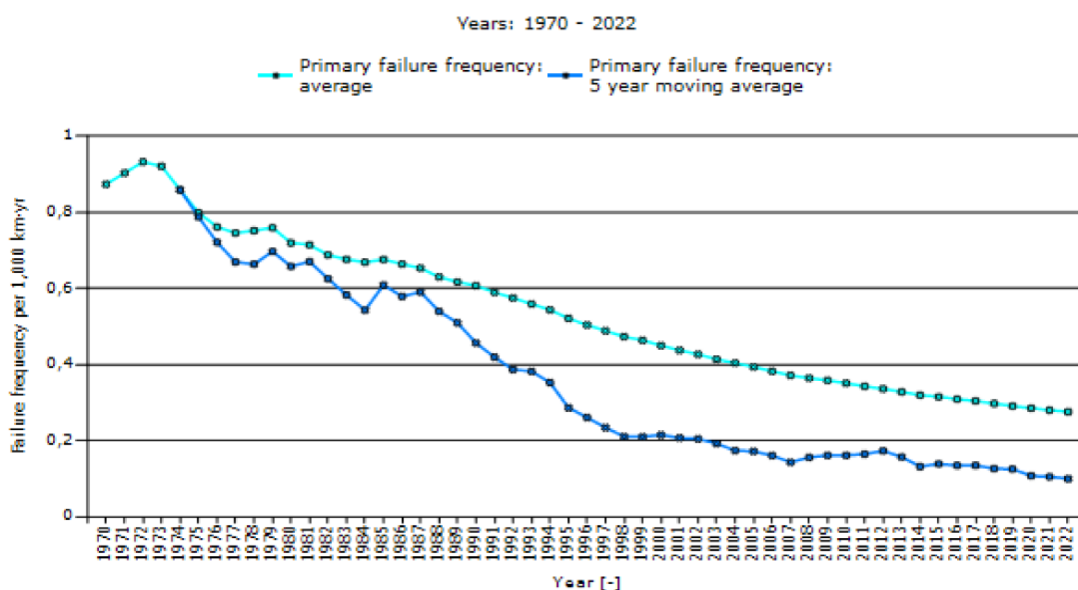
- 1. Παρεμβάσεις Τρίτων:** Αποτελούν την πλειονότητα των συμβάντων στην Ελλάδα. Αφορούν τυχαίες διαρροές που προκαλούνται από εκσκαφές τρίτων φορέων χωρίς προηγούμενη ενημέρωση ή ακριβή χρήση ψηφιακών χαρτών του δικτύου. Η συχνότητα τέτοιων περιστατικών υπογραμμίζει την ανάγκη για αυστηρότερη επιτήρηση και βελτίωση της σήμανσης των οδεύσεων (ΕΛΙΝΥΑΕ,2021 ; Κελεπερτζής,2019).
- 2. Τεχνικές Αστοχίες και Διαρροές εξοπλισμού:** Αν και σπάνιες. Έχουν καταγραφεί βλάβες σε ρυθμιστές πίεσης, βάνες και αρμούς, οι οποίες οδήγησαν σε εντοπισμένες διαρροές. Τα περιστατικά αυτά αντιμετωπίζονται συνήθως άμεσα από τα συστήματα τηλεμετρίας (SCADA) , τα οποία ενεργοποιούν τα πρωτόκολλα αυτόματης διακοπής παροχής (Nguyen et al., 2025; Wang et al., 2025).

Είναι αξιοσημείωτο ότι, μέχρι σήμερα τα καταγεγραμμένα συμβάντα στην Ελλάδα δεν έχουν οδηγήσει σε ανθρώπινες απώλειες ή εκτεταμένες περιβαλλοντικές καταστροφές. Αυτό οφείλεται στον ταχύ χρόνο απόκρισης των τεχνικών κλιμακίων και στην εφαρμογή προληπτικών ελέγχων, όπως η οσμοθέτηση του αερίου και οι περιοδικές ανιχνεύσεις διαρροών. Παρόλα αυτά, η ανάγκη για ενίσχυση της προληπτικής συντήρησης και η περαιτέρω καλλιέργεια κουλτούρας ασφάλειας παραμένουν επιτακτικές, καθώς το δίκτυο επεκτείνεται σε νέες γεωγραφικές περιοχές με διαφορετικές εδαφολογικές προκλήσεις (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας,2021).

6.2 Στατιστικά Ατυχημάτων στον Τομέα

Η European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG), η οποία ιδρύθηκε το 1970, αποτελεί τον εγκυρότερο φορέα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σχετικά με την ασφάλεια των αγωγών φυσικού αερίου υψηλής πίεσης στην Ευρώπη (EGIG,2023). Στην ομάδα συμμετέχουν πλέον 17 μεγάλοι Διαχειριστές Συστημάτων Μεταφοράς από όλη την ήπειρο, καλύπτοντας ένα συνολικό μήκος δικτύου που υπερβαίνει τα 140.000χλμ. η συστηματική καταγραφή της EGIG προσφέρει μία μοναδική δεξαμενή γνώσης, επιτρέποντας στους ερευνητές και τους διαχειριστές να κατανοήσουν όχι μόνο τη συχνότητα των ατυχημάτων, αλλά και τις βαθύτερες αιτίες που τα προκαλούν.

Η ανάλυση της EGIG καταδεικνύει μία εντυπωσιακή βελτίωση στα επίπεδα ασφάλειας των ευρωπαϊκών δικτύων. Η συχνότητα ατυχημάτων ορίζεται ως ο αριθμός των συμβάντων ανά 1.000 χλμ αγωγού ανά έτος λειτουργίας (UKOPA,2023). Όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 10, η πτωτική πορεία είναι σταθερή και χωρίζεται σε τρεις διακριτές περιόδους:



Σχήμα 10: Εξέλιξη αστοχιών μεταξύ των ετών 1970-2022.(Πηγή :EGIG <https://www.egig.eu/>)

Η EGIG ταξινομεί τις αιτίες των ατυχημάτων σε πέντε κύριες κατηγορίες η καθεμία από τις οποίες έχει αντιμετωπιστεί με διαφορετικά στρατηγικά εργαλεία:

1. Παρέμβαση Τρίτων: Παραμένει ιστορικά η κύρια αιτία. Αφορά μηχανικές βλάβες από εκσκαφές ή γεωργικές δραστηριότητες. Η μείωσή της επιτεύχθηκε

- μέσω της αυστηρότερης επιτήρησης της ζώνης οδεύσεως και της χρήσης συστημάτων GIS (Vinnem,2014; Hopkins,2005).
2. Διάβρωση: Κάποτε αποτελούσε κρίσιμο κίνδυνο, αλλά πλέον έχει περιοριστεί δραστικά λόγω της χρήσης Intelligent Pigging και της συνεχούς παρακολούθησης του δυναμικού καθοδικής προστασίας (Roberge,2008; Revie,2011; Bubbico et al., 2021).
 3. Κατασκευαστικά Ελαττώματα και αστοχία υλικού: Αφορά ελαττωματικές συγκολλήσεις ή αστοχίες υλικού. Η βελτίωση εδώ οφείλεται στις Μη Καταστροφικές Δοκιμές και στα αυστηρά πρότυπα ποιοτικού ελέγχου κατά την παραγωγή των σωλήνων (Speight,2018).
 4. Φυσικά φαινόμενα: Περιλαμβάνει σεισμούς, καθιζήσεις και πλημμύρες. Στην Ελλάδα λόγω σεισμικότητας, η κατηγορία αυτή τυγχάνει ιδιαίτερης προσοχής μέσω αντισεισμικού σχεδιασμού των αγωγών (Koo et al.,2016 ; Jabbari et al.,2022).

Η θετική στατιστική εικόνα που παρουσιάζει η EGIG είναι το αποτέλεσμα της σύγκλισης τεσσάρων τεχνολογικών πυλώνων.

In line Inspection: Η ικανότητα ακτινογραφίας του αγωγού εκ των έσω επέτρεψε τη μετάβαση από τη διορθωτική στην προληπτική συντήρηση.

Προηγμένα Υλικά: Η χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής και ολκιμότητας με εξωτερική επικάλυψη 3 στρώσεων.

SCADA και Τηλεμετρία: Η δυνατότητα απομόνωσης τμημάτων του δικτύου σε δευτερόλεπτα μέσω αυτόματων βανών ασφαλείας περιόρισε τις συνέπειες των διαρροών.

Αυστηροποίηση Κανονισμών: Η υιοθέτηση των ευρωπαϊκών προτύπων επέβαλε ομοιόμορφες πρακτικές ασφαλείας σε όλα τα κράτη μέλη.

6.3 Σύγκριση με Άλλους Τομείς Επικίνδυνων Εργασιών

Η αξιολόγηση των κινδύνων που συνδέονται με τις εργασίες στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου αποκτά μεγαλύτερο βάθος όταν συγκρίνεται με άλλους βιομηχανικούς κλάδους υψηλής επικινδυνότητας, όπως η χημική βιομηχανία, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας πετρελαίου και οι μονάδες βιομηχανικών διεργασιών μεγάλης κλίμακας. Η συγκριτική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την αναγνώριση τόσο των

ομοιοτήτων όσο και των ουσιαστικών διαφορών ως προς τη φύση των κινδύνων, τις πιθανές συνέπειες και τα ρυθμιστικά πλαίσια που τα διέπουν (Mannan,2012; CCPS,2010).

1.Τύποι Ατυχημάτων

Στον τομέα των αγωγών φυσικού αερίου, τα κυρίαρχα σενάρια ατυχημάτων αφορούν διαρροές, ρήξεις, μηχανικές καταπονήσεις και αστοχίες υλικών, συχνά σε συνδυασμό με εξωτερικούς παράγοντες, όπως διάβρωση, σκαπτικές εργασίες κλπ. Παρότι και στη χημική βιομηχανία παρατηρούνται ανάλογα περιστατικά διαρροών, ο χαρακτήρας των εκλυόμενων ουσιών μπορεί να διαφέρει σημαντικά, περιλαμβάνοντας τοξικά, διαβρωτικά και αντιδραστικά χημικά, τα οποία παρουσιάζουν πολυδιάστατο κίνδυνο για το προσωπικό, τον πληθυσμό και το περιβάλλον. Επομένως, ενώ οι μηχανισμοί αστοχίας μπορεί να είναι εν μέρει παρόμοιοι, η επικινδυνότητα των ουσιών μεταβάλλεται σημαντικά από κλάδο σε κλάδο (Amir – Heidari et al., 2014; Hosseinnia Davatgar et al.,2021).

