



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ (HDD)
ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

ΙΟΥΛΙΑ ΧΡΙΣΤΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

Β' Αξιολογητής: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Γρηγόριο Παπαγεωργίου για τη βοήθεια και τη στήριξή του καθώς και τους συναδέλφους που αφιέρωσαν πολύτιμο χρόνο στις προσωπικές συνεντεύξεις, στα ερωτηματολόγια και στην παροχή τεχνικών και οικονομικών στοιχείων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης [Horizontal Directional Drilling (HDD)] είναι μια κατασκευαστική μέθοδος διασταύρωσης αγωγών/καλωδίων με τεχνικά έργα και υδάτινα ρεύματα, με ιδιαίτερα περιβαλλοντικά και αδειοδοτικά πλεονεκτήματα.

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των πιθανών κινδύνων χρήσης της μεθόδου HDD κατά τον σχεδιασμό και κατασκευή έργων υποδομής στην Ελλάδα με τελικό στόχο την εκπόνηση ενός σχεδίου βάσης για τη διαχείριση των σχετικών κινδύνων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε βιβλιογραφική ανασκόπηση, ερωτηματολόγια και συνεντεύξεις με εμπειρογνώμονες, ανάλυση δένδρου σφάλματος και οικονομική αποτίμηση μελέτης περίπτωσης.

Από την έρευνα προέκυψε ότι οι κίνδυνοι με τη μεγαλύτερη διακινδύνευση σε έργα HDD είναι κυρίως κατασκευαστικοί και διαχειριστικοί. Οι περισσότεροι συνδέονται με τις εδαφικές συνθήκες, όπως: η διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος, η αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού λόγω τριβής, η απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων κατά τη διάτρηση και η τοπική κατάρρευση της οπής. Άλλοι κίνδυνοι που καταγράφηκαν ήταν η υποεκτίμηση του προϋπολογισμού και προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ νομικά ζητήματα.

Ως σχέδιο βάσης για τη διαχείριση των κινδύνων της μεθόδου HDD, εκπονήθηκε ένα Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου με προτεινόμενα μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης. Τα σημαντικότερα μέτρα από αυτά αφορούν στον προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας, τον προσεκτικό σχεδιασμό της όδευσης/τροχιάς, την επιλογή έμπειρου εργολάβου υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς, τον προσεκτικό καθορισμό του μείγματος μπετονίτη και τη συνεχή παρακολούθηση της πίεσής του, καθώς και τη διασφάλιση επιπλέον κονδυλίου επί του προϋπολογισμού για τα απρόβλεπτα της HDD.

Λέξεις-Κλειδιά:

Οριζόντια Κατευθυνόμενη Διάτρηση (HDD), Ανάλυση και Διαχείριση Κινδύνου, Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος (FTA), Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου, Εναπομένουσα Διακινδύνευση.

Title: Risk Management and Assessment of the Horizontal Directional Drilling (HDD) Method during the Design and Construction of Infrastructure Projects

ABSTRACT

The Horizontal Directional Drilling (HDD) method is a construction technique used to cross pipelines/cables under existing infrastructure and watercourses, with particular environmental and permitting advantages.

The purpose of this dissertation is the qualitative and quantitative assessment of the potential risks associated with the HDD method during the design and construction of infrastructure projects in Greece, with an ultimate goal to prepare a baseline risk management plan.

The methodology followed included a literature review, questionnaires and interviews with experts, fault tree analysis (FTA) and the financial assessment of a case study.

The research showed that the highest-ranking risks in HDD projects are mostly linked to construction and management. Most of them are related to ground conditions, such as: drilling fluid seepage, coating damage of the pipe due to skin friction, unexpected man-made or natural obstacles during drilling, and the localized collapse of the borehole. Other risks identified included the underestimate of the required budget and problems related to required approvals and permitting/legal issues.

A baseline HDD Risk Management Plan was prepared, combining a risk matrix with proposed preventive and mitigation measures. The most important ones are: careful planning and execution of ground investigation, careful design of the HDD alignment, selection of an experienced HDD contractor based on quality criteria and not only on the lowest financial offer, careful determination of the bentonite mix and continuous monitoring of its pressure during HDD operations, as well as securing additional contingency funds to cover for unforeseen events.

Key Words:

Horizontal Directional Drilling (HDD), Risk Assessment and Risk Management, Fault Tree Analysis (FTA), Risk Management Plan, Residual Risk.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Η Μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (HDD)	1
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	2
1.3 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας	2
1.4 Μεθοδολογία Διπλωματικής Εργασίας και Πρωτοτυπία	2
1.5 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	3
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1 Μέθοδοι Διασταυρώσεων Αγωγών με Τεχνικά Έργα ή Υδάτινα Ρεύματα	5
2.1.1 Ανοιχτή Εκσκαφή κι Επανεπίχωση (Open Cut)	5
2.1.2 Περιστροφική ή Κρουστική Διάτρηση (Auger or Thrust Boring)	7
2.1.3 Η Τεχνική της Μικρο-σήραγγας (Microtunnelling)	8
2.2 Η Μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (Horizontal Directional Drilling – HDD)	10
2.2.1 Ιστορική Ανασκόπηση	10
2.2.2 Περιγραφή της Μεθόδου	11
2.2.3 Χρήση της Μεθόδου	15
2.2.4 Πλεονεκτήματα	16
2.2.5 Μειονεκτήματα και Περιορισμοί της Μεθόδου	18
2.2.6 Σχεδιασμός – Προγραμματισμός Έργου	18
2.3 Διαχείριση Κινδύνου στα Τεχνικά Έργα	19
2.3.1 Κατηγοριοποίηση Κινδύνων	20
2.3.2 Στρατηγικές Διαχείρισης Κινδύνου	21
2.4 Κίνδυνοι και Αστοχίες της HDD	22
2.5 Στατιστικά Στοιχεία Αστοχιών HDD	29
2.6 Διαχείριση Κινδύνων HDD και Μέτρα Αντιμετώπισης	30
2.7 Ερευνητικά Ερωτήματα	33
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	35
3.1 Βήματα Εργασίας	35
3.2 Καθορισμός Κλιμάκων Μητρώου Κινδύνου	37
3.3 Ερωτηματολόγια/Συνεντεύξεις	39
3.4 Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος (Fault Tree Analysis)	40

3.5	Μελέτη Περίπτωσης (Case Study)	42
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΡΕΥΝΑΣ	43
4.1	Πιθανότητα Εμφάνισης Κινδύνου	43
4.2	Σοβαρότητα των Επιπτώσεων	46
4.3	Εκτίμηση Διακινδύνευσης	49
4.4	Εφαρμογή Ανάλυσης Δένδρου Σφάλματος	52
4.5	Προτεινόμενα Μέτρα και Σχέδιο Βάσης για τη Διαχείριση Κινδύνου της HDD.....	57
4.6	Εκτίμηση Διακινδύνευσης μετά τη Λήψη Μέτρων Διαχείρισης Κινδύνου – Εναπομένουσα Διακινδύνευση	71
4.6.1	Μέτρα Διαχείρισης και Μείωση Πιθανότητας Εμφάνισης.....	83
4.6.2	Μέτρα Διαχείρισης και Μείωση Σοβαρότητας Επιπτώσεων	83
4.6.3	Εναπομένουσα Διακινδύνευση	84
5	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ	86
5.1	Μέθοδος HDD	86
5.1.1	Συνοπτική Τεχνική Περιγραφή και Μεθοδολογία Εγκατάστασης..	86
5.1.2	Απαιτήσεις Ελεύθερου Χώρου	86
5.1.3	Προϋπολογισμός Μεθόδου HDD	87
5.2	Μέθοδος Ανοιχτής Εκσκαφής (Open Cut)	88
5.2.1	Συνοπτική Τεχνική Περιγραφή και Μεθοδολογία Εγκατάστασης..	88
5.2.2	Προϋπολογισμός Μεθόδου Ανοιχτής Εκσκαφής	89
5.3	Σύγκριση Κόστους.....	90
5.3.1	Κόστος Κατασκευής	90
5.3.2	Κόστος Σφάλματος	91
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	92
6.1	Συνοπτική Περιγραφή Προβλήματος και Ανάλυσης	92
6.2	Συμπεράσματα.....	93
6.3	Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση.....	95
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	96
7.1	Ξενόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	96
7.2	Ελληνόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	101
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	102
8.1	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ	103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ελάχιστες Διαστάσεις Περιοχών Εργασίας Εισόδου/Εξόδου στην HDD (DESFA, 2021)	14
Πίνακας 2.2: Κατηγορίες Κινδύνων Τεχνικών Έργων	21
Πίνακας 2.3: Κίνδυνοι κατά τον Σχεδιασμό και Χρήση της Μεθόδου HDD.....	28
Πίνακας 3.1: Κλίμακα Πιθανότητας Εμφάνισης	37
Πίνακας 3.2: Κλίμακα Σοβαρότητας Επιπτώσεων	38
Πίνακας 3.3: Πίνακας Εκτίμησης Διακινδύνευσης	38
Πίνακας 3.4: Κλίμακα Διακινδύνευσης	38
Πίνακας 3.5: Δεδομένα Μελέτης Περίπτωσης	42
Πίνακας 4.1: Πιθανότητα Εμφάνισης Κινδύνου HDD	43
Πίνακας 4.2: Σοβαρότητα Επιπτώσεων Κινδύνων HDD	47
Πίνακας 4.3: Συνολικά Αποτελέσματα Έρευνας	50
Πίνακας 4.4: Υπολογισμός Σχετικής Πιθανότητας	55
Πίνακας 4.5: Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου HDD.....	59
Πίνακας 4.6: Μητρώο Εναπομένουσας Διακινδύνευσης HDD.....	72
Πίνακας 4.7: Σύγκριση Αρχικής και Τελικής Διακινδύνευσης	84
Πίνακας 5.1: Προϋπολογισμός HDD.....	87
Πίνακας 5.2: Προϋπολογισμός Open Cut.....	89

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Εγκατάσταση αγωγού με τη μέθοδο της κρουστικής διάτρησης (Scheuble, 2004)	8
Εικόνα 2.2: Η τεχνική της μικρο-σήραγγας (Scheuble, 2004)	9
Εικόνα 2.3: Τυπική διατομή αγωγών καλωδίων υψηλής τάσης σε προστατευτικούς σωλήνες (Smith III, 2023)	11
Εικόνα 2.4: Στάδια εφαρμογής της μεθόδου HDD (Kwast-Kotlarek, Heldak & Szczepański, 2018)	12
Εικόνα 2.5: Στάδια εφαρμογής της μεθόδου HDD (CAPP, 2004)	13
Εικόνα 2.6: Η μέθοδος “HDD Intersecting” (Smith III, 2023).....	15

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ποιοτική εκτίμηση κινδύνων HDD σε διάγραμμα Ishikawa (Σχήμα 13 όπ. αναφ. στο Gierczak, 2014).....	24
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής εργασίας.....	36
Σχήμα 3.2: Βασική δομή δένδρου σφάλματος (Ibrahim, 2018 όπ. αναφ. στο Ehiagwina, Kehinde, Nafiu, Afolabi & Olatinwo, 2022)	41
Σχήμα 4.1: Πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου HDD.....	45
Σχήμα 4.2: Σοβαρότητα επιπτώσεων κινδύνων HDD	48
Σχήμα 4.3: Διακινδύνευση HDD	51
Σχήμα 4.4: Ανάλυση δένδρου σφάλματος.....	54
Σχήμα 4.5: Σύγκριση αρχικής και εναπομένουσας διακινδύνευσης HDD	85

Συντομογραφίες και Ακρωνύμια

AI	Artificial Intelligence (Τεχνητή Νοημοσύνη)
API	American Petroleum Institute (Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου)
CAPP	Canadian Association of Petroleum Producers (Καναδική Ένωση Πετρελαιοπαραγωγών)
cm	centimetre (εκατοστό)
D	Διάμετρος
DCI	Depth Confirmation & Instruction (Επιβεβαίωση βάθους και καθοδήγηση)
dia	diameter (διάμετρος)
DN	Nominal Diameter (Ονομαστική Διάμετρος)
ft	Feet (πόδια)
FTA	Fault Tree Analysis (Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος)
FFTA	Fuzzy Fault Tree Analysis (Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος με Ασαφή Δεδομένα)
HDD	Horizontal Directional Drilling (Οριζόντια Κατευθυνόμενη Διάτρηση)
HDPE	High Density Polyethylene (Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας)
ICB [®]	International Competence Baseline (Διεθνές Πρότυπο Ικανοτήτων)
IEC	International Electrotechnical Commission (Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (US) (Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών) (ΗΠΑ)
in	inch (ίντσα)
IPMA [®]	International Project Management Association (Διεθνής Ένωση Διαχείρισης Έργων)
ISO	International Organization for Standardization (Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης)
km	kilometre (χιλιόμετρο)
3LPE	3-Layer Polyethylene (πολυαιθυλένιο 3 στρώσεων)
m	metre (μέτρο)
mm	millimetre (χιλιοστό)
N.G.	Natural Gas (Φυσικό Αέριο)
R.O.W.	Right of Way (Ζώνη Εργασίας)
PMBOK [®]	Project Management Body of Knowledge (Οδηγός Βασικών Γνώσεων στη Διοίκηση Έργων)
PMI [™]	Project Management Institute (Ινστιτούτο Διαχείρισης Έργων)