2.Συνέπειες ατυχημάτων

Τα ατυχήματα σε αγωγούς φυσικού αερίου χαρακτηρίζονται κυρίως από φαινόμενα θερμικής ακτινοβολίας, ταχείες αναφλέξεις, εκρήξεις και εκτεταμένους κραδασμούς. Παρά το υψηλό καταστροφικό δυναμικό τους, τα περιστατικά αυτά σπανίως συνοδεύονται από τοξικές εκπομπές μεγάλης κλίμακας, λόγω της σύστασης του φυσικού αερίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Αντιθέτως, σε χημικές και πετρελαϊκές εγκαταστάσεις είναι συχνότερη η απελευθέρωση ουσιών με τοξικές ή περιβαλλοντικά επιβαρυντικές ιδιότητες, γεγονός που αυξάνει τη χωρική και χρονική διάσταση των επιπτώσεων. Συνεπώς, ενώ οι αγωγοί εμφανίζουν υψηλή πιθανότητα άμεσων και εντοπισμένων καταστροφικών επιπτώσεων, άλλοι βιομηχανικοί κλάδοι ενδέχεται να προκαλέσουν πιο παρατεταμένες ή διασκορπισμένες επιβαρύνσεις (Vinnem, 2014 ; Kidnay et al.,2011).

3.Ρυθμιστικό και κανονιστικό πλαίσιο

Ο κλάδος της μεταφοράς φυσικού αερίου διέπεται από ιδιαίτερα εξειδικευμένους και συχνά αυστηρούς κανονισμούς, οι οποίοι σχετίζονται με την πίεση λειτουργίας, τα υλικά, τις διαδικασίες συγκόλλησης, τη διάβρωση και τις απαιτήσεις συνεχούς παρακολούθησης και επιθεωρήσεων. Αντίθετα, άλλοι κλάδοι υψηλού κινδύνου, όπως

η χημική βιομηχανία, καλύπτονται από ευρύτερα ρυθμιστικά πλαίσια που περιλαμβάνουν ένα μεγάλο φάσμα κινδύνων, λόγω της ποικιλίας των χημικών διεργασιών και των ιδιοτήτων των αποθηκευμένων ουσιών. Αυτή η διαφοροποίηση αντικατοπτρίζει τη διαφορετική φύση του κινδύνου. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι ο τομέας μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου παρουσιάζει μια ιδιαίτερη κατηγορία κινδύνων, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με τη γεωμετρία των δικτύων, τη συνεχή λειτουργία υπό πίεση και την ανάγκη για αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν κοινά στοιχεία με άλλους βιομηχανικούς κλάδους ως προς τις γενικές αρχές διαχείρισης κινδύνων, η φύση των πιθανών ατυχημάτων και οι λειτουργικές απαιτήσεις καθιστούν επιτακτική την εφαρμογή εξειδικευμένων πολιτικών πρόληψης και στοχευμένων τεχνικών μέτρων ασφάλειας. Τέτοια μέτρα περιλαμβάνουν προηγμένα συστήματα επιτήρησης προσδιορισμό ζωνών επικινδυνότητα, πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης και εφαρμογή ποσοτικών μεθόδων εκτίμησης κινδύνου, ειδικά προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες των αγωγών (ISO, 2018 ; Cen,2021; Smithers, 2022).

6.4 Ανάλυση των Αιτιών των Ατυχημάτων και Εφαρμογή

Διορθωτικών Μέτρων

Η διερεύνηση των αιτιών των ατυχημάτων στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη διασφάλιση της λειτουργικής ακεραιότητας των δικτύων και την αποτελεσματική εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου. Τα δίκτυα φυσικού αερίου χαρακτηρίζονται από μεγάλη γεωγραφική έκταση, λειτουργία υπό υψηλές και σημαντική τεχνική πολυπλοκότητα, στοιχεία που δημιουργούν μια σειρά από εν δυνάμει μηχανισμούς αστοχίας. Η συστηματική ανάλυση των αιτιών των ατυχημάτων επιτρέπει τον εντοπισμό των παραγόντων, την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων τους και την ανάπτυξη στοχευμένων διορθωτικών μέτρων που μειώνουν την πιθανότητα επανάληψης παρόμοιων περιστατικών (Kranikas & Weberm,2020 ; Reason,1997).

6.4.1 Κατηγοριοποίηση Αιτιών

Η διεθνής εμπειρία και η σχετική βιβλιογραφία αναδεικνύουν ότι τα ατυχήματα σε αγωγούς φυσικού αερίου προκύπτουν από ένα σύνολο διακριτών αλλά συχνά αλληλοεπιδρώντων αιτιών. Σύμφωνα με τα δεδομένα οργανισμών όπως οι PHMSA,

EGIG και OPS, οι αιτίες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε έξι βασικές κατηγορίες: εξωτερικές παρεμβάσεις, διάβρωση, κατασκευαστικά ελαττώματα και ζητήματα υλικών, μετακινήσεις εδάφους, ανθρώπινα λάθη και σύνθετες ή μη προσδιορίσιμες αιτίες. Η κατηγοριοποίηση αυτή αποτελεί θεμέλιο για την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας και την ανάπτυξη στοχευμένων στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου .

Οι **εξωτερικές παρεμβάσεις**, κυρίως σκαπτικές και κατασκευαστικές εργασίες αποτελούν διεθνώς τον συχνότερο παράγοντα πρόκλησης ζημιών σε υπόγειους αγωγούς. Τέτοιες παρεμβάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν ανεξέλεγκτες εκσκαφές, χρήση βαρέων μηχανημάτων ή εργοταξιακές δραστηριότητες χωρίς συντονισμό με τον φορέα λειτουργίας του δικτύου. Οι μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούν μπορούν να οδηγήσουν σε άμεση διάτρηση, δημιουργία εγχοπών, παραμορφώσεις ή μικρορωγμές, οι οποίες ενδέχεται να εξελιχθούν σε κρίσιμες αστοχίες με την πάροδο του χρόνου (Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 2016 ; Health Safety and Environment, 2005).

Η **διάβρωση**, είτε είναι εσωτερική είτε είναι εξωτερική, αποτελεί μία από τις πιο συχνές και κρίσιμες αιτίες υποβάθμισης της ακεραιότητας ενός αγωγού. Η εξωτερική διάβρωση σχετίζεται με τις ιδιότητες του εδάφους , ανεπαρκή καθοδική προστασία ή αστοχίες προστατευτικών επικαλύψεων, ενώ η εσωτερική προκύπτει από την παρουσία ακαθαρσιών, υγρασίας και διαβρωτικών αερίων στο μεταφερόμενο μίγμα. Πλήθος ερευνητικών εργασιών καταδεικνύουν ότι η διάβρωση μπορεί να οδηγήσει σε σταδιακή απώλεια πάχους τοιχώματος και σε αποτελεσματική μείωση της ικανότητας συγκράτησης πίεσης, αυξάνοντας την πιθανότητα ρήξης (Roberge, 1990; Hosseinnia Davatgar et al, 2021).

Κατασκευαστικά ελαττώματα και προβλήματα υλικών, περιλαμβάνουν αστοχίες συγκολλήσεων, ελαττώματα στον χάλυβα, ρωγμές κόπωσης και ατέλειες που εισήχθησαν κατά την κατασκευή, την μεταφορά ή την εγκατάσταση του αγωγού. Οι αστοχίες συγκόλλησης είναι συχνά αποτελέσματα ελλιπούς ποιοτικού ελέγχου, ακατάλληλων τεχνικών ή κακής επίβλεψης, ενώ αποτελούν κρίσιμη πηγή κινδύνου, ειδικά σε αγωγούς υψηλής πίεσης (Speight, 2018).

Όσο αναφορά τις **μετακινήσεις και την αστάθεια του εδάφους**, οι οποίες περιλαμβάνουν σεισμικές δονήσεις, καθιζήσεις, εδαφικές αστοχίες, διαβρώσεις πρηνών και μετακινήσεις λόγω υπόγειων υδάτων. Σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα,

όπως η Ελλάδα, τα φαινόμενα αυτά μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές καταπονήσεις, κάμψη ή στρέψη των αγωγών. Ακόμη και μικρές μετακινήσεις μπορεί με την πάροδο του χρόνου =, να οδηγήσουν σε κόπωση, ρωγμές ειδικά στα σημεία συνδεσμολογίας.

Τα **ανθρώπινα λάθη** αποτελούν αιτία που διαπερνά όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός αγωγού, από τον σχεδιασμό και την κατασκευή έως την συντήρηση και λειτουργία. Παραδείγματα περιλαμβάνουν λανθασμένες ρυθμίσεις συστημάτων πίεσης, παραλείψεις κατά τις επιθεωρήσεις, ανεπαρκή εφαρμογή τεχνικών προδιαγραφών και υποτίμηση προειδοποιητικών ενδείξεων. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, η έκταση των συνέπειών των ανθρώπινων λαθών αποδίδεται συχνά σε έλλειψη εκπαίδευσης, ανεπαρκή κουλτούρα ασφάλειας ή μη επαρκώς τεκμηριωμένες διαδικασίες λειτουργίας (Reason,1990; Hollnagel,2014 ; Dekker,2011).

Ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό περιστατικών οφείλεται σε άγνωστες ή σύνθετες αιτίες, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της πρωταρχικής αιτίας, είτε λόγω έλλειψης δεδομένων είτε λόγω συνδυασμού πολλών παραγόντων. Τέτοια περιστατικά συνήθως ευνοούνται από ένα πλαίσιο πολλαπλών αλληλεπιδράσεων, τεχνικών ανθρωπίνων και περιβαλλοντικών.

Συνοψίζοντας, η κατηγοριοποίηση αυτών των αιτιών ατυχημάτων στους αγωγούς φυσικού αερίου καταδεικνύει ότι τα ατυχήματα δεν προκύπτουν συνήθως από έναν μόνο παράγοντα αλλά από ένα σύνολο αλληλοεπιδρώντων μηχανισμών. Η κατανόηση της φύσης και της συχνότητας των επιμέρους κατηγοριών αποτελεί καθοριστική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών πρόληψης, για την επιλογή κατάλληλων τεχνολογιών παρακολούθησης και για την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης κουλτούρας ασφάλειας στα συστήματα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου.

6.4.2 Διορθωτικά Μέτρα

Η εφαρμογή διορθωτικών μέτρων στον τομέα της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου αποτελεί κρίσιμο στάδιο στη διαχείριση της ασφάλειας, καθώς στοχεύει στη μείωση της πιθανότητας επανάληψης ατυχημάτων και στον περιορισμό των συνεπειών τους. Τα διορθωτικά μέτρα προκύπτουν από τη συστηματική ανάλυση των αιτιών των ατυχημάτων και υιοθετούν μια πολυδιάστατη προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει

τεχνικές διαδικαστικές, οργανωσιακές, κανονιστικές παρεμβάσεις καθώς και μέτρα διαχείρισης κρίσεων (Stolzer & Goglia, 2015; Snyder, 2015).

Τεχνικά Μέτρα

Τα τεχνικά διορθωτικά μέτρα επικεντρώνονται στη βελτίωση της ακεραιότητας και της αξιοπιστίας των υποδομών μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Η ενίσχυση της αντοχής των αγωγών μέσω της χρήσης προηγμένων υλικών, ανθεκτικών στη διάβρωση και στη μηχανική καταπόνηση, μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο διαρροών και θραύσεων. Παράλληλα, η εγκατάσταση αισθητήρων ανίχνευσης διαρροών και συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση ανωμαλιών στη λειτουργία του δικτύου. Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η χρήση αυτόματων βαλβίδων απομόνωσης (automatic shut off valves), οι οποίες ενεργοποιούνται άμεσα σε περίπτωση έκτακτου συμβάντος, περιορίζοντας τη διασπορά του φυσικού αερίου και τις ενδεχόμενες επιπτώσεις σε ανθρώπινες ζωές, το περιβάλλον και τις υποδομές (Devold, 2013; Gao et al., 2020).

Διαδικαστικά Μέτρα

Τα διαδικαστικά διορθωτικά μέτρα αφορούν την καθιέρωση σαφών και τυποποιημένων πρωτοκόλλων εργασίας, τα οποία διασφαλίζουν την ομοιόμορφη και ασφαλή εκτέλεση των δραστηριοτήτων. Η εφαρμογή συστημάτων αδειοδότησης εργασιών (permit to work) αποτελεί βασικό εργαλείο ελέγχου επικίνδυνων εργασιών, όπως οι παρεμβάσεις σε ενεργούς αγωγούς και οι εργασίες συντήρησης σε περιοχές υψηλού κινδύνου. Επιπλέον, η διενέργεια τακτικών επιθεωρήσεων και ελέγχων συντήρησης συμβάλλει στον έγκαιρο εντοπισμό φθορών, αποκλίσεων από πρότυπα και πιθανών αστοχιών, μειώνοντας την πιθανότητα αιφνίδιων ατυχημάτων (Center of Chemical Process Safety, 2010; ΕΛΙΝΥΑΕ, 2021).

Οργανωτικά Μέτρα

Τα οργανωτικά μέτρα επικεντρώνονται στον ανθρώπινο παράγοντα, ο οποίος συχνά αποτελεί καθοριστική αιτία ατυχημάτων. Η συστηματική εκπαίδευση και επανεκπαίδευση του προσωπικού σε θέματα ασφαλείας, τεχνικών διαδικασιών και διαχείρισης έκτακτων περιστατικών ενισχύει την ικανότητα πρόληψης και αποτελεσματικής αντίδρασης. Παράλληλα, η ανάπτυξη και ενίσχυση μιας ισχυρής κουλτούρας ασφαλείας προάγει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα και ενθαρρύνει την

υπεύθυνη συμπεριφορά σε όλα τα επίπεδα του οργανισμού. Ιδιαίτερη σημασία έχει η καθιέρωση συστημάτων αναφοράς συμβάντων και σχεδόν ατυχημάτων, τα οποία επιτρέπουν την άντληση πολύτιμων πληροφοριών και τη λήψη προληπτικών μέτρων πριν την εκδήλωση σοβαρών ατυχημάτων (Schein,2010; Zohar,2010; Flin et al.,2008).

Κανονιστικά Μέτρα

Τα κανονιστικά μέτρα αφορούν θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη λειτουργία των δικτύων φυσικού αερίου. Η ενίσχυση της εποπτείας από τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές μέσω συχνότερων ελέγχων και αυστηρότερων απαιτήσεων συμμόρφωσης, συμβάλλει στη βελτίωση του επιπέδου ασφάλειας. Παράλληλα, η περιοδική αναθεώρηση και επικαιροποίηση των πρότυπων ασφάλειας, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές εξελίξεις και τα διδάγματα από προηγούμενα ατυχήματα, διασφαλίζει ότι το κανονιστικό πλαίσιο παραμένει αποτελεσματικό και προσαρμοσμένο στις σύγχρονες συνθήκες λειτουργίας (European Commission,2023).

Μέτρα Διαχείρισης Κρίσεων

Η διαχείριση κρίσεων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των διορθωτικών μέτρων, καθώς στοχεύει στον περιορισμό των επιπτώσεων ενός ατυχήματος όταν αυτό εκδηλωθεί. Η εκπόνηση και τακτική επικαιροποίηση σχεδίων έκτακτης ανάγκης επιτρέπει την άμεση και συντονισμένη αντίδραση σε περιπτώσεις διαρροών ή εκρήξεων. Οι ασκήσεις προσομοίωσης συμβάντων συμβάλλουν στην εξοικείωση του προσωπικού με τα πρωτόκολλα αντιμετώπισης και στην αξιολόγηση της επιχειρησιακής ετοιμότητας. Επιπλέον, η στενή συνεργασία με τις τοπικές αρχές. Επιπλέον, η στενή συνεργασία με τις τοπικές αρχές και τις υπηρεσίες πολιτικής προστασίας ενισχύει την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης κρίσεων και τη συνολική ανθεκτικότητα του συστήματος (Jabbari et al.,2021).

Κεφάλαιο 7: Σύγχρονες Τεχνολογίες και καινοτομίες στον Τομέα της Ασφάλειας

7.1 Χρήση Τεχνολογιών για την Πρόληψη Ατυχημάτων

7.1.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Ευφυή Συστήματα Παρακολούθησης

Η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στην πρόληψη ατυχημάτων συνιστά μία από τις πλέον ραγδαία εξελισσόμενες τεχνολογικές κατευθύνσεις στη σύγχρονη βιομηχανία ενέργειας και ειδικότερα στον τομέα της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ενεργειακών συστημάτων, σε συνδυασμό με τις αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας και αξιοπιστίας, καθιστά αναγκαία τη μετάβαση από παραδοσιακές, αντιδραστικές προσεγγίσεις ασφάλειας σε προληπτικά και προγνωστικά μοντέλα διαχείρισης κινδύνου. Σε αυτό το πλαίσιο, τα συστήματα TN προσφέρουν τη δυνατότητα ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων και την έγκαιρη αναγνώριση πιθανών δυσλειτουργιών και επικίνδυνων καταστάσεων (Gao et al.,2020; li et al.,2024; Zhu et al., 2023).

Συγκεκριμένα, τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να ενσωματωθούν με εκτεταμένα δίκτυα αισθητήρων για τη συνεχή και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων, όπως η πίεση, η ροή, η θερμοκρασία και οι μηχανικές δονήσεις των αγωγών. Μέσω προηγμένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης, τα δεδομένα αυτά αναλύονται ώστε να εντοπίζονται αποκλίσεις από τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι μεταβολές είναι ανεπαίσθητες για τις συμβατικές μεθόδους ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται σημαντικά η ανάγκη για χειροκίνητες επιθεωρήσεις, οι οποίες συχνά είναι χρονοβόρες, δαπανηρές και ενδέχεται να εκθέτουν το προσωπικό σε επικίνδυνες συνθήκες, ενώ παράλληλα περιορίζεται η πιθανότητα ανθρώπινου σφάλματος (Zhang et al., 2025; Wang et al.2025 ;Tracklynk Report).

Η προγνωστική ικανότητα των συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση φαινομένων όπως η σταδιακή υποβάθμιση υλικών, η διάβρωση, η υπερπίεση ή η μη κανονική συμπεριφορά της ροής, προτού αυτά εξελιχθούν σε σοβαρά συμβάντα και ατυχήματα. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, η αξιοποίηση

τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα υγείας και ασφάλειας, φτάνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις έως και το 80% μέσω πρόληψης δυνητικών απειλών πριν αυτές εκδηλωθούν ως πραγματικά περιστατικά, όπως διαρροές φυσικού αερίου και αστοχίες εξοπλισμού (Gupta et al., 2024; Patel et al., 2024; Lu et al., 2025).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών ΤΝ στον τομέα της ασφάλειας αποτελεί η συνδυασμένη χρήση διάχυτων οπτικών συστημάτων ανίχνευσης (distributed optical sensing) και αλγορίθμων βαθιάς μάθησης επιτρέπει την αυτόματη ταξινόμηση και αξιολόγηση των συμβάντων, διακρίνοντας με υψηλή ακρίβεια τις πραγματικές απειλές από αβλαβείς εξωτερικές παρεμβάσεις ή από τον περιβάλλοντα θόρυβο.

Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των ψευδών συναγερμών, οι οποίοι αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στα παραδοσιακά συστήματα ανίχνευσης και ενισχύει τη συνολική αξιοπιστία και ανθεκτικότητα των συστημάτων μεταφοράς και ενέργειας. Επιπλέον, η αυτοματοποιημένη ανάλυση δεδομένων επιτρέπει την ταχύτερη λήψη αποφάσεων και τη στοχευμένη ενεργοποίηση διορθωτικών μέτρων, ενισχύοντας την προληπτική φιλοσοφία ασφάλειας και μειώνοντας τον κίνδυνο σοβαρών βιομηχανικών ατυχημάτων.

7.1.2 Αισθητήρες και Τεχνολογίες Ανίχνευσης

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των αισθητήρων έχει επιφέρει ουσιαστικές βελτιώσεις στον τομέα της ασφάλειας των δικτύων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, ενισχύοντας σημαντικά τις δυνατότητες πρόληψης και έγκαιρης ανίχνευσης ατυχημάτων. Οι σύγχρονες τεχνολογίες ανίχνευσης βασίζονται στη συνεχή συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων από κρίσιμες λειτουργικές παραμέτρους, επιτρέποντας τη μετάβαση από περιοδικούς ελέγχους σε συστήματα συνεχούς παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Οι προηγμένοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι σε θέση να ανιχνεύουν ακόμη και πολύ μικρές αποκλίσεις από τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας των αγωγών, όπως μεταβολές στην πίεση, στη ροή, στη θερμοκρασία και στις μηχανικές δονήσεις. Η υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια αυτών των αισθητήρων επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό φαινομένων όπως μικροδιαρροές, αρχικά στάδια

διάβρωσης, μηχανικές καταπονήσεις, παρεμβάσεις τρίτων, πριν αυτά εξελιχθούν σε σοβαρά συμβάντα. Ακόμη, η δυνατότητα διασύνδεσης των αισθητήρων με κεντρικά πληροφοριακά συστήματα ελέγχου συμβάλλει στη δημιουργία ολοκληρωμένων πλαισίων επιτήρησης της ακεραιότητας των αγωγών (Kumar et al., 2025, Liu et al., 2020; Rusin et al., 2021).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν οι τεχνολογίες διάχυτης ακουστικής ανίχνευσης (Distributed Acoustic Sensing), οι οποίες αξιοποιούν οπτικές ίνες εγκατεστημένες κατά μήκος των αγωγών για την καταγραφή ακουστικών σημάτων και δονήσεων σε συνεχή βάση. Η τεχνολογία DAS επιτρέπει την ακριβή χωρική και χρονική απεικόνιση των μηχανικών διαταραχών που εμφανίζονται στο σύστημα, προσφέροντας τη δυνατότητα άμεσου εντοπισμού ανωμαλιών όπως διαρροές, παράνομες εκσκαφές και δομικές αστοχίες. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους ανίχνευσης, οι οποίες συχνά βασίζονται σε σημειακές μετρήσεις, το DAS παρέχει συνεχή κάλυψη μεγάλων αποστάσεων, αυξάνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητα της επιτήρησης (Tsochtzidi & tzochatzidis, 2023 ; Ye et al., 2022; Bakolas & Stylios, 2020).