UT	Ultrasonic Testing
W.T.	Wall Thickness (πάχος τοιχώματος)
ΔΕΠΑ	Δημόσια Επιχείρηση Αερίου
ΔΕΣΦΑ/ DESFA	Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου
H/Y	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
κ.ά.	και άλλα
κ.λπ.	και λοιπά
κ.ο.κ.	και ούτω καθεξής
ΛΕΑ	Λορίδα Έκτακτης Ανάγκης
ΜΚΟ	Μη Κυβερνητική Οργάνωση
π.χ.	παραδείγματος χάριν
Φ"	Διάμετρος αγωγού σε ίντσες
Φ.Π.Α.	Φόρος Προστιθέμενης Αξίας

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η Μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (HDD)

Σε μια εποχή που η μεταφορά ενέργειας και δεδομένων, καθώς και η ανάπτυξη δικτύων κοινής ωφέλειας, γίνονται διαρκώς πιο κρίσιμες, ειδικά σε περιβάλλοντα που είναι ήδη πυκνά δομημένα, τόσο υπεργείως όσο και υπογείως, καθίσταται όλο και πιο σημαντική η χρήση κατασκευαστικών μεθόδων που επιτρέπουν τη διασταύρωση αγωγών και καλωδίων με τεχνικά έργα, επιφέροντας τη μικρότερη δυνατή διατάραξη των υπαρχόντων δικτύων και υποδομών. Για περιβαλλοντικούς επίσης λόγους είναι επιθυμητό, όταν απαιτείται η διέλευση αγωγών μέσα από προστατευόμενες περιοχές και οικοσυστήματα, αυτό να γίνεται με όσο το δυνατόν μικρότερη όχληση και οπτική παρείσφρηση.

Η μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης [Horizontal Directional Drilling (HDD)] είναι μια κατασκευαστική μέθοδος διασταύρωσης αγωγών/καλωδίων με τεχνικά έργα και υδάτινα ρεύματα που, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει όσον αφορά τη μείωση της διατάραξης, της όχλησης και της οπτικής παρείσφρησης, προτιμάται αρκετά σε περιπτώσεις που είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επιτευχθεί αυτή η μείωση, όπως για παράδειγμα προστατευόμενοι υδροβιότοποι, ευαίσθητα οικοσυστήματα, αρχαιολογικοί χώροι, αλλά και σημαντικά οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα ή διάδρομοι προσγείωσης-απογείωσης των οποίων η κυκλοφορία/χρήση δεν μπορεί εύκολα να διακοπεί. Αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου HDD παρατίθεται παρακάτω στην Ενότητα 2.2.

Στο εξωτερικό η μέθοδος HDD χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια (από τις αρχές της δεκαετίας του 1970) και, όπως θα φανεί και στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας, υπάρχει εκτενής σχετική βιβλιογραφία. Αντιθέτως στην Ελλάδα, η χρήση της μεθόδου HDD είναι σχετικά πιο πρόσφατη (περίπου από τα τέλη της δεκαετίας 1990/αρχές του 2000) και υπάρχουν περιορισμένες βιβλιογραφικές αναφορές όσον αφορά προδιαγραφές, κώδικες σχεδιασμού και κατασκευής, καθώς και αποτελέσματα εφαρμογής. Ομοίως υπάρχει περιορισμένη ελληνική βιβλιογραφία ως προς τους συνήθεις κινδύνους εφαρμογής της μεθόδου και τους τρόπους πρόληψης και αντιμετώπισής τους.

1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των πιθανών κινδύνων χρήσης της κατασκευαστικής μεθόδου της οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης (HDD) σε έργα υποδομής, όπως για παράδειγμα για την εγκατάσταση αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων (φυσικό αέριο και πετρελαιοειδή) κάτω από υπάρχοντα τεχνικά έργα, υδάτινα ρεύματα και προστατευόμενους υδροβιότοπους.

1.3 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος είναι η αναλυτική καταγραφή και αξιολόγηση των πιθανών κινδύνων και των επιπτώσεών τους και η μετέπειτα επεξεργασία και εκπόνηση ενός σχεδίου βάσης για τη διαχείριση των κινδύνων της μεθόδου HDD. Το σχέδιο αυτό θα είναι χρήσιμο για τις εταιρείες που εμπλέκονται με την υλοποίηση έργων υποδομής και ιδιαίτερα για τις εταιρείες που εμπλέκονται στον σχεδιασμό και την κατασκευή αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων και ηλεκτρικής ενέργειας.

1.4 Μεθοδολογία Διπλωματικής Εργασίας και Πρωτοτυπία

Η διερεύνηση των πιθανών κινδύνων της οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης θα γίνει μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ερωτηματολογίων/συνεντεύξεων με εμπειρογνώμονες, ανάλυσης δένδρου σφάλματος [Fault Tree Analysis (FTA)] και μελέτης περίπτωσης (case study).

Η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται στον τρόπο διερεύνησης και ανάλυσης των κινδύνων HDD κατά τον σχεδιασμό και κατασκευή έργων υποδομής, συνδυάζοντας τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και στην εκπόνηση σχεδίου βάσης διαχείρισης των κινδύνων. Επίσης θα επιχειρηθεί μια γενική αξιολόγηση/σύγκριση της εφαρμογής της μεθόδου HDD στον ελλαδικό χώρο σε σχέση με τη διεθνή βιβλιογραφία.

1.5 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στην εισαγωγή παρουσιάζονται επιγραμματικά η μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (HDD), ο σκοπός και ο στόχος της διπλωματικής εργασίας, η μεθοδολογία εκπόνησής και η δομή της.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο Κεφάλαιο 2 αρχικά γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων διασταυρώσεων αγωγών με τεχνικά έργα, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου HDD. Στη συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της μεθόδου, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της, καθώς και στοιχείων που αφορούν το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό υλοποίησής της.

Το κεφάλαιο συνεχίζει με βιβλιογραφική ανασκόπηση των κινδύνων στα τεχνικά έργα και εκτενέστερα των κινδύνων της HDD και των πιθανών επιπτώσεών τους στο έργο, σε συνδυασμό με προτεινόμενα μέτρα αντιμετώπισης/διαχείρισης των κινδύνων.

Στο τέλος του Κεφαλαίου 2 παρουσιάζονται τα ερευνητικά ερωτήματα.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα βήματα της εργασίας με διευκρινίσεις όπου χρειάζεται, όπως για παράδειγμα περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την κατάρτιση των ερωτηματολογίων και τη διεξαγωγή της έρευνας. Συνοπτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
- Ερωτηματολόγια/Συνεντεύξεις με Εμπειρογνώμονες
- Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος
- Δημιουργία Μητρώου Διαχείρισης Κινδύνου
- Μελέτη Περίπτωσης/Οικονομική Αποτίμηση

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Έρευνας

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας που διεξήχθη μέσω των συνεντεύξεων και των ερωτηματολογίων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση δένδρου σφάλματος για τη θεωρητικά δυσμενέστερη περίπτωση αστοχίας HDD.

Ακολουθεί το Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου HDD, το οποίο ως συνδυασμός ενός μητρώου κινδύνου με προτάσεις μέτρων αντιμετώπισης/διαχείρισης μπορεί να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό σχέδιο βάσης για κάθε επαγγελματία και εταιρεία που δραστηριοποιείται στο χώρο.

Τέλος, γίνεται σύγκριση της διακινδύνευσης για τις δυσμενέστερες περιπτώσεις πριν και μετά τη λήψη των προτεινόμενων μέτρων και αποδεικνύεται ότι η εναπομένουσα διακινδύνευση είναι μικρή και ότι δεν απαιτούνται επιπλέον μέτρα πέραν των συνήθων.

Κεφάλαιο 5: Οικονομική Αποτίμηση

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το κατασκευαστικό κόστος της μελέτης περίπτωσης της εγκατάστασης αγωγού διαμέτρου 36" (API 5L X65 Grade B W.T. 9,53 mm με μόνωση 3LPE) κάτω από Εθνική Οδό πλάτους οδοστρώματος 20 m. Δίδεται το κόστος εγκατάστασης του αγωγού τόσο με τη μέθοδο HDD όσο και με την απλή μέθοδο ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης και επιχειρείται μια σύγκριση μεταξύ τους, σχολιάζοντας παράλληλα τις οικονομικές επιπτώσεις της θεωρητικά δυσμενέστερης περίπτωσης αστοχίας HDD που εξετάστηκε στην ανάλυση δένδρου σφάλματος.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Το Κεφάλαιο 6 περιέχει συνοπτικά την περιγραφή του προβλήματος που εξετάζει η παρούσα διπλωματική, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, τα συμπεράσματα της έρευνας και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφικές Αναφορές

Στο Κεφάλαιο 7 καταγράφονται οι ξενόγλωσσες και ελληνόγλωσσες αναφορές.

Κεφάλαιο 8: Παράρτημα – Ερωτηματολόγιο Έρευνας

Στο Παράρτημα παρατίθεται το ερωτηματολόγιο της έρευνας, όπως διανεμήθηκε στους συμμετέχοντες.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Μέθοδοι Διασταυρώσεων Αγωγών με Τεχνικά Έργα ή Υδάτινα Ρεύματα

Παραδοσιακά οι διασταυρώσεις αγωγών με τεχνικά έργα (π.χ. δρόμοι, σιδηρόδρομοι, δίκτυα κοινής ωφέλειας κ.λπ.) ή υδάτινα ρεύματα πραγματοποιούνταν με τη μέθοδο της ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης (open cut method). Στη συνέχεια αναπτυχθήκαν μέθοδοι εγκατάστασης αγωγών χωρίς όρυγμα (trenchless techniques), όπως αυτές της περιστροφικής ή κρουστικής διάτρησης (auger or thrust boring), της μικρο-σήραγγας (microtunnelling) και της οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης (horizontal directional drilling). Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις διάφορες μεθόδους διασταυρώσεων προτού παρουσιαστεί πιο αναλυτικά η μέθοδος της οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής.

2.1.1 Ανοιχτή Εκσκαφή κι Επανεπίχωση (Open Cut)

2.1.1.1 Διασταυρώσεις με Τεχνικά Έργα και Δίκτυα Κοινής Ωφέλειας

Η μέθοδος ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης (open cut method), ως η πιο απλή και οικονομική μέθοδος, εξακολουθεί να παραμένει η πιο κοινά χρησιμοποιούμενη για μικρές διασταυρώσεις με δευτερεύοντα οδικά δίκτυα σε περιοχές όπου είναι εύκολη η εκτροπή της κίνησης των οχημάτων για μικρά χρονικά διαστήματα, καθώς και σε διασταυρώσεις με υπάρχοντες αγωγούς.

Με αυτή τη μέθοδο η διασταύρωση αγωγών με τεχνικά έργα, όπως οι δρόμοι, απαιτεί προσωρινή διακοπή λειτουργίας των υποδομών, εκσκαφή επιμηκών ορυγμάτων/τάφρων, εγκατάσταση των αγωγών, επανεπίχωση των τάφρων και αποκατάσταση της περιοχής. Μια τυπική διατομή τάφρου σε δρόμο με ασφαλτο δίνεται στο σχέδιο του ΔΕΣΦΑ Νο. STD-00-41-15 (DESFA, 2012). Βάσει του σχεδίου, το ελάχιστο απαιτούμενο βάθος της τάφρου από τη στάθμη του οδοστρώματος είναι D+1400 mm ενώ το ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος της τάφρου δίνεται ως D+400 mm (όπου D η διάμετρος του αγωγού).