Παράλληλα, οι έξυπνοι αισθητήρες πίεσης και ροής διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας των δικτύων φυσικού αερίου. Οι αισθητήρες αυτοί, συχνά ενσωματωμένοι σε ευφυή συστήματα ανάλυσης δεδομένων, μπορούν να ανιχνεύσουν ασυνήθιστα πρότυπα λειτουργίας και να ενεργοποιήσουν αυτοματοποιημένους μηχανισμούς ειδοποίησης και προστασίας. Η αξιοποίηση αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και μηχανικής μάθησης επιτρέπει την καλύτερη διάκριση μεταξύ πραγματικών κινδύνων και ψευδών συναγερμών, βελτιώνοντας την αξιοπιστία των συστημάτων ανίχνευσης.

Συμπληρωματικά προς τις τεχνολογίες αισθητήρων, τα συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) αποτελούν βασικό πυλώνα της σύγχρονης διαχείρισης και ασφάλειας των δικτύων. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη διαχείριση κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στους χειριστές πλήρη εικόνα της κατάστασης του συστήματος. Μέσω SCADA, είναι δυνατή η άμεση λήψη αποφάσεων και η ενεργοποίηση διορθωτικών ενεργειών, όπως η απομόνωση τμημάτων του δικτύου, η ρύθμιση της πίεσης, σε περίπτωση ανίχνευσης επικίνδυνων καταστάσεων.

Η ολοκληρωμένη χρήση αισθητήρων σε συνδυασμό με συστήματα SCADA ενισχύει τη συνολική αξιοπιστία, διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα των δικτύων μεταφοράς φυσικού αερίου. Η αυτοματοποίηση της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων μειώνει την εξάρτηση από ανθρώπινες παρεμβάσεις και περιορίζει την έκθεση του προσωπικού σε επικίνδυνες συνθήκες εργασίας, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της υγείας και ασφάλειας στον εργασιακό χώρο. Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες αισθητήρων και ανίχνευσης αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο της σύγχρονης στρατηγικής πρόληψης ατυχημάτων στον τομέα φυσικού αερίου (Nguyen et al., 2025 ; ΔΕΣΦΑ, 32023; PAEYY, 2024).

7.1.3 Τεχνολογίες Γεωπροσδιορισμού και Χαρτογράφησης

Οι τεχνολογίες γεωπροσδιορισμού και χαρτογράφησης αποτελούν κρίσιμο εργαλείο για τη διαχείριση της ασφάλειας και της ακεραιότητας των δικτύων, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη αστική ανάπτυξη ή σύνθετα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Η ακριβής χωρική αποτύπωση των αγωγών και των συναφών εγκαταστάσεων συμβάλλει ουσιαστικά στην πρόληψη ατυχημάτων, στη μείωση των κινδύνων τρίτων και στη βελτιστοποίηση της συντήρησης των υποδομών.

Στον ευρωπαϊκό χώρο, οι Διαχειριστές Συστημάτων Μεταφοράς Φυσικού Αερίου αξιοποιούν εκτεταμένα συστήματα σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών για τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών υψηλής ακρίβειας. Οι χάρτες αυτοί περιλαμβάνουν λεπτομερή δεδομένα για τη θέση, το βάθος τοποθέτησης, το υλικό και την ηλικία των αγωγών, καθώς και για τις περιβαλλοντικές και γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού δικτύου ENTSOG, η εναρμόνιση των γεωχωρικών δεδομένων επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση διασυνοριακών αγωγών και την ανταλλαγή κρίσιμων πληροφοριών για την ασφάλεια και την επιχειρησιακή συνέχεια των δικτύων (PAEYY, 2024; ΔΕΣΦΑ, 2024; ENTSOG, 2023).

Στην Ελλάδα ο Διαχειριστής του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ) έχει αναπτύξει ολοκληρωμένα συστήματα GIS για την αποτύπωση και παρακολούθηση του εθνικού δικτύου αγωγών υψηλής πίεσης. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν δεδομένα γεωπροσδιορισμού από GNSS και συνδέονται με πληροφορίες λειτουργικής κατάστασης, επιθεωρήσεων και συντήρησης. Μέσω της χρήσης ψηφιακών χαρτών, διευκολύνεται ο εντοπισμός περιοχών υψηλού κινδύνου,

όπως τμήματα αγωγών που διέρχονται από σεισμογενείς ζώνες, περιοχές με έντονη διάβρωση εδάφους και περιοχές με αυξημένη ανθρώπινη δραστηριότητα (Κελεπερτζής, 2019; Μπαλτατζής, 2018; Chen et al., 2024).

Παράλληλα, η εφαρμογή τεχνολογιών γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) έχει αξιοποιηθεί τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε ελληνικό επίπεδο για τον μη επεμβατικό εντοπισμό υπόγειων αγωγών και την επιβεβαίωση της ακριβούς θέσης τους πριν από την εκτέλεση τεχνικών έργων. Στον ελληνικό αστικό χώρο, όπου συχνά συνυπάρχουν παλαιές και νεότερες υποδομές με ελλιπή τεκμηρίωση, η χρήση GPR έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη για την πρόληψη ατυχημάτων που σχετίζονται με εκσκαφές κοντά σε ενεργούς αγωγούς φυσικού αερίου. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει επίσης την ανίχνευση ανωμαλιών στο υπέδαφος, όπως κενά ή αλλαγές στη σύσταση του εδάφους, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν τη μηχανική σταθερότητα των αγωγών.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αντιμετώπιση των κινδύνων τρίτων, που αποτελούν μία από τις συχνότερες αιτίες βλάβης και ατυχήματος στα δίκτυα φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Στο πλαίσιο αυτό, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο, έχουν αναπτυχθεί ψηφιακές πλατφόρμες ενημέρωσης και πρόληψης, μέσω των οποίων εργολάβοι και τεχνικές εταιρείες μπορούν να ενημερώνονται για την ύπαρξη υπογείων αγωγών πριν από την έναρξη εκσκαφών. Στην Ελλάδα, αντίστοιχες πρακτικές εφαρμόζονται σε συνεργασία με τον ΔΕΣΦΑ και τις εταιρείες Διανομής Φυσικού Αερίου, συμβάλλοντας στη μείωση των περιστατικών πρόκλησης ζημιών στους αγωγούς.

Η ολοκληρωμένη αξιοποίηση τεχνολογιών γεωπροσδιορισμού και χαρτογράφησης, σε συνδυασμό με δεδομένα από αισθητήρες λειτουργικής παρακολούθησης και συστήματα SCADA, επιτρέπει τη συνολική εκτίμηση κινδύνων και τη λήψη έγκαιρων διορθωτικών μέτρων. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη μετάβαση προς ένα προληπτικό και βασισμένο σε δεδομένα μοντέλο διαχείρισης ασφάλειας, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας των υποδομών φυσικού αερίου στον ευρωπαϊκό και ελληνικό χώρο.

7.2 Νέες Τάσεις στην Ασφάλεια των Εργαζομένων στον Τομέα Φυσικού Αερίου

Η διαρκής εξέλιξη του τομέα του φυσικού αερίου, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των τεχνολογικών υποδομών και των εργασιακών

διαδικασιών έχει καταστήσει την ασφάλεια των εργαζομένων κεντρικό άξονα στρατηγικού σχεδιασμού για τις επιχειρήσεις του κλάδου. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις εκπαίδευσης και πρόληψης ατυχημάτων, αν και παραμένουν σημαντικές, δεν επαρκούν πλέον για την αντιμετώπιση των σύγχρονων κινδύνων που σχετίζονται με τη μεταφορά, αποθήκευση και διανομή φυσικού αερίου.

Στο πλαίσιο αυτό, αναδύονται νέες τάσεις που αξιοποιούν τις ψηφιακές τεχνολογίες, την ανάλυση δεδομένων και τις καινοτόμες εκπαιδευτικές μεθόδους, με στόχο την ενίσχυση της κουλτούρας ασφάλειας και τη μείωση των επαγγελματικών κινδύνων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συνεχή εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού, στην προληπτική αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων και στη βελτίωση της αντιμετώπισης εκτάκτων συμβάντων.

7.2.1 Αυξημένη Χρήση Ψηφιακών Εκπαιδευτικών Πλατφορμών

Η εκπαίδευση των εργαζομένων αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τη διασφάλιση της υγείας και της ασφάλειας στον τομέα του φυσικού αερίου, δεδομένου ότι οι εργασίες συχνά πραγματοποιούνται σε περιβάλλον υψηλού κινδύνου. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένη αξιοποίηση ψηφιακών εκπαιδευτικών Πλατφορμών, οι οποίες προσφέρουν καινοτομίες λύσεις στη διαδικασία κατάρτισης και επιμόρφωσης του προσωπικού.

Οι σύγχρονες αυτές πλατφόρμες επιτρέπουν την ανάπτυξη διαδραστικών σεμιναρίων ασφάλειας, εικονικών περιβαλλόντων εκπαίδευσης και διαδικτυακών εφαρμογών μάθησης, οι οποίες ενισχύουν την ενεργό συμμετοχή των εργαζομένων. Μέσω της χρήσης προσομοιώσεων πραγματικών συνθηκών εργασίας, οι εργαζόμενοι έχουν την δυνατότητα να εξοικειωθούν με επικίνδυνα σενάρια χωρίς να εκτίθενται σε πραγματικό κίνδυνο (Jabbari et al., 2022; ELINYAE, 2021; Burke et al., 2006).

Ιδιαίτερα αποτελεσματική θεωρείται η εφαρμογή μεθόδων «role play» και σεναρίων κρίσης, όπου οι συμμετέχοντες καλούνται να λάβουν αποφάσεις σε συνθήκες πίεσης, όπως διαρροές φυσικού αερίου, πυρκαγιές και βλάβες σε δίκτυα διανομής. Η πρακτική αυτή συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της αντίληψης κινδύνου, της ταχύτητας αντίδρασης και της ορθής εφαρμογής των πρωτοκόλλων ασφάλειας. Παράλληλα, οι ψηφιακές πλατφόρμες προσφέρουν τη δυνατότητα εξατομικευμένης εκπαίδευσης, προσαρμοσμένης στο επίπεδο γνώσεων, την ειδικότητα και την εμπειρία

κάθε εργαζόμενο. Η συνεχής αξιολόγηση της απόδοσης μέσω ψηφιακών εργαλείων επιτρέπει τον εντοπισμό γνωστικών κενών και την άμεση ανατροφοδότηση, ενισχύοντας τη δια βίου μάθηση στον εργασιακό χώρο (Oude-Hengel et al., 2019; ΕΛΙΝΥΑΕ, 2020).

Συνολικά η ενσωμάτωση ψηφιακών εκπαιδευτικών πλατφορμών στον τομέα του φυσικού αερίου αποτελεί κρίσιμη εξέλιξη για τη βελτίωση των επιπέδων ασφάλειας, καθώς συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία με την πρακτική εκπαίδευση, συμβάλλοντας στη δημιουργία ενός πιο ασφαλούς και ανθεκτικού εργασιακού περιβάλλοντος.

7.2.2 Wearable Τεχνολογίες και Βιομετρική Παρακολούθηση

Η ραγδαία πρόοδος των ψηφιακών τεχνολογιών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και ευρεία εφαρμογή φορητών συσκευών στον τομέα της επαγγελματικής ασφάλειας, ιδίως σε βιομηχανικούς κλάδους υψηλού κινδύνου, όπως ο τομέας του φυσικού αερίου. Οι wearable τεχνολογίες αποτελούν ένα καινοτόμο εργαλείο πρόληψης, καθώς επιτρέπουν τη συνεχή και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση τόσο των φυσιολογικών παραμέτρων των εργαζομένων όσο και των περιβαλλοντικών συνθηκών εργασίας.

Οι συσκευές αυτές ενσωματώνονται συνήθως σε κράνη, γιλέκα, ρολόγια και είναι σε θέση να καταγράφουν ζωτικά σημεία, όπως καρδιακό ρυθμό, θερμοκρασία σώματος, επίπεδα κόπωσης και στάση σώματος. Παράλληλα, μέσω των αισθητήρων περιβάλλοντος, μπορούν να ανιχνεύσουν επικίνδυνες καταστάσεις, όπως υπερβολικά υψηλές ή χαμηλές αντίστοιχα θερμοκρασίες, απότομες πτώσεις, μειωμένα επίπεδα οξυγόνου και έκθεση σε επικίνδυνα αέρια που σχετίζονται με τη διαχείριση και διανομή του φυσικού αερίου (Mohsin et al., 2022; Bakolas & Stylios, 2020; Εγκύκλιος Υπουργείου Εργασίας, 2018).

Η συλλογή και η ανάλυση των δεδομένων αυτών επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση συνθηκών που ενδέχεται να οδηγήσουν σε εργατικό ατύχημα, σε σοβαρή επιβάρυνση της υγείας του εργαζομένου. Σε περιπτώσεις που εντοπίζονται κρίσιμες αποκλίσεις από τα επιτρεπτά όρια, τα συστήματα μπορούν να αποστείλουν άμεσες ειδοποιήσεις τόσο στον ίδιο τον εργαζόμενο όσο και στους υπεύθυνους ασφάλειας, διευκολύνοντας την άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται σημαντικά ο χρόνος αντίδρασης σε περιστατικά έκτακτης ανάγκης και αυξάνεται η

πιθανότητα αποφυγής σοβαρών συνεπειών. Επιπλέον, η αξιοποίηση wearable τεχνολογιών συμβάλλει στη βελτίωση των πρωτοκόλλων υγείας και ασφάλειας, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μακροπρόθεσμη ανάλυση κινδύνων και την αναθεώρηση των διαδικασιών εργασίας. Η συστηματική καταγραφή βιομετρικών και περιβαλλοντικών πληροφοριών προσφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού επαναλαμβανομένων μοτίβων επικινδυνότητας, επιτρέποντας τη μετάβαση από μία αντιδραστική σε μία προληπτική προσέγγιση ασφάλειας (Mohsin et al., 2022; Bakolas & Stylios, 2020; Εγκύκλιος Υπουργείου Εργασίας, 2018).

Ωστόσο, η εφαρμογή των wearable τεχνολογιών εγείρει και ζητήματα που σχετίζονται με την προστασία των προσωπικών δεδομένων και την δεοντολογία της βιομετρικής παρακολούθησης. Για τον λόγο αυτό, η υιοθέτηση τους απαιτεί σαφές θεσμικό πλαίσιο, διαφάνεια στη χρήση των δεδομένων και συμμόρφωση με τις ισχύουσες κανονιστικές ρυθμίσεις περί προστασίας προσωπικών δεδομένων. Παρά τις προκλήσεις αυτές η ενσωμάτωση φορητών συσκευών στον τομέα αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία ενός πιο ασφαλούς, ελεγχόμενου και τεχνολογικά υποστηριζόμενου εργασιακού περιβάλλοντος (**General Data Protection Regulation - GDPR**) (Yuan et al., 2021; ISO, 2018; Smithers, 2022).

7.3 Αυτοματισμός και Ρομποτική για τη Μείωση των Κινδύνων

Ο τομέας της μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου συγκαταλέγεται στους πλέον απαιτητικούς από πλευράς υγείας και ασφάλειας στην εργασία, λόγω της διαχείρισης εύφλεκτων ουσιών, της λειτουργίας εγκαταστάσεων υψηλής πίεσης και της ανάγκης εργασιών σε δυσπρόσιτους χώρους. Οι κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, εκρήξεις διαρροές αερίου, ασφυξία καθώς και μηχανικά ατυχήματα.

Σε αυτό το πλαίσιο, ο αυτοματισμός και η ρομποτική συνιστούν βασικούς άξονες τεχνολογικής εξέλιξης με άμεσο αντίκτυπο στη βελτίωση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των συστημάτων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Η αξιοποίηση αυτόνομων και ημιαυτόνομων ρομποτικών συστημάτων επιτρέπει την εκτέλεση κρίσιμων λειτουργιών, όπως η επιθεώρηση, η παρακολούθηση και η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, με υψηλό βαθμό ακρίβειας και μειωμένο κίνδυνο για το ανθρώπινο δυναμικό.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι εφαρμογές ρομποτικής που σχετίζονται με την επιθεώρηση των αγωγών φυσικού αερίου, καθώς οι αγωγοί αποτελούν τον βασικό κορμό των δικτύων και η αστοχία τους μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά ατυχήματα. Η ανάγκη για συνεχή έλεγχο της δομικής τους ακεραιότητας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εξειδικευμένων ρομποτικών συστημάτων ικανών να λειτουργούν στο εσωτερικό των σωληνώσεων, συλλέγοντας κρίσιμα δεδομένα για την κατάσταση των υλικών και εντοπίζοντας έγκαιρα πιθανές βλάβες.

7.3.1 Ρομπότ Επιθεώρησης Σωληνώσεων

Η ανάπτυξη και η αξιοποίηση ρομποτικών συστημάτων για την εσωτερική επιθεώρηση σωληνώσεων συνιστούν μία από τις πλέον καθοριστικές τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των δικτύων μεταφοράς και διαμονής φυσικού αερίου. Οι αγωγοί φυσικού αερίου χαρακτηρίζονται από μεγάλο μήκος, πολύπλοκη γεωμετρία και συχνά δύσκολη πρόσβαση, γεγονός που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους επιθεώρησης όχι μόνο χρονοβόρες και οικονομικά απαιτητικές, αλλά δυνητικά επικίνδυνες για το ανθρώπινο δυναμικό. Στο πλαίσιο αυτό τα ρομπότ επιθεώρησης αποτελούν μια τεχνολογικά προηγμένη λύση που επιτρέπει τη συστηματική και ασφαλή αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των σωληνώσεων.

Τα σύγχρονα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης είναι σχεδιασμένα ώστε να μπορούν να κινούνται αυτόνομα ή ημιαυτόνομα στο εσωτερικό αγωγών, προσαρμοζόμενα σε μεταβολές της διαμέτρου, καμπύλες, κλίσεις όπως αισθητήρες υπερήχων, αισθητήρες μαγνητικής ροής, οπτικές κάμερες υψηλής ανάλυσης και συστήματα λέιζερ, οι οποίοι επιτρέπουν τη λεπτομερή καταγραφή φαινομένων διάβρωσης, ρωγμών, αποκολλήσεων επιστρώσεων και μηχανικών παραμορφώσεων. Η συλλογή αυτών των δεδομένων παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την κατάσταση των αγωγών και υποστηρίζει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων συντήρησης (Sun & Wang, 2021; Xu et al., 2025; IEEE, 2022).

Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στα ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης ενισχύει σημαντικά την επιχειρησιακή τους αξία. Μέσω τεχνικών αυτόνομης πλοήγησης και ανάλυσης δεδομένων, τα ρομπότ μπορούν να αναγνωρίζουν πρότυπα φθοράς, να ταξινομούν τις ανωμαλίες με βάση τη σοβαρότητα τους και να υποστηρίζουν προγνωστικά μοντέλα συντήρησης. Με τον

τρόπο αυτό, η επιθεώρηση μετατρέπεται από μία αποσπασματική διαδικασία σε ένα συνεχές και βασισμένο σε δεδομένα σύστημα διαχείρισης της ακεραιότητας των αγωγών.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εκτεταμένη χρήση «έξυπνων rig» από τους Διαχειριστές μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, όπως οι TSOs της Γερμανίας, της Ιταλίας και της Γαλλίας. Τα συστήματα αυτά είναι ειδικά ρομποτικά μέσα που κινούνται εντός των αγωγών με τη ροή του αερίου και πραγματοποιούν λεπτομερή καταγραφή της εσωτερικής κατάστασης των σωληνώσεων σε μεγάλες αποστάσεις. Η αξιοποίηση του έχει συμβάλει σημαντικά στη μείωση αιφνίδιων αστοχιών και στη βελτιστοποίηση των προγραμμάτων συντήρησης, ιδιαίτερα σε παλαιότερα τμήματα του δικτύου ((EGIG, 2023·; ΔΕΣΦΑ, 2023; Asprofos, 2014).