Για τις διασταυρώσεις με δίκτυα κοινής ωφέλειας δεν απαιτείται απαραίτητα διακοπή της λειτουργίας τους, χρειάζεται όμως να ληφθούν κατάλληλα μέτρα έτσι ώστε να μην διαταραχθούν κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά το πέρας των εργασιών, καθώς και να τηρηθεί η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση ασφαλείας μεταξύ του αγωγού και του υπάρχοντος δικτύου. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του ΔΕΣΦΑ, η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ του αγωγού και οποιασδήποτε άλλης εγκατάστασης δικτύου πρέπει να είναι 30 cm. Εξαιρούνται τα δίκτυα αποστράγγισης με διάμετρο μικρότερη από 150 mm, όπου η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μπορεί να μειωθεί στα 15 cm (DESFA, DSF-SPC-CIV-003, 2021). Όταν πρόκειται για αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων και αγωγούς μεταφοράς ηλεκτρισμού, λαμβάνονται επιπρόσθετα μέτρα όπως η τοποθέτηση ελαστικών ή/και μονωτικών διαχωριστικών (DESFA, DSF-SPC-PIP-016, 2021).

2.1.1.2 Διασταυρώσεις με Υδάτινα Ρεύματα

Όσον αφορά τις διασταυρώσεις με υδάτινα ρεύματα, η μέθοδος ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μικρά ή αβαθή ποτάμια χωρίς σημαντική ροή ύδατος, καθώς για την εκσκαφή του ορύγματος και την τοποθέτηση του αγωγού απαιτείται μερική ή ολική εκτροπή της ροής του ποταμού (DESFA, DSF-SPC-PIP-019, 2021). Αυτό σαν γεγονός μπορεί να έχει σοβαρές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις όπως και σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις. Επίσης, όσο πιο σημαντική είναι η κοίτη από άποψης μεγέθους, αλλά και περιβαλλοντικής σπουδαιότητας, τόσο πιο δύσκολο είναι να επιτευχθεί η σχετική περιβαλλοντική αδειοδότηση ενώ αυξάνονται οι πιθανότητες να μη δοθεί καθόλου άδεια.

Τυπικές μηκοτομές και τυπικές διατομές ορύγματος σωληναγωγού σε διασταύρωση με υδάτινο ρεύμα δίνονται στα σχέδια του ΔΕΣΦΑ Νο. STD-1-41-18 και STD-1-41-20 (DESFA, 2012). Στις τυπικές διατομές των σχεδίων προδιαγράφεται ότι για την προστασία της κοίτης του ποταμού από υδραυλική διάβρωση τοποθετείται στρώση λιθορριπής, ενίοτε ενισχυμένη.

Ένα πρόσθετο πρόβλημα που συναντάται στην περίπτωση των διασταυρώσεων με υδάτινα ρεύματα, είναι η ανύψωση του αγωγού λόγω άνωσης. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων λαμβάνονται μέτρα όπως η τοποθέτηση μπετονένιων «σαμαριών» πάνω από τον αγωγό, η χρήση αγωγών με επικάλυψη από σκυρόδεμα (concrete coating) ή η χρήση χαλύβδινων αγκυρώσεων (DESFA, DSF-SPC-PIP-016, 2021).

Μια παραλλαγή της μεθόδου ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης για την εγκατάσταση ενός αγωγού δια μέσω υδάτινου ρεύματος είναι αυτή της έλκυσης δια μέσω του πυθμένα (bottom pulling), η οποία εφαρμόζεται μόνο σε μαλακές κοίτες ρευμάτων χωρίς πέτρες και βράχους, ακόμα και σε περιπτώσεις που η ταχύτητα ροής του νερού είναι υψηλή. Σε αυτή ο αγωγός συναρμολογείται δίπλα στην όχθη και επικαλύπτεται με μανδύα σκυροδέματος. Στη συνέχεια γίνεται εκσκαφή ορύγματος και αν τα τοιχώματα του ορύγματος καταρρεύσουν, γίνεται εκ νέου διάνοιξη με ειδική κεφαλή η οποία ταυτόχρονα «τραβάει» τον αγωγό για να τον τοποθετήσει στη θέση του (DESFA, DSF-SPC-PIP-019, 2021).

Περισσότερες λεπτομέρειες για την κατασκευή διασταυρώσεων αγωγών φυσικού αερίου με τεχνικά έργα και υδάτινα ρεύματα δίνονται από τον ΔΕΣΦΑ στις Τεχνικές Προδιαγραφές Νο. DSF-SPC-PIP-016, Rev.1 – Crossings και Νο. DSF-SPC-PIP-019, Rev.1 – River and Ravine Crossings (DESFA, 2021).

Σημειώνεται ότι οι προδιαγραφές σχεδιασμού και κατασκευής του ΔΕΣΦΑ, ή άλλων επιχειρηματικών και επιστημονικών φορέων, καθορίζουν τα ελάχιστα προαπαιτούμενα και δεν υποκαθιστούν την ανάγκη εκπόνησης ολοκληρωμένης μελέτης για κάθε ξεχωριστή περίπτωση.

2.1.2 Περιστροφική ή Κρουστική Διάτρηση (Auger or Thrust Boring)

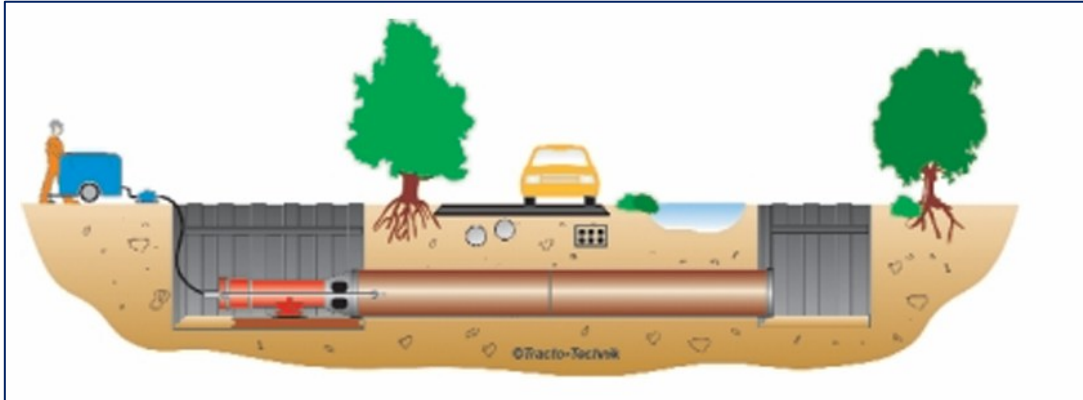
Οι μέθοδοι της περιστροφικής και της κρουστικής διάτρησης αποτελούν δύο από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους εγκατάστασης αγωγών χωρίς όρυγμα (trenchless techniques). Τεχνικά οι μέθοδοι χαρακτηρίζονται από τη χρήση εξωτερικών προστατευτικών σωλήνων (casing pipes), κατασκευασμένων συνήθως από χάλυβα, οι οποίοι προωθούνται οριζόντια στο επιθυμητό βάθος είτε μέσω αφαίρεσης του εδαφικού υλικού μπροστά από το σωλήνα (περιστροφική διάτρηση) είτε μέσω εκτόπισής του (κρουστική διάτρηση).

Η μέθοδος της περιστροφικής διάτρησης εφαρμόζεται για σωλήνες διαμέτρου μεταξύ 8 και 50 in (~0,20 και 1,27 m) και μήκη διασταυρώσεων μέχρι περίπου 76 m (Scheuble, 2004).

Η μέθοδος της κρουστικής διάτρησης μπορεί να εφαρμοστεί σε σωλήνες διαμέτρου έως και 4 m και για μήκη διασταυρώσεων μέχρι 80 m (Scheuble, 2004).

Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται εκατέρωθεν των διασταυρώσεων η κατασκευή φρεάτων εισόδου και εξόδου του αγωγού, τα οποία πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα ώστε

να εγκατασταθεί ο σχετικός εξοπλισμός και ένα μήκος σωλήνα μεταξύ 6 και 12 μέτρων, καθώς και να μπορέσει να απομακρυνθεί το αφαιρεθέν εδαφικό υλικό (βλ. Εικόνα 2.1 παρακάτω).



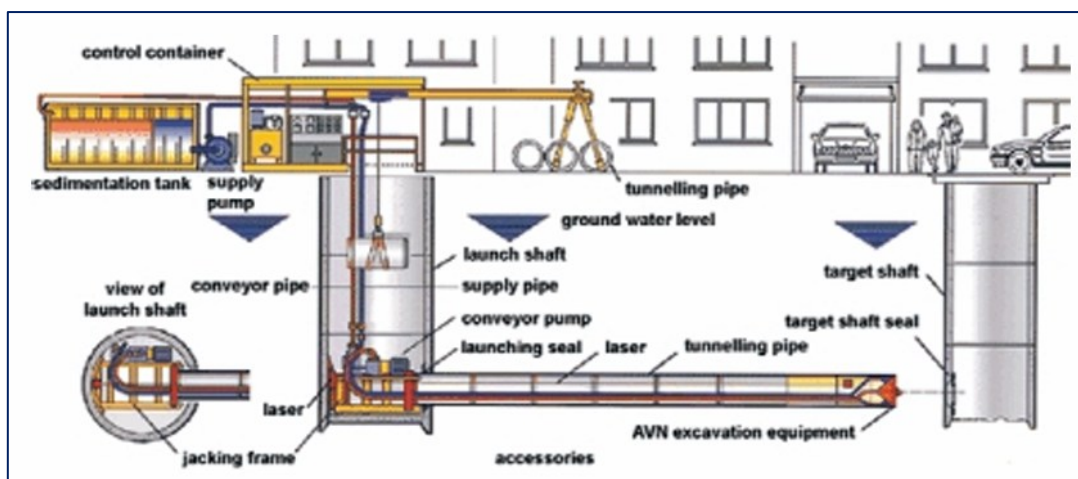
Εικόνα 2.1: Εγκατάσταση αγωγού με τη μέθοδο της κρουστικής διάτρησης (Scheuble, 2004)

Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του ΔΕΣΦΑ, για την κατασκευή του φρέατος εισόδου για σωλήνες ονομαστικής διαμέτρου DN 600 έως 1050 mm, απαιτείται πρόσθετη περιοχή διαστάσεων 40 m x 50 m ενώ για το φρέαρ εξόδου απαιτείται πρόσθετη περιοχή διαστάσεων 20 m x 30 m. Για σωλήνες μικρότερης ονομαστικής διαμέτρου, οι περιοχές αυτές μειώνονται σε 30 m x 30 m και 20 m x 30 m για τα φρέατα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα (DESFA, DSF-SPC-CIV-002, 2021).

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους μεταξύ τους, σημειώνεται ότι η μέθοδος της περιστροφικής διάτρησης ενδέχεται να προκαλέσει μεγαλύτερη διαταραχή του υπερκείμενου εδάφους και γι' αυτό απαιτείται πιο προσεκτική παρακολούθηση κατά την εφαρμογή της.

2.1.3 Η Τεχνική της Μικρο-σήραγγας (Microtunnelling)

Η τεχνική της μικρο-σήραγγας (microtunnelling) ανήκει και αυτή στις μεθόδους εγκατάστασης αγωγών χωρίς όρυγμα (trenchless techniques) και χρησιμοποιείται για το πέρασμα αγωγών κάτω από δρόμους, ποτάμια, σιδηροδρόμους και κτήρια (βλ. Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Η τεχνική της μικρο-σήραγγας (Scheuble, 2004)

Αρχικά η τεχνική της μικρο-σήραγγας αναπτύχθηκε ως μέθοδος για την εγκατάσταση σωλήνων ονομαστικής διαμέτρου 800 με 900 mm, μπορεί όμως πλέον να εγκαταστήσει σωλήνες διαμέτρου έως και 4 m. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η κατασκευή ενός φρέατος εκκίνησης και ενός φρέατος υποδοχής. Τυπικές διαμέτροι φρεάτων εκκίνησης και υποδοχής για την εγκατάσταση αγωγού ονομαστικής διαμέτρου 800 mm είναι τα 3,2 m και 2,0 m, αντίστοιχα. Τυπικό μήκος κομματιού σωλήνα προς εγκατάσταση είναι τα 2 m. Η τεχνική της μικρο-σήραγγας μπορεί να εφαρμοστεί για μήκος οδού μεταξύ 100 και 250 m χωρίς ενδιάμεσους σταθμούς, ενώ με ενδιάμεσους σταθμούς έχουν καταγραφεί οδεύσεις μέχρι και περίπου τα 3 km. Ένα χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτεί απαραίτητα τη χρήση προστατευτικών σωλήνων έξω από τον αγωγό μεταφοράς, εφόσον οι εδαφικές συνθήκες είναι ευνοϊκές και ο αγωγός είναι κατασκευασμένος από ανθεκτικό υλικό όπως ο χάλυβας και ο χυτοσίδηρος. Επίσης, στα πλεονεκτήματα της μεθόδου κατατάσσονται το ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση αγωγών διαμέσου σχεδόν κάθε εδαφικού σχηματισμού, σε περιοχές με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα, σε σημαντικά βάθη και σε περιοχές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος όσον αφορά την κατασκευή φρεάτων εισόδου και εξόδου. Τέλος, σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζονται σημαντικές καθιζήσεις στα υπερκείμενα εδάφη, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό όταν υπάρχουν και υπερκείμενες κατασκευές (Scheuble, 2004).