Στον ελληνικό χώρο ο ΔΕΣΦΑ έχει ενσωματώσει σύγχρονες τεχνολογίες εσωτερικής επιθεώρησης στο πλαίσιο της στρατηγικής διαχείρισης ακεραιότητας του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Φυσικού Αερίου. Η χρήση ρομποτικών συστημάτων και έξυπνων εργαλείων επιθεώρησης επιτρέπει την περιοδική αξιολόγηση κρίσιμων αγωγών υψηλής πίεσης, μειώνοντας την ανάγκη για εκτεταμένες διακοπές λειτουργίας και περιορίζοντας την έκθεση του προσωπικού σε επικίνδυνες συνθήκες εργασίας.

Επιπλέον σε διεθνές επίπεδο, αναπτύσσονται προηγμένα ρομποτικά συστήματα ικανά να λειτουργούν σε αγωγούς με περιορισμένη ή μηδενική ροή, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς αρθρωτής κίνησης. Τέτοια ρομπότ εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου η παραδοσιακή επιθεώρηση με «rigging» δεν είναι εφικτή, όπως σε πολύπλοκα αστικά δίκτυα και σε αγωγούς μικρής διαμέτρου.

Η χρήση ρομπότ επιθεώρησης συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των κινδύνων για τους εργαζόμενους, καθώς περιορίζει την ανάγκη εισόδου σε περιορισμένους χώρους και την έκθεση σε περιβάλλοντα με πιθανή παρουσία φυσικού αερίου. Παράλληλα, ενισχύει τη μετάβαση προς προληπτικά και προγνωστικά μοντέλα ασφάλειας, βελτιώνοντας τη συνολική ανθεκτικότητα και βιωσιμότητα των υποδομών φυσικού αερίου.

7.3.2 Αυτόνομη Επιθεώρηση με Μηχανική Μάθηση

Η αυτόνομη επιθεώρηση υποδομών με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες και δυναμικά αναπτυσσόμενες προσεγγίσεις στον τομέα της ασφάλειας των δικτύων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Η προσέγγιση αυτή ανταποκρίνεται στην ανάγκη μετάβασης από παραδοσιακά, αντιδραστικά μοντέλα επιθεώρησης σε προληπτικά και προγνωστικά συστήματα διαχείρισης της ακεραιότητας των αγωγών, τα οποία βασίζονται στη συνεχή ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας.

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αξιοποιούνται για την επεξεργασία δεδομένων που συλλέγονται από ρομποτικά συστήματα επιθεώρησης, αισθητήρες υπερήχων, μαγνητικής διαρροής ροής, οπτικές κάμερες και συστήματα παρακολούθησης λειτουργικών παραμέτρων. Μέσω εποπτευόμενων τεχνικών μάθησης, τα μοντέλα εκπαιδεύονται σε ιστορικά δεδομένα επιθεωρήσεων ώστε να αναγνωρίζουν πρότυπα φθοράς, διάβρωσης και ρωγμών, ενώ τεχνικές μη εποπτευόμενης μάθησης εφαρμόζονται για την ανίχνευση ανωμαλιών σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα πραγματικών αστοχιών είναι περιορισμένα.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αυτόνομη επιθεώρηση διαδραματίζουν οι αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης. Νευρωνικά δίκτυα τύπου convolutional neural networks, χρησιμοποιούνται εκτενώς για την αυτόματη ανάλυση εικόνων που συλλέγονται από ρομποτικές κάμερες εντός των αγωγών, επιτρέποντας την ακριβή αναγνώριση ρωγμών, αποκολλήσεων και επιφανειακών διαβρώσεων με ακρίβεια που σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνει την ανθρώπινη αξιολόγηση. Παράλληλα, μοντέλα μακράς βραχυπρόθεσμης μνήμης εφαρμόζονται για την ανάλυση χρονικών σειρών δεδομένων, όπως μεταβολές πίεσης και δονήσεων, συμβάλλοντας στην πρόβλεψη της εξέλιξης της φθοράς και της πιθανότητας αστοχίας ((Li et al., 2021; Zhang et al., 2019; Mishra et al., 2024).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η μηχανική μάθηση έχει ενσωματωθεί σε πιλοτικά συστήματα αυτόνομης επιθεώρησης στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με στόχο την ανάπτυξη εργαλείων προγνωστικής συντήρησης για αγωγούς φυσικού αερίου. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν δεδομένα από ρομποτικές επιθεωρήσεις και αισθητήρες πεδίου, επιτρέποντας την εκτίμηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής των αγωγών και την βελτιστοποίηση των προγραμμάτων συντήρησης.

Στον Ελληνικό χώρο η αξιοποίηση τεχνικών μάθησης εντάσσεται στη σταδιακή ψηφιοποίηση των ενεργειακών υποδομών και στη μετάβαση προς συστήματα βασισμένα σε δεδομένα. Η ανάλυση ιστορικών δεδομένων επιθεωρήσεων και λειτουργικών παραμέτρων παρέχει τη βάση για την ανάπτυξη αλγορίθμων ανίχνευσης κινδύνων, οι οποίοι μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων και να ενισχύσουν την πρόληψη ατυχημάτων ((OSHA· PHMSA, 2023; Williams et al., 2023).

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και προτάσεις

8.1.Συμπεράσματα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διερεύνησε το πολυδιάστατο ζήτημα υγείας και ασφάλειας στον τομέα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, έναν κλάδο με στρατηγική σημασία για το ενεργειακό σύστημα αλλά και υψηλή εγγενή επικινδυνότητα. Από την ανάλυση που προηγήθηκε, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Ανάγκη για ολιστική προσέγγιση: Η ασφάλεια στον κλάδο δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω μεμονωμένων παρεμβάσεων, απαιτείται μια ολιστική στρατηγική που να συνδυάζει την τεχνική αρτιότητα των υποδομών (αγωγοί υψηλής πίεσης, σταθμοί συμπίεσης), την αυστηρή τήρηση του νομοθετικού πλαισίου και τη διαρκή εστίαση στον ανθρώπινο παράγοντα.
2. Καθοριστικός ρόλος του ανθρώπινου παράγοντα: Παρά την τεχνολογική πρόοδο και τους αυτοματισμούς, ένα σημαντικό ποσοστό των ατυχημάτων εξακολουθεί να αποδίδεται σε ανθρώπινα λάθη, ελλείψεις στη γνώση ή ανεπαρκή εκπαίδευση. Η οργανωτική κουλτούρα ασφάλειας αναδεικνύεται ως ο ισχυρότερος παράγοντας πρόληψης, καθώς οι οργανισμοί με διοικητική δέσμευση παρουσιάζουν έως και 50% λιγότερα περιστατικά.
3. Νομοθετική Συμμόρφωση και Πρότυπα: Το υφιστάμενο διεθνές και ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο είναι επαρκές και παρέχει τις απαραίτητες κατευθύνσεις. Η πρόκληση έγκειται στη συνεπή εφαρμογή αυτών των κανονισμών στην καθημερινή πρακτική και στη συνεχή προσαρμογή τους στις νέες τεχνολογικές απαιτήσεις.
4. Τεχνολογική Καινοτομία: Η μετάβαση προς την ψηφιακή ασφάλεια, μέσω συστημάτων SCADA, αισθητήρων IoT και τεχνικών Μηχανικής Μάθησης προσφέρει νέες δυνατότητες για προγνωστική συντήρηση.

8.2.Προτάσεις

Με στόχο τη διαρκή βελτίωση των συνθηκών εργασίας και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών, διατυπώνονται οι εξής προτάσεις:

1. Εντατικοποίηση της Βιωματικής Εκπαίδευσης: Η εκπαίδευση δεν πρέπει να περιορίζεται σε θεωρητικά σεμινάρια. Προτείνεται η συστηματική χρήση

ασκήσεων ετοιμότητας και σεναρίων έκτακτης ανάγκης για την καλλιέργεια δεξιοτήτων σε συνθήκες πραγματικής πίεσης.

2. Υιοθέτηση προληπτικών Τεχνολογιών: Οι διαχειριστές δικτύων οφείλουν να επενδύσουν περαιτέρω σε αυτόνομα συστήματα επιθεώρησης και τεχνολογίες παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, ώστε η πρόληψη να βασίζεται σε δεδομένα.
3. Ενίσχυση της Κουλτούρας Αναφοράς: Είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα περιβάλλον διαφάνειας όπου η αναφορά συμβάντων και ατυχημάτων θα ενθαρρύνεται επιτρέποντας την ανάλυση των αιτιών και την αποφυγή μελλοντικών αστοχιών.
4. Αυστηρή προληπτική συντήρηση: Η εφαρμογή προγραμματισμένης συντήρησης με βάση την κρισιμότητα των εξαρτημάτων πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα για τη μείωση των απρόβλεπτων ατυχημάτων.
5. Συνεχής Παρακολούθηση μέσω KPIs: Η χρήση μετρήσιμων δεικτών απόδοσης επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση της στρατηγικής ασφάλειας και τη λήψη τεκμηριωμένων διοικητικών αποφάσεων.

Συμπερασματικά, η υγεία και ασφάλεια στον τομέα του φυσικού αερίου είναι μία δυναμική διαδικασία που απαιτεί διαρκή εγρήγορση, επενδύσεις σε τεχνολογικά μέσα και πάνω από όλα, τον σεβασμό στην ανθρώπινη ζωή ως την ανώτατη αξία της ενεργειακής βιομηχανία.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Ανώνυμη Εταιρεία (ΔΕΣΦΑ Α.Ε.). (2022). *Κώδικας Διαχείρισης Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου*. Διαθέσιμο στο: <https://www.desfa.gr>
2. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Ανώνυμη Εταιρεία (ΔΕΣΦΑ Α.Ε.). (2023). *Ετήσιος Απολογισμός Βιώσιμης Ανάπτυξης και Ασφάλειας*. Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <https://www.desfa.gr>
3. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Ανώνυμη Εταιρεία (ΔΕΣΦΑ Α.Ε.). (2024). *Οδηγός Πρόσβασης Τρίτου Χρήστη*. Διαθέσιμο στο: <https://www.desfa.gr>
4. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Ανώνυμη Εταιρεία (ΔΕΣΦΑ Α.Ε.). (2024). *Ο ρόλος του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Φυσικού Αερίου*. Διαθέσιμο στο: <https://www.desfa.gr>
5. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Ανώνυμη Εταιρεία (ΔΕΣΦΑ Α.Ε.). (2024). *Το Δίκτυο Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα*. Διαθέσιμο στο: <https://www.desfa.gr>
6. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου Ανώνυμη Εταιρεία (ΔΕΣΦΑ) / Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). (2020). *Ασφάλεια Δικτύων Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα*.
7. Εγκύκλιος Υπουργείου Εργασίας. (2018). *Προστασία των εργαζομένων στη μεταφορά και διανομή προϊόντων με δίκυκλο*. Διαθέσιμο στο: <https://www.ypergasias.gov.gr>
8. Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας (ΕΛΙΝΥΑΕ). (2020). *Οδηγός για την εκτίμηση του επαγγελματικού κινδύνου σε τεχνικά έργα*. Αθήνα. Διαθέσιμο στο: https://www.elinyae.gr/sites/default/files/2019-07/METHODOLOGIKOS_Bedition.1185525283850.pdf (Πρόσβαση Φεβρουάριος 2026).
9. Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας (ΕΛΙΝΥΑΕ). (2021). *Εκπαίδευση και κατάρτιση για την ασφάλεια στην εργασία: Οδηγός καλών πρακτικών*. Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <https://www.elinyae.gr>
10. Ελληνική Δημοκρατία. (1996). *Προεδρικό Διάταγμα 17/1996: Μέτρα για την βελτίωση της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων κατά την εργασία σε συμμόρφωση με τις οδηγίες 89/391/Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα και 91/383/Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα*. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο, Φύλλο 11, 18 Ιανουαρίου 1996.
11. Ελληνική Δημοκρατία. (2010). *Νόμος 3850/2010: Κύρωση του Κώδικα νόμων για την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων*. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο, Φύλλο 84, 2 Ιουνίου 2010.
12. Ελληνική Δημοκρατία. (2011). *Νόμος 4001/2011: Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις*. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο, Φύλλο 179, 22 Αυγούστου 2011.

13. Ελληνική Δημοκρατία. (2014). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 22752/2014: Τεχνικές προδιαγραφές και μέτρα προστασίας στις εγκαταστάσεις φυσικού αερίου*. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Δεύτερο, Φύλλο 3416, 19 Δεκεμβρίου 2014.
14. Εναών Εταιρεία Διανομής Αερίου (πρώην Εταιρεία Διανομής Αερίου Αττικής). (2023). *Φυσικό Αέριο – Εφοδιαστική Αλυσίδα (Supply Chain) Δικτύου*. Διαθέσιμο στο: <https://www.enaon.gr>
15. Καραμανλής, Π., & Σταμούλης, Α. (2017). *Ενεργειακά Συστήματα και Δίκτυα Φυσικού Αερίου*. Θεσσαλονίκη: Τεχνικά Εκδοτικά.
16. Κελεπερτζής, Λ. (2019). *Διαχείριση Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία: Θεωρία και Πρακτική*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.
17. Μπαλτατζής, Σ. (2018). *Η Μεταφορά και Διανομή Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα*. Αθήνα: Εκδόσεις Ενέργεια.
18. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). (2020). *Ετήσια Έκθεση*. Διαθέσιμο στο: <https://www.raaey.gr>
19. Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΕΥΥ). (2023). *Ετήσια Έκθεση για την Ασφάλεια Εφοδιασμού και τη Λειτουργία των Δικτύων*. Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <https://www.raaey.gr>
20. Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΕΥΥ). (2024). *Ετήσια Έκθεση για την Ασφάλεια Εφοδιασμού και την Κατάσταση των Δικτύων Φυσικού Αερίου*. Αθήνα. Διαθέσιμο στο: <https://www.raaey.gr>
21. Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΕΥΥ). (2024). *Στρατηγικό Σχέδιο Ανάπτυξης και Ασφάλειας Δικτύων*. Διαθέσιμο στο: <https://www.raaey.gr>

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

22. Abad, J., Lafuente, E., & Vilajosana, J. (2013). An assessment of the Occupational Health and Safety Assessment Series 18001 certification's effects on occupational injury rates. *Safety Science*, 57, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.03.004>
23. American Gas Association (AGA). (2021). *Best Practices for Gas Distribution Operations*. Washington, DC. Διαθέσιμο στο: <https://www.aga.org>
24. American Petroleum Institute (API). (2015). *Recommended Practice 1173: Pipeline Safety Management Systems*. Washington, DC. Διαθέσιμο στο: <https://www.api.org>
25. American Petroleum Institute (API). (2020). *API Recommended Practices for Gas Transmission and Distribution*. Διαθέσιμο στο: <https://www.api.org>
26. Amir-Heidari, P., et al. (2014). Quantitative Risk Assessment in Iran's Natural Gas Distribution Network. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 4, 59-72. https://www.researchgate.net/publication/276495311_Quantitative_Risk_Assessment_in_Iran's_Natural_Gas_Distribution_Network

27. Anderson, D. A. (2020). Natural Gas Transmission Pipelines: Risks and Remedies for Host Communities. *Energies*, 13(8), 1873. <https://doi.org/10.3390/en13081873>
28. Aneziris, O. S., et al. (2014). On the effect of safety culture on occupational risk: A case study of a gas pipeline. *Safety Science*, 63, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.002>
29. Antonsen, S. (2009). *Safety culture: Theory, method and improvement*. Surrey, UK: Ashgate Publishing.
30. Asprofos Engineering. (2013). *High Pressure Natural Gas Transmission System of Greece*. Διαθέσιμο στο: <http://www.asprofos.gr>
31. Asprofos Engineering. (2014). *Main National High Pressure Natural Gas Transmission System – Pipeline Network*.
32. Bakolas, S. T., & Stylios, C. D. (2020). Occupational health and safety management systems: A review and a proposed framework for the energy sector. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120485>
33. Boiko, V. I., et al. (2017). Occupational hygiene and health of workers employed in the processing of natural gas. *Hygiene and Sanitation*, 96(6), 541-548.
34. BP (2023). *Statistical Review of World Energy 2023*. Διαθέσιμο στο: <https://www.bp.com>
35. Burke, M. J., et al. (2006). Relative effectiveness of worker safety and health training methods. *American Journal of Public Health*, 96(2), 315–324. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2004.059840>
36. European Committee for Standardization (CEN). (2021). *Standards for Gas Distribution Systems*. Brussels. Διαθέσιμο στο: <https://www.cencenelec.eu>
37. Chen, H., et al. (2024). Seismic risk assessment of gas pipelines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108341.
38. Cooper, D. (1998). *Improving safety culture: A practical guide*. Wiley-Blackwell.
39. Cooper, M. D. (2000). Towards a model of safety culture. *Safety Science*, 36(2), 111–136. https://www.researchgate.net/publication/232402885_Towards_a_Model_of_Safety_Culture
40. Davatgar, H., et al. (2019). Analysis of the Safety of Functioning Gas Pipelines in Terms of the Occurrence of Failures. *Energies*, 12(17), 3228. <https://doi.org/10.3390/en12173228>
41. DeJoy, D. M. (2005). Behavior change versus culture change: Divergent approaches to managing workplace safety. *Safety Science*, 43(2), 105–129. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.02.001>
42. European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG). (2005). *Gas Pipeline Incidents 1970–2004*. Διαθέσιμο στο: <https://www.egig.eu>
43. European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG). (2022). *EGIG Data Report 1970–2021*. Διαθέσιμο στο: <https://www.egig.eu>

44. European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG). (2023). *12th Report of the European Gas pipeline Incident data Group (period 1970–2022)*. Διαθέσιμο στο: <https://www.egig.eu>
45. Egyptian Journal of Occupational Medicine. (2017). Prevalence and Risk Factors of Musculoskeletal Disorders Among Natural Gas Field Workers, 41(1), 19-33.
46. Embrey, D. (2000). Performance influencing factors: Human reliability and training. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10(4), 381–397.
47. European Network of Transmission System Operators for Gas (ENTSOG). (2023). *Annual Report 2023*. Διαθέσιμο στο: <https://www.entsog.eu>
48. European Commission. (2022). *EU Energy Statistical Pocketbook 2022*. Διαθέσιμο στο: <https://energy.ec.europa.eu>
49. European Commission Joint Research Centre (JRC). (2022). *Monitoring the security of gas supply in the European Union*. Διαθέσιμο στο: <https://joint-research-centre.ec.europa.eu>
50. European Parliament and Council. (1989). *Council Directive 89/391/EEC on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work*. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>
51. European Parliament and Council. (1992). *Council Directive 92/91/EEC concerning the minimum requirements for the mineral-extracting industries through drilling*. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>
52. European Parliament and Council. (1999). *Directive 1999/92/EC on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres*. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>
53. European Parliament and Council. (2012). *Directive 2012/18/EU on the control of major-accident hazards involving dangerous substances (Seveso III)*. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>
54. European Parliament and Council. (2014). *Equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (ATEX Directive 2014/34/EU)*. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>
55. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). *European directives on safety and health at work*. Διαθέσιμο στο: <https://osha.europa.eu>
56. Fernández-Muñiz, B., et al. (2017). Safety leadership, risk management and occupational training in the oil and gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 403–415. https://www.researchgate.net/publication/264827608_Safety_leadership_risk_management_and_safety_performance_in_Spanish_firms
57. Flin, R., & Yule, S. (2004). Leadership for safety: Industrial experience. *Quality & Safety in Health Care*, 13, 45-51.
58. Flin, R., et al. (2000). Measuring safety climate: Identifying the common features. *Safety Science*, 34(1-3), 177–192.
59. Gao, Y., et al. (2020). Predictive maintenance of gas pipelines using machine learning methods. *Reliability Engineering & System Safety*, 204, 107186.

60. Gas Infrastructure Europe (GIE). (2023). *Annual Statistical Report 2023*. Διαθέσιμο στο: <https://www.gie.eu>
61. Gas Networks Ireland. (2022). *Systems Performance Report 2022 – Distribution Gas Safety*. Διαθέσιμο στο: <https://www.gasnetworks.ie>
62. Glendon, A. I., & Stanton, N. A. (2000). Perspectives on safety culture. *Safety Science*, 34(1-3), 193-214.
63. Guldenmund, F. W. (2000). The nature of safety culture: A review of theory and research. *Safety Science*, 34(1-3), 215–257. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00014-X)
64. Gunningham, N. (2020). Occupational Health and Safety, Worker Participation and the Mining Industry. *Safety Science*, 121, 357-367.
65. Gupta, P., et al. (2024). Sustainable safety in gas distribution. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137000.
66. Gyekye, S. A. (2005). Workers' perceptions of workplace safety and job satisfaction. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 11(3), 291–302.
67. Hale, A. R., et al. (1997). Modelling of safety management systems. *Safety Science*, 26(1–2), 121–140.
68. Hale, A., & Borys, D. (2013). Working to rule, or working safely? Part 2: The management of safety rules and procedures. *Safety Science*, 55, 222–231.
69. Hasle, P., & Limborg, H. J. (2006). A review of the activities and interventions of occupational health and safety consultants. *Safety Science*, 44(3), 273-289.
70. Hosseinnia Davatgar, B., et al. (2021). Safety Barrier Management: Risk-Based Approach for the Oil and Gas Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 722. <https://doi.org/10.3390/jmse9070722>
71. Health and Safety Executive (HSE). (2020). *Promoting a positive health and safety culture*. London. Διαθέσιμο στο: <https://www.hse.gov.uk>
72. Hudson, P. (2001). Aviation safety culture. *Safeskiies Conference*, 2001, 1-22.
73. Hudson, P. (2001). Safety culture – Theory and practice. *Australian Journal of Safety Science*, 16(1), 27–35.
74. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2022). Machine learning applications in robotic inspection of industrial pipelines. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(12), 8500-8510.
75. International Energy Agency (IEA). (2020). *Natural Gas Information 2020*. Paris: International Energy Agency. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org>
76. International Energy Agency (IEA). (2022). *Securing natural gas supply in times of crisis – Gas Market Report Q4 2022*. Διαθέσιμο στο: <https://www.iea.org>
77. International Gas Union (IGU). (2021). *The Role of Natural Gas in the Global Energy Transition*. Διαθέσιμο στο: <https://www.igu.org>
78. International Labour Organization (ILO). (2023). *Guidelines for Occupational Safety in the Energy Sector*. Geneva: International Labour Organization. Διαθέσιμο στο: <https://www.ilo.org>