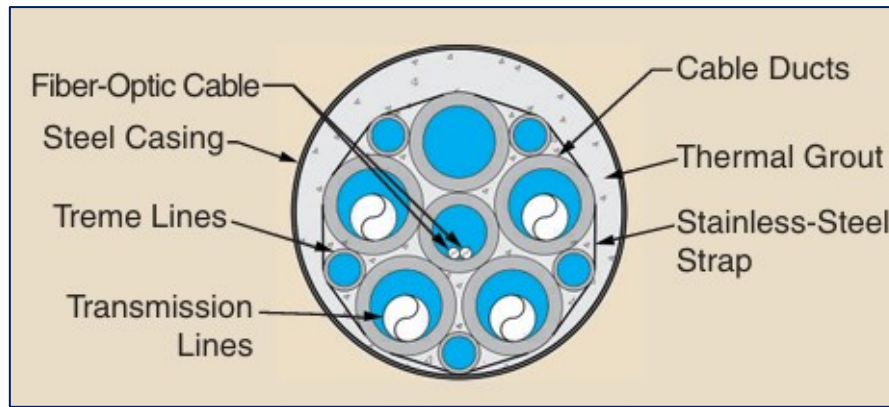
2.2 Η Μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (Horizontal Directional Drilling – HDD)

2.2.1 Ιστορική Ανασκόπηση

Η μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (HDD) αναπτύχθηκε ως μετεξέλιξη των κατακόρυφων γεωτρήσεων και φέρεται να χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για τη διασταύρωση αγωγού με ποταμό στην Καλιφόρνια το 1971 (Wiśniowski et al., 2020). Στη συνέχεια, η μέθοδος πέρασε από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στην Ευρώπη στα μέσα της δεκαετίας του 1980 (Scheuble, 2004), ενώ στην Ελλάδα, αν και δεν βρέθηκε επίσημη καταγραφή, θεωρείται ότι άρχισε να εφαρμόζεται τη δεκαετία του 1990 με την ανάπτυξη του δικτύου φυσικού αερίου της ΔΕΠΑ (μετέπειτα ΔΕΣΦΑ). Εξάλλου οι πρώτες τεχνικές προδιαγραφές εγκατάστασης σωληνογραμμών με τη μέθοδο HDD στην Ελλάδα εκπονήθηκαν για λογαριασμό της ΔΕΠΑ από την τεχνική εταιρεία ΑΣΠΡΟΦΟΣ το 2001.

Ανέκδοτες πληροφορίες αναφέρουν ως το πρώτο σημαντικό έργο εφαρμογής της μεθόδου τη διασταύρωση αγωγού φυσικού αερίου υψηλής πίεσης της ΔΕΠΑ (Κλάδος Κομοτηνής) με τον προστατευόμενο υδροβιότοπο του ποταμού Νέστου στη Βόρειο Ελλάδα, η οποία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε το 1999-2000 (Σπανίδης και Πρωτοπαππά, 2003). Περίπου δεκαπέντε χρόνια αργότερα, το 2014, υλοποιήθηκε ένα άλλο εντυπωσιακό έργο εφαρμογής της μεθόδου HDD, αυτό της διασταύρωσης αγωγού φυσικού αερίου υψηλής πίεσης του ΔΕΣΦΑ (Κλάδος Αγίων Θεοδώρων προς Μεγαλόπολη) με τη διώρυγα της Κορίνθου.

Πλέον η μέθοδος HDD εφαρμόζεται συχνά στην Ελλάδα για την εγκατάσταση αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων κάτω από υδάτινα ρεύματα (ποτάμια, χείμαρροι, ρυάκια, κ.λπ.) και έργα υποδομής όπως άλλοι αγωγοί, οδικά δίκτυα και σιδηροδρομικές γραμμές. Ομοίως και για την εγκατάσταση αγωγών ηλεκτρισμού υψηλής τάσης, οι οποίοι όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3, τοποθετούνται εντός προστατευτικών σωλήνων.



Εικόνα 2.3: Τυπική διατομή αγωγών καλωδίων υψηλής τάσης σε προστατευτικούς σωλήνες (Smith III, 2023)

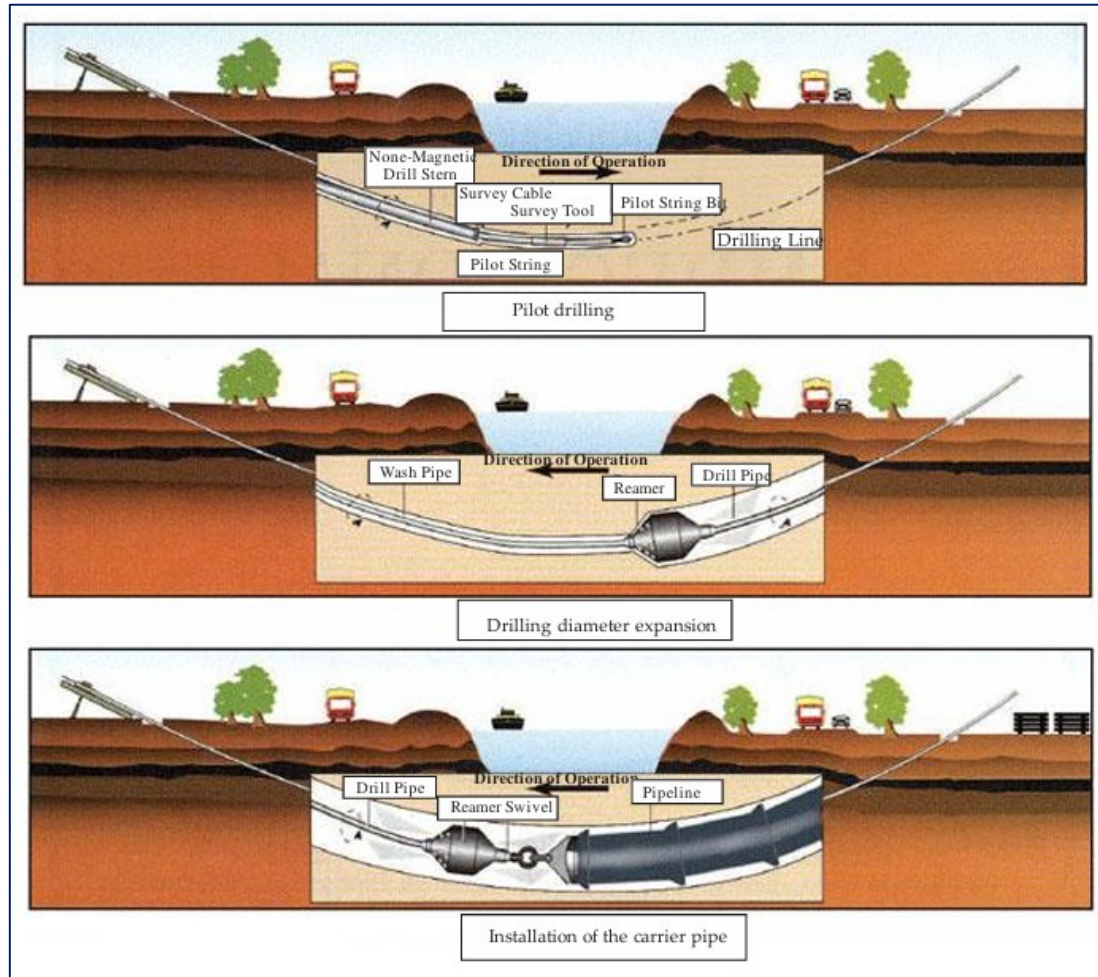
2.2.2 Περιγραφή της Μεθόδου

Η Οριζόντια Κατευθυνόμενη Διάτρηση εκτελείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, ξεκινώντας από την περιοχή εισόδου και με τη χρήση διατρητικής κεφαλής, γίνεται διάνοιξη πιλοτικής οπής, μικρότερης της τελικά απαιτούμενης, κατά μήκος της προδιαγεγραμμένης όδευσης του αγωγού. Στη δεύτερη φάση, ξεκινώντας από την περιοχή εξόδου, γίνεται διεύρυνση της πιλοτικής οπής στην απαιτούμενη διάμετρο με τη χρήση ειδικού εργαλείου διεύρυνσης (reamer) και ταυτόχρονη έλκυση των σωλήνων του αγωγού (ή των σωλήνων προστασίας του καλωδίου) προς την περιοχή εισόδου (DESFA, DSF-SPC-CIV-018, 2021). Ενίοτε, σε περιπτώσεις που απαιτείται η διάνοιξη οπής μεγάλης διαμέτρου, η μέθοδος HDD μπορεί να εκτελεστεί σε τρία ή και περισσότερα περάσματα: πιλοτική οπή, πρώτη διεύρυνση και δεύτερη διεύρυνση με έλκυση του αγωγού. Γι' αυτό το λόγο σε πολλές βιβλιογραφικές αναφορές γίνεται λόγος για τρεις φάσεις: διάνοιξη πιλοτικής οπής, διεύρυνση της οπής έως ότου επιτευχθεί η απαιτούμενη διάμετρος και τέλος έλκυση των σωλήνων του αγωγού στην θέση τους (CAPP, 2004; Arumsari & Tanuwijaya, 2009).

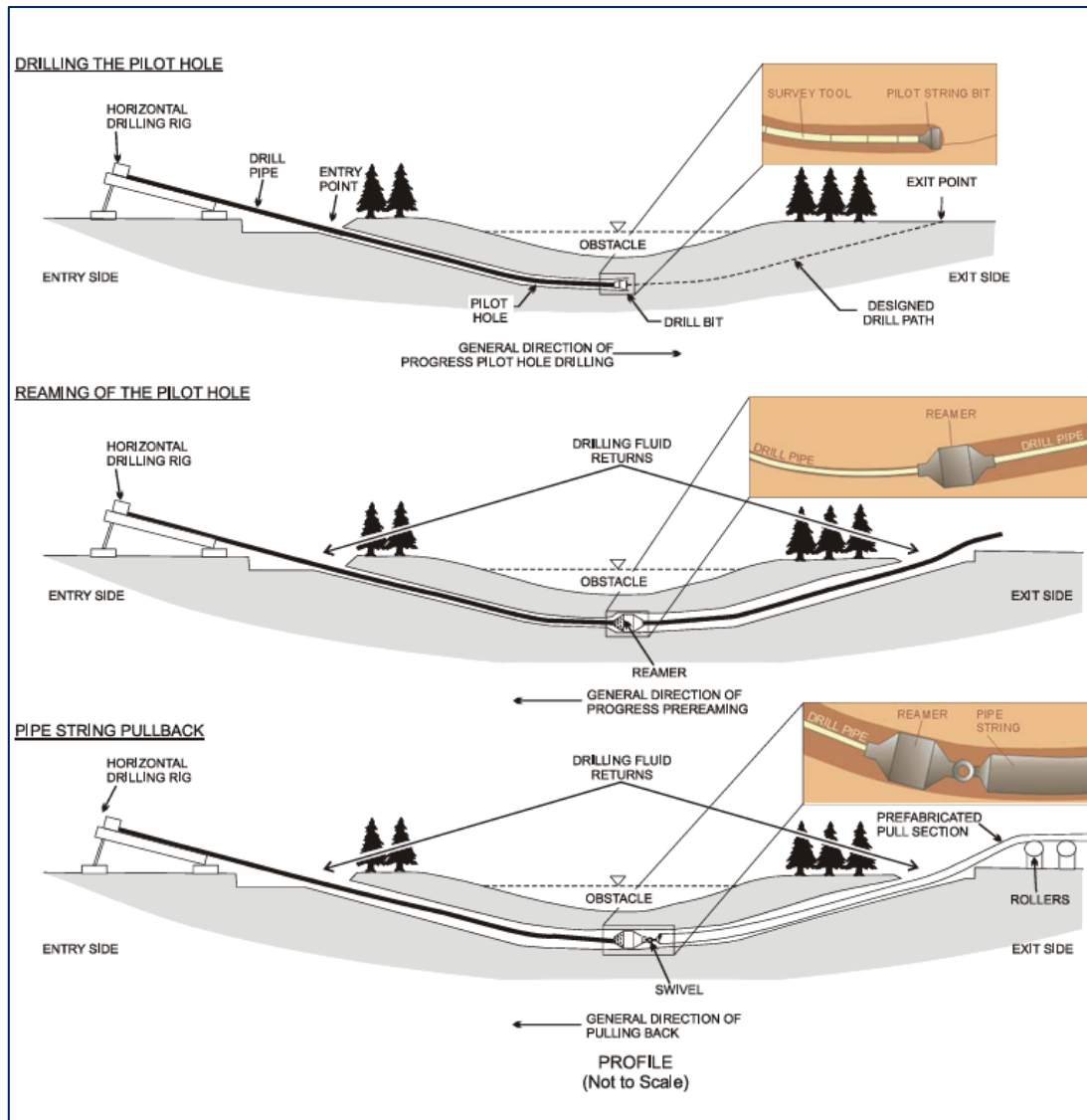
Για τη διασφάλιση της ορθής πορείας της διατρητικής κεφαλής, σύμφωνα με την εκάστοτε εγκεκριμένη όδευση, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης, καταγραφής και καθοδήγησης όπως για παράδειγμα ένας εντοπιστής σήματος DCI (Depth Confirmation & Instruction) με σύστημα βαθείας αναμετάδοσης (DESFA, DSF-SPC-CIV-018, 2021).