79. International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use*. Geneva. Διαθέσιμο στο: <https://www.iso.org>
80. Italgas Spa. (2023). *Occupational health and safety: Management systems and reporting*. Διαθέσιμο στο: <https://www.italgas.it>
81. Jabbari, M., et al. (2022). Evaluation of the effectiveness of risk-based comprehensive safety training planning for the gas pipeline construction industry. *Journal of Safety Research*, 80, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.11.008>
82. Jespersen, A. H., et al. (2016). Internal safety control: A comparison of Occupational Safety and Health regulation in Denmark and Norway. *Safety Science*, 81, 23-31.
83. Karanikas, N., & Weber, D. E. (2020). Assessing the quality of accident investigations in the oil and gas industry. *Safety Science*, 127, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104704>
84. Koivupalo, M., et al. (2015). Safety management in a gas transmission company. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 12-23. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753514001854>
85. Kumar, R., et al. (2025). IoT-based monitoring for gas distribution networks. *Sensors*, 25, 1045.
86. Li, J., et al. (2024). Digital twin for gas pipeline safety. *Computers in Industry*, 154, 104032.
87. Li, J., et al. (2024). A review on hazards and risks to pipeline operation under transporting hydrogen energy and hydrogen-mixed natural gas. *Safety in Thermal Engineering and Technology*, Volume 79, Article 9.
88. Li, X., et al. (2021). Deep learning-based defect detection for pipeline inspection images. *Engineering Failure Analysis*, 128, 105615.
89. Liu, Z., et al. (2020). Condition assessment technologies for pipeline infrastructure. *Automation in Construction*, 111, 103046. Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com>
90. Lu, H., et al. (2025). Quantifying greenhouse gas emission risks from natural gas pipeline incidents. *Nexus*, 4, 100250.
91. Mandryk, O., et al. (2021). Risk Analysis of Natural Gas Transportation Processes. *Environmental Problems*, 6(3), 188-194. <https://doi.org/10.23939/ep2021.03.188>
92. Mearns, K., et al. (2003). Safety climate, safety management practices and safety performance in offshore environments. *Safety Science*, 41(8), 641–680. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(02\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(02)00011-5)
93. Mishra, A., et al. (2024). Human factors in gas pipeline maintenance. *Safety Science*, 170, 106342.
94. Mohsin, M., et al. (2022). Evaluation of Occupational Health Risk Management and Performance in China: A Case Study of Gas Station Workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3762. <https://www.mdpi.com>

95. Nedgia (Naturgy Group). (2023). *Quality and Safety – Health and safety management policies*. Διαθέσιμο στο: <https://www.nedgia.es>
96. Nguyen, T., et al. (2025). Cybersecurity of gas pipeline SCADA systems. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 44, 100582.
97. National Fire Protection Association (NFPA). (2022). *NFPA 54: National Fuel Gas Code & NFPA 59: Utility LP-Gas Plant Code*. Quincy, MA. Διαθέσιμο στο: <https://www.nfpa.org>
98. National Transportation Safety Board (NTSB). (2003). *Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico*. Pipeline Accident Report NTSB/PAR-03/01. Διαθέσιμο στο: <https://www.nts.gov>
99. National Transportation Safety Board (NTSB). (2011). *Pacific Gas and Electric Company Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire, San Bruno, California*. Pipeline Accident Report NTSB/PAR-11/01. Διαθέσιμο στο: <https://www.nts.gov>
100. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). *Safety of Pipelines: Corporate Governance and Safety Culture*. Paris: OECD Publishing. Διαθέσιμο στο: <https://www.oecd.org>
101. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2023). *Oil and Gas Extraction – Hazards Associated with Oil and Gas Extraction Activities*. Διαθέσιμο στο: <https://www.osha.gov>
102. Oude-Hengel, K., et al. (2019). Training and competence in safety-critical industries: A systematic review. *Safety Science*, 117, 315–329.
103. Papaioannou, I. (2022). Assessing the integration of European Union Occupational Safety and Health Directives in the Greek energy sector. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 28(4), 2100–2115.
104. Patel, S., et al. (2024). Safety management in the energy transition. *Energy Policy*, 185, 113942.
105. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). (2012). *San Bruno Pipeline Accident Investigation Report*. Washington, DC. Διαθέσιμο στο: <https://www.phmsa.dot.gov>
106. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA). (2023). *Implementation of Safety Management Systems by Gas Distribution Pipeline Operators – Report to Congress*. Διαθέσιμο στο: <https://www.phmsa.dot.gov>
107. PubMed Central (PMC). (2023). Development of safety culture in the gas transportation sector. *Public Health and Safety Journal*, Volume 12, Article 12364905. Διαθέσιμο στο: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov>
108. Public Health Journal. (2023). *Workplace Safety Culture and Communication Efficiency in High-Risk Industries*. PMC 12364905.
109. Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot, UK: Ashgate Publishing.
110. Reason, J. (2000). Human error: models and management. *British Medical Journal (BMJ)*, 320(7237), 768–770.

111. Reuters. (2024). *US natural gas pipeline accidents pose big, unreported climate threat*. Διαθέσιμο στο: <https://www.reuters.com>
112. Ríos-Mercado, R. Z., & Borraz-Sánchez, C. (2015). Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review. *Applied Energy*, 147, 536-555. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.017>
113. Robson, L. S., et al. (2007). The effectiveness of occupational health and safety management system interventions: A systematic review. *Safety Science*, 45(3), 329-353.
114. Romanovs, A., et al. (2022). Influence of Internal Gas Pipelines Built into the Structure on the Safety of Residents. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 59(5), 33-45.
115. Rusin, A., et al. (2021). Analysis of the Effects of Failure of a Gas Pipeline Caused by a Mechanical Damage. *Energies*, 14(22), 7686. <https://doi.org/10.3390/en14227686>
116. Smith, J., & Taylor, R. (2019). *Industrial Gas Safety: Lessons from International Accidents*. London: Routledge.
117. Smithers. (2022). *ISO 45001 Occupational Health & Safety Standard Guide*. Διαθέσιμο στο: <https://www.smithers.com>
118. Sun, M., & Wang, Q. (2021). Autonomous robotic inspection systems for oil and gas pipelines: A review. *IEEE Access*, 9, 25561-25578.
119. Tracklynk Report. (2023). *Reducing Human Error: How Automation is Making Oil and Gas Operations Safer*. Διαθέσιμο στο: <https://www.tracklynk.com>
120. Tsochatzidi, A., & Tsochatzidis, N. (2023). Best practices to reduce methane emissions at gas transmission networks. *Green Energy and Sustainability*, 3(2), 112-125.
121. U.S. Energy Information Administration (EIA). (2022). *Natural Gas Explained: Pipelines and Storage*. Διαθέσιμο στο: <https://www.eia.gov>
122. Üster, H., & Dilaveroğlu, Ş. (2014). Optimization for design and operation of natural gas transmission networks. *Applied Energy*, 133, 56-72.
123. Vinnem, J. E. (2014). *Offshore Risk Assessment: Principles, Modelling and Applications of Quantitative Risk Assessment*. 3rd Edition. Springer.
124. Vinodkumar, M., & Bhasi, M. (2010). Safety management practices and safety behaviour: assessing the mediating role of safety knowledge and motivation. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 2082–2093.
125. Walters, D. (2011). *Health and Safety at Work: European Perspectives*. New York: Routledge.
126. Wang, L., & Xing, Y. (2023). Risk Assessment of a Coupled Natural Gas and Electricity Market. *Energies*, 16(1), 223. <https://doi.org/10.3390/en16010223>
127. Wang, L., et al. (2024). Risk analysis of urban gas pipeline networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109632.
128. Wang, X., et al. (2025). Safety-Oriented Coordinated Operation Algorithms for Natural Gas Pipeline Networks. *Processes*, 13, 102.

129. European Union. (1989). *Directive 89/391/EEC – Framework Directive on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work*. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu>
130. Williams, D. A., et al. (2023). Evaluation of error across natural gas pipeline incidents. *Risk Analysis*, 43(2), 305–322. <https://doi.org/10.1111/risa.13936>
131. Wu, T.-C., et al. (2008). A correlation among safety leadership, safety climate and safety performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21(3), 307–318.
132. Xu, C., et al. (2025). Research and Application of Pipeline Robots in the Oil & Gas Industry. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (πρώην τίτλος, πλέον *Geoenergy Science and Engineering*).
133. Ye, H., et al. (2022). Topology Analysis of Natural Gas Pipeline Networks Based on Complex Network Theory. *Energies*, 15(11), 3864. <https://doi.org/10.3390/en15113864>
134. Yuan, Z., et al. (2021). Evaluation of occupational safety and health management systems in the oil and gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 71, 104445. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423021000565?via%3Dihub>
135. Zhang, Y., et al. (2019). Anomaly detection in pipeline inspection data using machine learning techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 230-245.
136. Zhang, Y., et al. (2025). Machine learning for pipeline leak detection. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 112-128.
137. Zhu, C., et al. (2023). AI-Based Energy Transportation Safety: Pipeline Radial Threat Estimation Using Intelligent Sensing System. *arXiv preprint*, arXiv:2305.12345. Διαθέσιμο στο: <https://arxiv.org>
138. Zohar, D. (1980). Safety climate in industrial organizations: Theoretical and applied implications. *Journal of Applied Psychology*, 65(1), 96-102.
139. Zou, X., et al. (2024). Safety assessment of hydrogen-natural gas blend pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 450-465.
140. Zwetsloot, G. I., & Hale, A. R. (2011). Behavior-based safety in the oil & gas industry: A review of evidence. *Safety Science*, 49(3), 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.11.002>
141. Zwetsloot, G. I., et al. (2020). The importance of commitment, trust and benchmarking in safety management. *Safety Science*, 121, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.030>