Για την αποφυγή περιστροφής των σωλήνων κατά τη διάρκεια έλκυσης, ανάμεσα στην κεφαλή διάτρησης και την άκρη του σωλήνα χρησιμοποιείται ένας στρεφόμενος

κρίκος (swivel). Σχηματικές απεικονίσεις της μεθόδου παρατίθενται ως Εικόνες 2.4 και 2.5 παρακάτω.



Εικόνα 2.4: Στάδια εφαρμογής της μεθόδου HDD (Kwast-Kotlarek, Heldak & Szczepański, 2018)



Εικόνα 2.5: Στάδια εφαρμογής της μεθόδου HDD (CAPP, 2004)

Καθ' όλη τη διαδικασία χρησιμοποιείται λασπώδες υγρό γεώτρησης (drilling fluid) ή διαφορετικά, λάσπη γεώτρησης, το οποίο αποτελείται από μείγμα μπετονίτη και νερού και αποσκοπεί μεταξύ άλλων στην σταθεροποίηση της οπής, τη μείωση της τριβής, την ψύξη και λίπανση της διατρητικής κεφαλής, καθώς και την απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής. Σε πολύ διαπερατούς εδαφικούς σχηματισμούς, όπως χάλικες και κατακερματισμένοι βράχοι, χρησιμοποιούνται βελτιωτικά πρόσθετα στο μείγμα μπετονίτη/νερού για την αποφυγή διαρροής του λασπώδους υγρού στο γύρω περιβάλλον (Scheuble, 2004). Το λασπώδες υγρό συγκεντρώνεται σε ειδικές δεξαμενές ή φρέατα στα σημεία εισόδου και εξόδου, κι αφού διηθηθούν τα προϊόντα εκσκαφής και ρυθμιστεί η αναλογία νερού/μπετονίτη επανακυκλοφορεί στο σύστημα μέσω των στελεχών διάτρησης και επαναχρησιμοποιείται (Kwast-Kotlarek et al., 2018).

Κατά τη διάρκεια εγκατάστασης αγωγού μεγάλης διαμέτρου, η άνωση του σωλήνα μπορεί να είναι αρκετά σημαντική, απαιτώντας μεγάλη ισχύ μηχανής για την έλκυσή του και με κίνδυνο να τραυματιστεί η εξωτερική προστατευτική επένδυση (coating) του αγωγού από την τριβή του με τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων προβλέπεται η χρήση συστημάτων ελέγχου της άνωσης, με το πιο απλό να αποτελείται από την εισαγωγή ενός μικρότερης διαμέτρου πλαστικού σωλήνα HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας) εντός του σωληναγωγού, ο οποίος γεμίζει ελεγχόμενα με νερό εξισορροπώντας έτσι τις ανυψωτικές τάσεις και μειώνοντας την τριβή που ασκείται από το έδαφος στην εξωτερική επιφάνεια του εγκαθιστώμενου σωλήνα.

Ένα πρόσθετο μέτρο που λαμβάνεται για τη μείωση του τραυματισμού της εξωτερικής προστατευτικής επένδυσης του εγκαθιστώμενου σωληναγωγού είναι η τοποθέτηση του πάνω σε κυλίνδρους/ράουλα (rollers) στην πλευρά από την οποία εγκαθίσταται (βλ. Εικόνες 2.4 και 2.5) (Hair, 1995; CAPP, 2004; DESFA, DSF-SPC-CIV-018, 2021).

Σχετικά με την απαιτούμενη επιφάνεια εργασίας στις περιοχές εισόδου και εξόδου του αγωγού, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του ΔΕΣΦΑ, οι ελάχιστες διαστάσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθόδου HDD είναι αρκετά διαφορετικές σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους καθώς καθορίζονται από το μήκος της διάτρησης, τη διάμετρο του αγωγού και τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσα από τους οποίους θα περάσει (DESFA, DSF-SPC-CIV-002, 2021). Οι ελάχιστες διαστάσεις των περιοχών εργασίας βάσει της προδιαγραφής δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1: Ελάχιστες Διαστάσεις Περιοχών Εργασίας Εισόδου/Εξόδου στην HDD (DESFA, 2021)

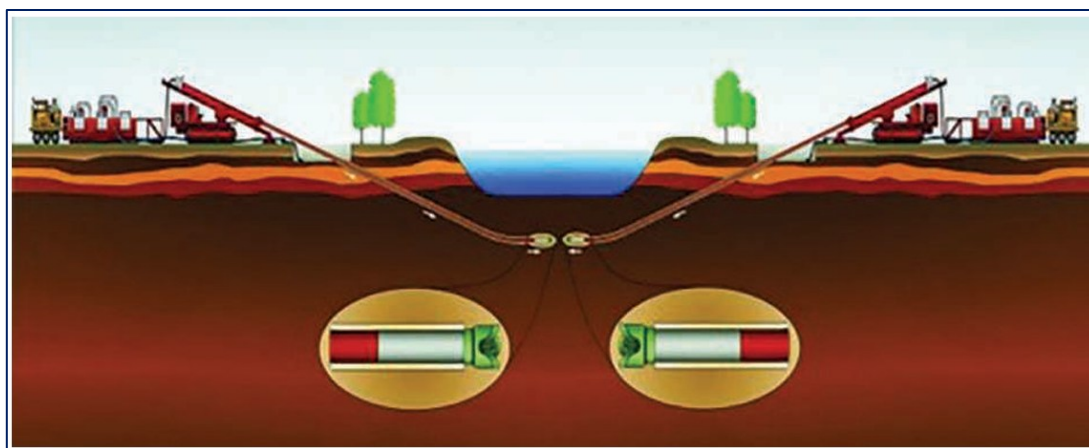
Περιοχή	Μικρή Διασταύρωση	Μέση Διασταύρωση	Μεγάλη Διασταύρωση
Εισόδου (Μηχάνημα)	20 m x 30 m	50 m x 50 m	70 m x 100 m
Εξόδου (Σωλήνες)	Δεν καθορίζεται, αλλά μπορεί να θεωρηθεί περίπου 15 m x 30 m	15 m x 30 m	έως 30 m x 50 m

Για την περιοχή εξόδου σημειώνεται στην ίδια τεχνική προδιαγραφή του ΔΕΣΦΑ ότι, κατά τον σχεδιασμό, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι το καλάμι του σωλήνα που πρόκειται να εγκατασταθεί (pipe string) πρέπει να κατασκευαστεί έτσι ώστε να τραβηχτεί ως ένα ενιαίο μήκος και, όπου είναι εφικτό, χωρίς οριζόντιες καμπύλες.

2.2.3 Χρήση της Μεθόδου

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος HDD χρησιμοποιείται πλέον ευρέως στην Ελλάδα για την εγκατάσταση αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων και καλωδίων υψηλής τάσης κάτω από φυσικά εμπόδια όπως τα υδάτινα ρεύματα και κάτω από έργα υποδομής όπως άλλοι αγωγοί/καλώδια, δρόμοι και σιδηροδρομικές γραμμές.

Η μέθοδος HDD χρησιμοποιείται τόσο για μικρές όσο και μεγάλες διαμέτρους σωλήνων (από 50 mm έως 1.422 mm σύμφωνα με την Krechowicz, 2021) και για σωλήνες ποικίλων υλικών όπως πλαστικό, χάλυβας και χυτοσίδηρος (Scheuble, 2004). Αναφορικά με το μήκος εφαρμογής, αναλόγως της διαμέτρου του σωλήνα, των εδαφικών συνθηκών της όδευσης και του τύπου διατρητικού μηχανήματος μπορεί να φτάσει τα 2.900 m (Kwast-Kotlarek et al., 2018), ενώ μια σχετικά πρόσφατη τροποποίηση της μεθόδου, η HDD Intersecting, η οποία απεικονίζεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.6), μπορεί να φτάσει σε ακόμη μεγαλύτερα μήκη (Smith III, 2023).



Εικόνα 2.6: Η μέθοδος “HDD Intersecting” (Smith III, 2023)

Τα διατρητικά μηχανήματα που χρησιμοποιούνται κατατάσσονται σε τρεις (3) κατηγορίες με βάση την ισχύ τους: Maxi-HDD, Midi-HDD και Mini-HDD. Τα βάθη εγκατάστασης που επιτυγχάνονται με αυτά τα μηχανήματα ξεκινούν από 0,6 m με το Mini-HDD και φτάνουν τα 60 m με το Maxi-HDD (Baik, Abraham & Gokhale, 2003).

Αναφορικά με την καταλληλότητα της μεθόδου HDD για διάφορες εδαφικές συνθήκες, σημειώνεται ότι δεν φαίνεται να περιορίζεται από την ύπαρξη υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, ενώ είναι εφαρμόσιμη τόσο σε μαλακά όσο και σε βραχώδη εδάφη, με την προσαρμογή κατάλληλης διατρητικής κεφαλής. Είναι σημαντικό όμως να αναφερθεί ότι, όπως αναγράφεται και στις τεχνικές προδιαγραφές του ΔΕΣΦΑ, οι αγωγοί που εγκαθίστανται με HDD πρέπει να έχουν προστατευτική επένδυση (coating) αυξημένου πάχους και αντοχής έναντι τριβής (DESFA, DSF-SPC-CIV-018, 2021).

2.2.4 Πλεονεκτήματα

Ανάμεσα στα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου HDD συγκαταλέγονται τα εξής: ακρίβεια τοποθέτησης των αγωγών, σύντομοι κατασκευαστικοί χρόνοι, υψηλή προσαρμοστικότητα στο εκάστοτε γεωλογικό στρώμα, μεγάλα μήκη αποστάσεων και χαμηλό κόστος κατασκευής (Wan, Jiang, Xia, Li & Li, 2021).

Σύμφωνα με τον Scheuble (2004) η μέθοδος HDD έχει μικρότερη επίδραση στη φύση και στο περιβάλλον από οποιαδήποτε μέθοδο ανοιχτής εκσκαφής και χρησιμοποιείται εκεί που οι άλλες μέθοδοι είτε είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθούν είτε έχουν σημαντικά μεγάλο κόστος. Επίσης είναι ιδιαίτερος προτιμητέα σε υποθαλάσσιες διασυνδέσεις.

Η Gierczak (2014) καταγράφει στα πλεονεκτήματα της μεθόδου HDD τη μεγάλη ποικιλία εμποδίων που μπορούν να παρακαμφθούν με τη χρήση της, όπως π.χ. ποτάμια, αυτοκινητόδρομοι ταχείας κυκλοφορίας, διάδρομοι προσγείωσης-απογείωσης, περιοχές με πυκνή δόμηση ή υπόγεια δίκτυα κοινής ωφέλειας και περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Πάνω σε αυτό οι Aboumasoudi και Behvandi (2019) συμπληρώνουν ότι, εκτός από τα εμπόδια που παρακάμπτει, η μέθοδος HDD είναι ιδανική γιατί δεν απαιτεί την εκσκαφή μεγάλων σε μήκος φρεατίων και δεν παρεμβαίνει ιδιαίτερα στην τοπική κυκλοφορία. Επίσης σημειώνουν ότι η παρακολούθηση της διάνοιξης της αρχικής γεώτρησης και η διόρθωση της πορείας της σε περίπτωση που αυτή παρεκκλίνει είναι πολύ πιο εύκολη με τη μέθοδο HDD από ότι είναι σε άλλες μεθόδους όπως η κρουστική διάτρηση.

Άλλα εξίσου σημαντικά πλεονεκτήματα που καταγράφονται στη βιβλιογραφία είναι ότι η μέθοδος HDD δεν έχει σημαντικό κόστος αποκατάστασης της περιοχής μετά την εφαρμογή της (Krechowicz, 2021) και ότι έχει μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τις μεθόδους ανοιχτής εκσκαφής (Krechowicz & Krechowicz, 2021).

Συνοψίζοντας τα προαναφερθέντα, αλλά και με βάση την εμπειρία, τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου HDD είναι τα εξής:

- Τεχνικά:
 - Παρακάμπτει μεγάλη ποικιλία φυσικών και τεχνητών εμποδίων όπως: ποτάμια, αυτοκινητόδρομοι ταχείας κυκλοφορίας, διάδρομοι προσγείωσης-απογείωσης, περιοχές με πυκνή δόμηση ή υπόγεια δίκτυα κοινής ωφέλειας και περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.
 - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σημαντικά μήκη διασταυρώσεων.
 - Είναι κατάλληλη για ποικίλους εδαφικούς σχηματισμούς και στάθμη υδροφόρου ορίζοντα.
 - Έχει σύντομους κατασκευαστικούς χρόνους.
- Περιβαλλοντικά:
 - Έχει μικρότερη επίδραση στο φυσικό περιβάλλον σε σχέση με τη μέθοδο ανοιχτής εκσκαφής.
 - Έχει μειωμένες απαιτήσεις αποκατάστασης της περιοχής μετά το πέρας του έργου.
- Κοινωνικά:
 - Έχει τη μικρότερη όχληση στους περίοικους και στους χρήστες των δικτύων μεταφορών.
 - Μεγαλύτερη ασφάλεια εργαζομένων και κοινού κατά την κατασκευή καθώς το μήκος των ανοιχτών σκαμμάτων κατά μήκος της όδευσης του αγωγού είναι πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος της όλης όδευσης.
- Οικονομικά: Φαίνεται να είναι οικονομικότερη από άλλες μεθόδους μη ανοιχτής εκσκαφής όπως π.χ. η τεχνική της μικρο-σήραγγας.
- Αδειοδοτικά:
 - Επειδή έχει μικρή επίδραση στο περιβάλλον, είναι πιο εύκολο να επιτευχθεί περιβαλλοντική αδειοδότηση σε προστατευόμενες περιοχές και υδροβιότοπους.

2.2.5 Μειονεκτήματα και Περιορισμοί της Μεθόδου

Πολλοί ερευνητές συγκαταλέγουν το συγκρίσιμο κόστος της HDD με αυτό των μεθόδων ανοιχτής εκσκαφής ως ένα από τα πλεονεκτήματά της. Αυτό όμως ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα υπάρξουν σημαντικά προβλήματα κατά την εφαρμογή της. Αντιθέτως αστοχίες κατά την εφαρμογή της HDD, όπως καταστροφή της διατρητικής κεφαλής ή αναγκαστική εγκατάλειψή της μαζί με τα στελέχη διάτρησης εντός της γεώτρησης, μπορούν να εκτινάξουν σημαντικά το κόστος καθώς πρόκειται για ακριβό εξοπλισμό προς αντικατάσταση (Krechowicz, 2021).

Επίσης, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.1 παραπάνω, απαιτούνται σχετικά μεγάλες επιφάνειες εργασίας για την ανάπτυξη του εργοταξίου και του εξοπλισμού εκατέρωθεν της όδευσης της HDD.

Εξάλλου στα μειονεκτήματα της μεθόδου κατατάσσονται και αρκετοί από τους ειδικούς κινδύνους της, όπως περιγράφονται παρακάτω στην Ενότητα 2.4 – Κίνδυνοι και Αστοχίες της HDD.

2.2.6 Σχεδιασμός – Προγραμματισμός Έργου

Όπως ισχύει για όλα τα είδη έργων, έτσι και για τα έργα της μεθόδου HDD απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός, προγραμματισμός και διαχείριση. Με την κάλυψη του αντικειμένου έχουν ασχοληθεί αρκετοί οργανισμοί και ειδικοί του χώρου, όπως για παράδειγμα οι Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP) (2004) και ο Hair, J. D. (1995). Σταχυολογώντας τις οδηγίες που έχουν εκδοθεί, αναγράφονται παρακάτω τα βασικότερα σημεία που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου:

- Αδειοδοτικοί και κανονιστικοί περιορισμοί
- Γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράγοντες
- Μορφολογία εδάφους
- Πρόσβαση και επάρκεια χώρου για την ανάπτυξη του εργοταξίου εκατέρωθεν της διάτρησης
- Περιβαλλοντικές συνθήκες και περιβαλλοντικοί περιορισμοί
- Τεχνικοί/τεχνολογικοί περιορισμοί
- Οικονομικοί παράγοντες

- Γεωμετρία προβλήματος και σχετικοί περιορισμοί
- Μέθοδος κατασκευής και κατασκευαστικοί περιορισμοί
- Τύπος εργολαβικής σύμβασης και συμβατικοί όροι
- Διαχείριση κινδύνου.

Ειδικότερα όσον αφορά τη γεωμετρία του προβλήματος, κατά τη φάση σχεδιασμού είναι πολύ σημαντικό να καθοριστούν με επιτυχία τα εξής:

- Όδευση διάτρησης
- Γωνία εισόδου και εξόδου (~6 με 15°, Scheuble, 2004; Empire Generating Co, LLC, 2008)
- Ακτίνα καμπυλότητας
- Πάχος εδαφικής κάλυψης (κατ' ελάχιστον από 1,2 m έως 4,5 m, ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού, Latorre, Wakeley & Conroy, 2002)
- Διάμετρος διάτρησης σε σχέση με τη διάμετρο του σωλήνα.

2.3 Διαχείριση Κινδύνου στα Τεχνικά Έργα

Το αντικείμενο της Διαχείρισης Τεχνικών Έργων (ή έργων γενικότερα), εκτός από το παραδοσιακό τρίγωνο διαχείρισης κόστους-χρόνου-ποιότητας περιλαμβάνει και το αντικείμενο του “risk management” το οποίο μεταφράζεται στην ελληνική βιβλιογραφία είτε ως «διαχείριση κινδύνου» είτε ως «διαχείριση της διακινδύνευσης». Άλλωστε, σύμφωνα με το πρότυπο διαχείρισης έργων “Project Management Body of Knowledge” (PMBOK®) (PMITM, 2025) υπάρχουν επτά (7) αλληλοσυνδεόμενοι βασικοί τομείς διαχείρισης και παρακολούθησης της απόδοσης (ή διαφορετικά επιτυχίας) ενός έργου, οι οποίοι αφορούν: τη διακυβέρνηση, το αντικείμενο (συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας), το χρονοδιάγραμμα, τα οικονομικά, τα ενδιαφερόμενα μέρη, τους πόρους και τους κινδύνους.

Η σπουδαιότητα της διαχείρισης κινδύνου στα τεχνικά έργα οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε κίνδυνος που δεν αντιμετωπίζεται μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς τα αντικείμενα των υπόλοιπων έξι (6) τομέων διαχείρισης καθώς οι αρνητικές επιπτώσεις εμφανίζονται συνήθως στο κόστος, στο χρονοδιάγραμμα, στην ποιότητα του έργου, στο περιβάλλον, στην ασφάλεια των εργαζομένων και στην ασφάλεια ή/και στην ευημερία του πληθυσμού πλησίον του έργου. Αυτό σημαίνει επίσης ότι σε εξαιρετικά

σοβαρές περιπτώσεις δύναται να επηρεαστεί ακόμη και η υλοποίηση ή όχι του ίδιου του έργου (Graham, 2009). Για το λόγο αυτό η διαδικασία διαχείρισης κινδύνου έχει διερευνηθεί διεξοδικά από ειδικούς του αντικειμένου και έχει συμπεριληφθεί στα σύγχρονα πρότυπα διαχείρισης έργων και ανάπτυξης σχετικών δεξιοτήτων, όπως το PMBOK® (2025) του Project Management Institute (PMI™) και το “International Competence Baseline” (ICB®) (2015) του International Project Management Association (IPMA®). Σημειώνεται επιπλέον η ύπαρξη των κάτωθι προτύπων ISO για την ανάλυση, αξιολόγηση και διαχείριση κινδύνου στους οργανισμούς:

- ISO 31000:2018 – Risk Management - Guidelines
- IEC 31010:2019 – Risk Management - Risk Assessment Techniques

Η διαδικασία διαχείρισης κινδύνου σύμφωνα με το πρότυπο διαχείρισης κινδύνου ISO 31000:2018 και με τα πρότυπα διαχείρισης έργων όπως το ICB® (IPMA®, 2015) και το PMBOK® (PMI™, 2025) περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Εντοπισμός και καταγραφή των κινδύνων
- Αξιολόγηση της πιθανότητας να λάβουν χώρα οι κίνδυνοι
- Αξιολόγηση της σοβαρότητας των επιπτώσεών τους
- Αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων και επιλογή στρατηγικής για τη διαχείριση των κινδύνων με στόχο την εκπόνηση σχεδίου διαχείρισης
- Παρακολούθηση και αξιολόγηση των μέτρων διαχείρισης.

2.3.1 Κατηγοριοποίηση Κινδύνων

Για τον εντοπισμό και την καταγραφή των κινδύνων ενός έργου συνιστάται ως πρώτο βήμα η καταγραφή των γενικών κατηγοριών που θα εξεταστούν. Ενώ η κατηγοριοποίηση των κινδύνων αποτελεί επιλογή του ατόμου ή της ομάδας που θα κάνει την ανάλυση κινδύνου, μια αρκετά διαδεδομένη κατηγοριοποίηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αφετηρία είναι και η PESTLE (political, economic, sociological, technological, legal and environmental). Συνεπώς βάσει της PESTLE οι κίνδυνοι κατατάσσονται και αναλύονται σε πολιτικούς, οικονομικούς, κοινωνικούς, τεχνολογικούς, νομικούς και περιβαλλοντικούς (Graham, 2009; IEC, 2019; IPMA®, 2015; PMI™, 2025). Στη συνέχεια οι εν λόγω κατηγορίες μπορεί να αναλυθούν σε

περαιτέρω υποκατηγορίες, όπως ενδεικτικά φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες Κινδύνων Τεχνικών Έργων

Κατηγορία	Υποκατηγορία
Πολιτικοί	Ασταθές πολιτικό περιβάλλον Πολιτικές σκοπιμότητες Γεωπολιτικοί κίνδυνοι
Οικονομικοί	Ελλιπής χρηματοδότηση Υψηλά επιτόκια δανεισμού Πληθωρισμός Υποεκτίμηση κόστους έργου/προϋπολογισμού
Κοινωνικοί	Αντίδραση τοπικών κοινοτήτων, περιβαλλοντικών ομάδων, Μη Κυβερνητικών Οργανώσεων (ΜΚΟ) κ.λπ. Ασφάλεια και Υγεία εργαζομένων και γενικού πληθυσμού Οργανωτικοί/διαχειριστικοί Ανθρώπινο λάθος
Τεχνολογικοί	Τεχνικοί Κατασκευαστικοί Μηχανολογικοί
Νομικοί	Αλλαγή νομοθετικού πλαισίου Αδειοδοτικοί Συμβατικοί
Περιβαλλοντικοί*	Περιβαλλοντικοί Γεωλογικοί/Γεωτεχνικοί Φυσικοί

*Σημειώνεται ότι με αυτό τον όρο γίνεται αναφορά στο ευρύτερο περιβάλλον του έργου.

2.3.2 Στρατηγικές Διαχείρισης Κινδύνου

Για την επιτυχημένη διαχείριση των κινδύνων σε ένα έργο απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη στρατηγικής. Σύμφωνα με το ISO 31000:2018 και με πρότυπα διαχείρισης έργων όπως το ICB[®] (IPMA[®], 2015) και το PMBOK[®] (PMI[™], 2025) οι βασικές στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου είναι οι εξής:

- Αποφυγή του κινδύνου με κατάργηση της δραστηριότητας που τον επιφέρει, εξάλειψη της πηγής του κινδύνου ή ακόμη και ακύρωση του έργου.

- Διαμοιρασμός της διακινδύνευσης με τρίτο μέρος (π.χ. μέσω της Σύμβασης του Έργου ή μέσω ασφάλισης κινδύνου).
- Μείωση της πιθανότητας να συμβεί το γεγονός του κινδύνου ή/και άμβλυνση των επιπτώσεών του.
- Αποδοχή του κινδύνου ή της διακινδύνευσης έπειτα από τεκμηριωμένη απόφαση.

2.4 Κίνδυνοι και Αστοχίες της HDD

Βάσει των διαθέσιμων πηγών για την εκπόνηση αυτή της διπλωματικής, φαίνεται ότι οι αρχικές έρευνες επάνω στους κινδύνους της μεθόδου HDD επικεντρώθηκαν σε αυτούς που σχετίζονται με τις εδαφικές συνθήκες, δηλαδή τους γεωλογικούς και γεωτεχνικούς κινδύνους.

Οι Baik et al. (2003) αναφέρουν ότι στις διασταυρώσεις HDD που χρησιμοποιείται *mid*i ή *max*i HDD εξοπλισμός, οι δυνάμεις στα τοιχώματα της διάτρησης είναι τέτοιες που μπορεί να προκαλέσουν είτε ανύψωση του υπερκείμενου εδάφους είτε καθίζηση λόγω χαλάρωσης/διάβρωσης του εδάφους και δημιουργία κενών.

Ο Kruze (2009) αιτιολογεί το αυξημένο βάρος που δίδεται στις εδαφικές συνθήκες λέγοντας πως από τους τρεις παράγοντες που κρίνουν την επιτυχία ενός έργου HDD, δηλαδή τον εξοπλισμό HDD, το λασπώδες υγρό γεώτρησης και την στρωματογραφία του εδάφους συμπεριλαμβανομένης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, οι δύο πρώτοι εξαρτώνται από τον τρίτο. Συνεπώς καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η γνώση των μηχανικών και χημικών χαρακτηριστικών του εδάφους, του υπόγειου ύδατος και του τρόπου με τον οποίο αυτά επηρεάζουν τη διαδικασία διάτρησης είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτίμηση διακινδύνευσης της μεθόδου.

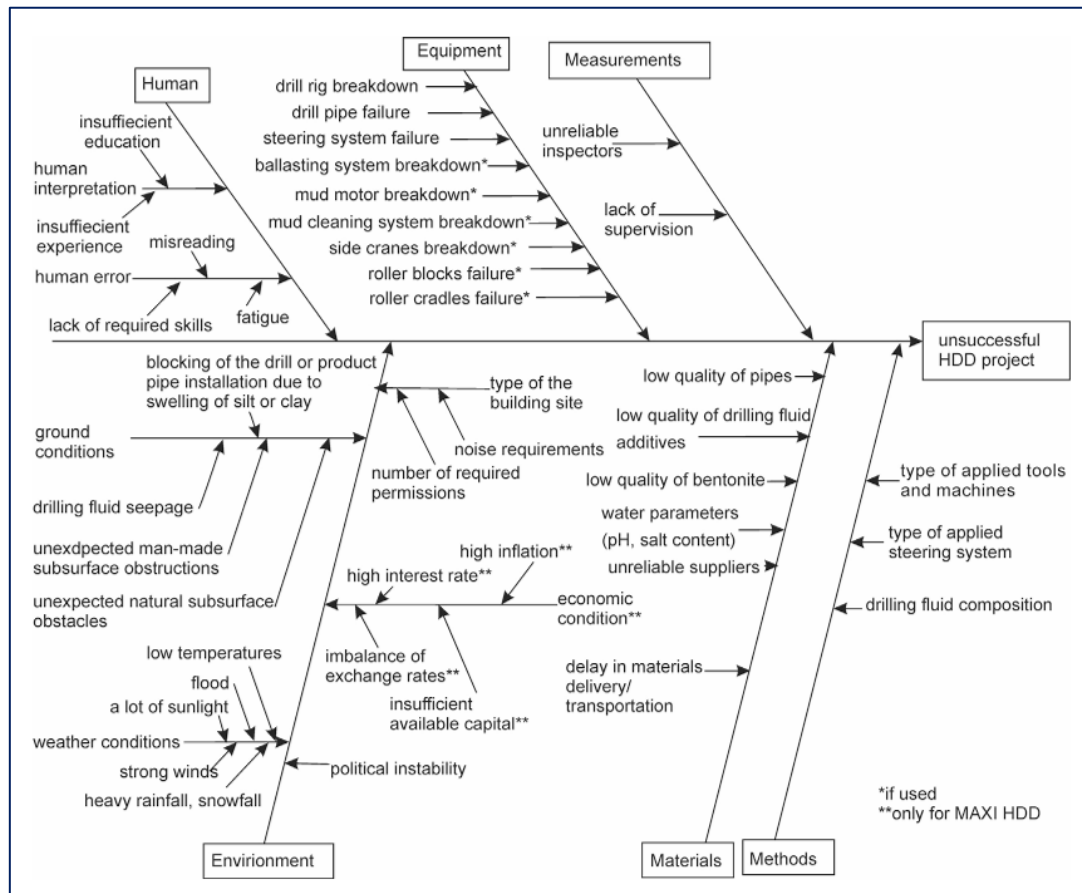
Αναφορικά με τους αντίστοιχους κινδύνους, ο Kruze (2009) σημειώνει ότι μια ενδελεχής παρουσίαση όλων των εδαφικών/γεωτεχνικών κινδύνων θα ήταν ιδιαίτερα μακροσκελής γι' αυτό και επικεντρώνει την έρευνά του στους τρεις πιο συχνά εμφανιζόμενους: απαίτηση υψηλών δυνάμεων έλκυσης ή αποτυχία έλκυσης λόγω αστάθειας των τοιχωμάτων της γεώτρησης, απαίτηση υψηλών δυνάμεων έλκυσης ή αποτυχία έλκυσης λόγω υψηλής τριβής στα τοιχώματα της γεώτρησης και διαρροή του λασπώδους υγρού μέσω της γεώτρησης στην επιφάνεια του εδάφους. Αφού παρουσιάζει τα συχνότερα αίτια εμφάνισης καθενός από τους κινδύνους, ο Kruze

κλείνει τη μελέτη του με οκτώ βασικά μέτρα για τη μείωση της διακινδύνευσης εκ των οποίων έξι μπορούν να ληφθούν κατά τη φάση σχεδιασμού του έργου και δύο κατά τη φάση εκτέλεσης.

Λίγα χρόνια αργότερα, σε μια προσπάθεια να εκτιμηθεί ποιοτικά και να καταγραφεί το ευρύτερο σύνολο των κινδύνων της HDD, δηλαδή να καταγραφούν όχι μόνο οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το έδαφος αλλά και αυτοί που σχετίζονται με τον εξοπλισμό και τα μηχανήματα, η Gierczak (2014) διεξάγει σχετική έρευνα σε κατασκευαστές εξοπλισμού και εργοληπτικές εταιρείες που εκτελούν έργα HDD σε πέντε (5) διαφορετικές χώρες (Πολωνία, Γαλλία, Ολλανδία, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και Γερμανία). Από δεδομένα που συλλέχθηκαν από μια δεξαμενή 5.940 έργων τα οποία εκτελέστηκαν μεταξύ 2011 και 2012 με χρήση Maxi, Midi και Mini HDD, καθώς και από συμπληρωματικές συνεντεύξεις με εργολάβους, η Gierczak (2014) καταλήγει σε τριάντα οκτώ (38) βασικούς κινδύνους, τους οποίους ομαδοποιεί σε επτά (7) κατηγορίες: λάθη σχεδιασμού, προβλήματα με τον εξοπλισμό, γεωτεχνικά προβλήματα, προβλήματα εφοδιαστικής αλυσίδας, ποιότητας υλικών και νομικών συνθηκών στην HDD, κατασκευαστικά προβλήματα, προβλήματα σχετιζόμενα με το περιβάλλον και την ασφάλεια, καθώς και οικονομικά προβλήματα. Ταυτόχρονα παρέχει μια σχετική εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης του καθενός από τους 38 κινδύνους σε ένα έργο HDD, καθώς και μια σχετική εκτίμηση των δυνητικών επιπτώσεών τους. Τέλος, η έρευνα καταλήγει σε μια ποιοτική εκτίμηση των κινδύνων με τη βοήθεια ενός διαγράμματος ψαροκόκαλου ή διαφορετικά διαγράμματος Ishikawa (βλ. Σχήμα 2.1).

Συνεχίζοντας την προηγούμενη εργασία της σχετικά με την ποιοτική εκτίμηση των κινδύνων της μεθόδου HDD, η Gierczak (2014) εκπονεί σε επόμενη εργασία της ποσοτική μελέτη εκτίμησης διακινδύνευσης της HDD κατά την εγκατάσταση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας με ανάλυση δένδρου σφάλματος με ασαφή δεδομένα. Στην εργασία αυτή οι κίνδυνοι κατατάσσονται σε τέσσερις (4) βασικές κατηγορίες: περιβαλλοντικοί, γεωτεχνικοί, διαχειριστικοί και κίνδυνοι που σχετίζονται με τον εξοπλισμό. Εξετάζοντας τη δουλειά άλλων ερευνητών, όπως μια μελέτη που δημοσιεύτηκε το 2010 από τους Abdelgawad et al., η Gierczak κατέγραψε ως μη εντοπισμένους αλλά σημαντικούς κινδύνους τους εξής: λάθη κατά τη φάση σχεδιασμού, καθυστερήσεις κατά την εγκατάσταση των σωλήνων, απρόβλεπτα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, διάφορα κατασκευαστικά προβλήματα, προβλήματα προμηθειών,

υλικών και ποιότητας, νομικούς όρους και οικονομικά προβλήματα. Στο σύνολό τους κατέγραψε 22 διαφορετικούς κινδύνους, τις επιπτώσεις τους, και τους παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο διακινδύνευσης.



Σχήμα 2.1: Ποιοτική εκτίμηση κινδύνων HDD σε διάγραμμα Ishikawa (Σχήμα 13 όπ. αναφ. στο Gierczak, 2014)

Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τρία κατασκευασθέντα έργα στη Φλόριντα των Ηνωμένων Πολιτειών οι Peters, Lowe & Katz (2014) κατέγραψαν ως αστοχίες/κινδύνους της μεθόδου HDD μια πληθώρα διαφορετικών γεγονότων, όπως: η έλλειψη γεωτεχνικών στοιχείων όταν αποφασίστηκε από τον εργολάβο να εκτελεστεί η διάτρηση σε μεγαλύτερο βάθος από ότι είχε σχεδιασθεί για να αποφευχθούν κάποια εμπόδια, η χρήση στελέχους διάτρησης από προηγούμενο έργο χωρίς να ελεγχθεί εάν είχε καθαριστεί επαρκώς το εσωτερικό του το οποίο ήταν φραγμένο με στερεοποιημένο μπετονίτη, η παρουσία εύθραυστων αμιαντοτσιμεντοσωλήνων στην περιοχή εγκατάστασης του γεωτρητικού μηχανήματος (κάτι που εμπόδιζε τη χρήση των ειδικών εξωτερικών στηριγμάτων σταθεροποίησης του γεωτρύπανου και οδήγησε στη χρήση φορτηγού βαρέως τύπου για να παρέχει τη σταθερότητα που χρειαζόταν) και η παρουσία μικτών εδαφικών συνθηκών, δηλαδή μαλακά εδάφη σε συνδυασμό με

κομμάτια σκληρών πετρωμάτων, στην πορεία της διάτρησης (γεγονός το οποίο στοίχισε αρκετά σε καθυστερήσεις, αλλαγή προσωπικού, στρατηγικής, εργαλείων και βάθους όδευσης). Επίσης χαρακτηριστική ήταν η αστοχία κάτω από διασταύρωση με μικρό υδάτινο ρεύμα, καθώς το μικρό πλάτος του ρεύματος σήμαινε μικρό βάθος διάτρησης, επομένως και λεπτό εδαφικό κάλυμμα. Μετά την τοποθέτηση του σωληναγωγού, το μικρό βάρος του εδαφικού καλύμματος δεν κατέστη ικανό να κρατήσει το σωλήνα στη θέση του, ο οποίος με τη βοήθεια των δυνάμεων της άνωσης βρέθηκε να επιπλέει μέσα στο νερό. Πρακτικά αυτό σήμαινε αλλαγή κατασκευαστικής μεθόδου, επανασχεδιασμό και επαναδειοδότηση του έργου με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις και σημαντικό οικονομικό κόστος.

Έχοντας ως αφετηρία τις αστοχίες των παραπάνω έργων οι Peters et al. (2014) τονίζουν τη σπουδαιότητα της διερεύνησης των αιτιών αστοχίας στα έργα ως μέσο απόκτησης εμπειρίας και αποφυγής παρόμοιων αστοχιών στο μέλλον. Με βάση τη δική τους εμπειρία παραθέτουν μια λίστα 24 αιτιών τις οποίες θεωρούν ως τις πιο συνηθισμένες στα έργα HDD και τις οποίες αποδίδουν σε τρεις κύριες πηγές: γεωτεχνική έρευνα (4 αστοχίες), σχεδιασμό (13 αστοχίες) και κατασκευή (7 αστοχίες).

Με τον κίνδυνο που προκύπτει από την εναλλαγή μαλακών και σκληρών εδαφών κατά τη διαδικασία διεύρυνσης της οπής ασχολήθηκαν και οι Zhu, Liu και Tong (2014), οι οποίοι επεσήμαναν την αυξημένη συχνότητα του φαινομένου καταστροφής του εργαλείου διεύρυνσης και της ανάγκης αντικατάστασής του. Αυτό συνεπάγεται αύξηση του κόστους και σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις ενώ σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερα κατασκευαστικά προβλήματα όπως η αστάθεια ή/και η κατάρρευση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Μελετώντας τη συμπεριφορά και τις αστοχίες του εργαλείου διεύρυνσης λόγω δονητικής καταπόνησης με τη χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων και εξετάζοντας τις σχετικές αστοχίες σε πραγματικά έργα, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι εκτός από τη χρήση εργαλείων διεύρυνσης με αυξημένη αντοχή υλικού σε περιπτώσεις εναλλαγής μαλακών και σκληρών εδαφών κατά τη διάτρηση συνιστάται και η μείωση της δύναμης έλκυσης και των στροφών ανά λεπτό.

Οι Aboumasoudi και Behvandi (2019), σε μελέτη περίπτωσης για τον εντοπισμό και την κατάταξη των κινδύνων χρήσης της μεθόδου HDD σε πετρελαιοπηγές και πηγές φυσικού αερίου με τη χρήση αναλυτικού διαγράμματος ασαφών δεδομένων, κατέταξαν τους κινδύνους στις ίδιες τέσσερις (4) βασικές κατηγορίες με την Gierczak

(2014), δηλαδή: περιβαλλοντικούς, γεωτεχνικούς, διαχειριστικούς και κινδύνους εξοπλισμού. Καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των συμμετεχόντων στα ερωτηματολόγια της έρευνας αφορούσε ειδικούς σε λειτουργικά θέματα της μεθόδου HDD (π.χ. επικεφαλής ομάδας διάτρησης, ειδικοί σε μηχανολογικά θέματα των μηχανημάτων HDD, κ.λπ.), όπως ήταν αναμενόμενο το μεγαλύτερο μέρος των κινδύνων που αρχικώς αναγνωρίστηκαν από την ομάδα εργασίας (29 από τους 72 κινδύνους) ήταν κίνδυνοι που σχετίζονταν με τη λειτουργία του εξοπλισμού (π.χ. απώλεια ασύρματης επικοινωνίας με το γεωτρητικό εξοπλισμό, αστοχία μηχανήματος HDD, αστοχία εξοπλισμού του λασπώδους υγρού γεώτρησης κ.λπ.). Αντιθέτως εντοπίστηκαν ελάχιστοι κίνδυνοι που θα μπορούσαν να αποδοθούν στη φάση σχεδιασμού της μεθόδου (5 από τους 72 κινδύνους).

Ένας πολύ συχνός κίνδυνος που αφορά, όχι μόνο διασταυρώσεις με τη μέθοδο HDD, αλλά όλα τα υπόγεια έργα σε περιοχές που έχουν ήδη αναπτυχθεί από τον άνθρωπο είναι η καταστροφή εγκατεστημένων υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας (π.χ. ύδρευση, αποχέτευση, τηλεπικοινωνίες/οπτικές ίνες, φυσικό αέριο, ηλεκτρικό ρεύμα, κ.λπ.). Πέραν από τις οικονομικές επιπτώσεις, τις χρονικές καθυστερήσεις και την όχληση των χρηστών των δικτύων, η καταστροφή ηλεκτρικών καλωδίων ή αγωγών φυσικού αερίου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτροπληξία των εργατών και την πρόκληση φωτιάς ή ακόμη και έκρηξης. Στην τελευταία περίπτωση κινδυνεύουν τόσο οι εργάτες όσο και το ευρύτερο κοινό που μπορεί να βρίσκεται στην περιοχή του έργου (Jaganathan et al., 2011; OSHA, 2018).

Σε εργασία που δημοσιεύτηκε το 2020 για τη διαχείριση κινδύνων της μεθόδου HDD, η Krechowicz κατέγραψε τους σημαντικότερους κινδύνους της HDD, έπειτα από έρευνα που διεξήχθη σε δεκατέσσερις εταιρείες με εκτελεσθέντα έργα στην Πολωνία, στη Γαλλία, στην Ολλανδία, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και στη Γερμανία. Στο σύνολό τους παρουσιάστηκαν 21 βασικοί κίνδυνοι, ομαδοποιημένοι στις ίδιες τέσσερις κατηγορίες που είχαν χρησιμοποιηθεί από την Gierczak (2014) και τους Aboumasoudi και Behvandi (2019), δηλαδή προβλήματα διαχείρισης, προβλήματα εξοπλισμού, γεωτεχνικά προβλήματα και προβλήματα με το περιβάλλον υπό την έννοια των εξωτερικών συνθηκών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα προβλήματα διαχείρισης εντάχθηκαν και κίνδυνοι που σχετίζονται με τη φάση σχεδιασμού, όπως για παράδειγμα ο σωστός υπολογισμός φορτίων και τάσεων σε σχέση με την αντοχή των

σωλήνων, ενώ στα προβλήματα με το περιβάλλον εντάχθηκε το νομικό περιβάλλον και οι αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Διερευνώντας περισσότερο τη διαχείριση των γεωτεχνικών κινδύνων στα έργα HDD και συνοψίζοντας τα αποτελέσματα προηγούμενης έρευνάς που είχε δημοσιεύσει με το επώνυμο Gierczak (2014), η Krechowicz (2021) αναφέρει ως συχνότερους γεωτεχνικούς κινδύνους τους εξής: παρουσία απρόβλεπτων φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος, κατάρρευση της γεώτρησης, αδυναμία συνέχισης εγκατάστασης του αγωγού λόγω «κολλήματος» εξαιτίας διογκούμενης αργίλου και τέλος διαρροή του λασπώδους υγρού γεώτρησης.

Σε επόμενη μελέτη της η Krechowicz μαζί με τους Gierulski, Loneragan & Kruse (2021) διερεύνησαν τους κινδύνους της τεχνολογίας HDD που οφείλονται είτε σε ανθρώπινους παράγοντες (διαχειριστικοί κίνδυνοι) είτε σε αστοχία του εξοπλισμού. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία προγενέστερης έρευνας της Krechowicz σε 5940 έργα HDD, έκαναν εκτίμηση διακινδύνευσης με τη μέθοδο “Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)” (Ανάλυση Τρόπων Αστοχίας και Αποτελεσμάτων) εκτιμώντας ταυτόχρονα τις επιπτώσεις των κινδύνων στο έργο και την πιθανότητα έγκαιρης ανίχνευσής τους έτσι ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Συνολικά εξετάστηκαν δεκαπέντε (15) κίνδυνοι που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα και εννιά (9) που οφείλονται σε αστοχία εξοπλισμού, με την εφαρμογή της μεθόδου FMEA να αναδεικνύει ως πιο κρίσιμους τους εξής: α) καθυστερήσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας HDD, β) αστοχία του μηχανήματος επανακυκλοφορίας του λασπώδους υγρού γεώτρησης, γ) έλλειψη απαιτούμενων ικανοτήτων του χειριστή του γεωτρήπανου, δ) αστοχία στελέχους διάτρησης λόγω κόπωσης του υλικού, ε) λανθασμένη επιλογή της εξωτερικής προστατευτικής επένδυσης του αγωγού, στ) αστοχία του γεωτρήπανου και ζ) αστοχία του μηχανήματος καθαρισμού του λασπώδους υγρού γεώτρησης.

Σε δεύτερη μελέτη τους, με την ίδια μεθοδολογία που μόλις περιεγράφηκε, οι Krechowicz, Gierulski, Loneragan & Kruse (2021) διερεύνησαν τους κινδύνους της τεχνολογίας HDD που οφείλονται μόνο σε εξωτερικούς παράγοντες, τους οποίους κατέταξαν σε παράγοντες εξωτερικού περιβάλλοντος και σε οικονομικούς. Συνολικά εξετάστηκαν οκτώ (8) κίνδυνοι εξωτερικού περιβάλλοντος και έξι (6) οικονομικοί. Στους πρώτους αναφέρονται κίνδυνοι όπως η παρουσία φυσικών ή τεχνητών εμποδίων, η κατάρρευση της γεώτρησης, η διαρροή λασπώδους υγρού γεώτρησης, πλημμυρικά

φαινόμενα, έντονα καιρικά φαινόμενα κ.ά., ενώ στους οικονομικούς αναφέρονται παράγοντες όπως: α) ο τύπος της σύμβασης, β) κακή κοστολόγηση της οικονομικής επένδυσης, γ) ελλιπές κεφάλαιο, δ) υψηλό επιτόκιο, ε) διακυμάνσεις στην ισοτιμία συναλλαγής νομισμάτων και στ) υψηλός πληθωρισμός. Σημειώνεται από τους ερευνητές ότι οι οικονομικοί κίνδυνοι εξετάζονται μόνο για τον τύπο Maxi HDD.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, οι σπουδαιότεροι κίνδυνοι κατά τον σχεδιασμό και χρήση της μεθόδου HDD παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3:

Πίνακας 2.3: Κίνδυνοι κατά τον Σχεδιασμό και Χρήση της Μεθόδου HDD

α/α	Κίνδυνοι
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)
2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα
4	"Κόλλημα" σωλήνα κατά την εγκατάσταση
5	Διαρροή λασπώδους υγρού γεώτρησης/μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών σε βραχώδεις σχηματισμούς)
6	Κατάρρευση οπής διάτρησης
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης
7	Αστοχία μηχανήματος HDD
8	Αστοχία υλικού σωλήνων
9	Αστοχία προστατευτικής επένδυσης σωλήνων (coating)
10	Αστοχία διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διεύρυνσης οπών (HDD reamer)
11	Αστοχία στελεχών διάτρησης
12	Αστοχία του συστήματος επανακυκλοφορίας του λασπώδους υγρού γεώτρησης (μπετονίτης)
13	Αστοχία του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της
14	Αστοχία λοιπού εξοπλισμού
Γ	Σχεδιαστικές/μελετητικές αστοχίες
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης σε κάμψη
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης του σωλήνα για την εγκατάστασή του
19	Υποεκτίμηση απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων

α/α	Κίνδυνοι
20	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης προστατευτικής επένδυσης των σωλήνων (coating)
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου/ έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας
24	Καθυστερήσεις κατά το στάδιο εγκατάστασης των σωλήνων
25	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών
26	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα
27	Ελλιπής προϋπολογισμός
28	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους
Ε	Εξωτερικές συνθήκες
29	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί κ.λπ.)
30	Πλημμυρικά φαινόμενα

2.5 Στατιστικά Στοιχεία Αστοχιών HDD

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με στατιστικά στοιχεία των αστοχιών της μεθόδου HDD τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό δεν θα ήταν μια απλή υπόθεση καθώς οι εμπλεκόμενες εταιρείες δεν έχουν κίνητρο να δημοσιοποιήσουν τέτοιου είδους πληροφορίες.

Παρόλα αυτά, στο πλαίσιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, βρέθηκε ένα άρθρο της Gierczak (2014) σε τεχνικό περιοδικό, σύμφωνα με το οποίο διεξήχθη έρευνα σε εργοληπτικές εταιρείες οι οποίες κατά τα έτη 2011-2012 εκτέλεσαν 5.940 έργα HDD σε Πολωνία, Γαλλία, Ολλανδία, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και Γερμανία. Σύμφωνα με αυτό, τα πιο συχνά γεωτεχνικά προβλήματα που καταγράφηκαν από τους εργολάβους HDD ήταν:

- παρουσία απρόβλεπτων φυσικών εμποδίων στο υπέδαφος (15%),
- διαρροή λασπώδους υγρού γεώτρησης (15%),
- παρουσία απρόβλεπτων τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (11%),
- κατάρρευση της γεώτρησης (10%),

- αδυναμία συνέχισης εγκατάστασης του αγωγού λόγω «κολλήματος» εξαιτίας διογκούμενης αργίλου (6%).

Με βάση την ίδια έρευνα, οι πιο συχνές σχεδιαστικές/μελετητικές αστοχίες που κατέγραψαν οι εργολάβοι HDD ήταν:

- το να μη λαμβάνεται υπόψιν η αντοχή των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης σε κάμψη (10%),
- υποεκτίμηση της απαιτούμενης εξωτερικής επένδυσης των σωλήνων (9%),
- υποεκτίμηση των φορτίων και των τάσεων που αναπτύσσονται στους σωλήνες κατά την εγκατάστασή τους (7%).

Άλλα ενδιαφέροντα ποσοστά αστοχιών που καταγράφονται στην έρευνα της Gierczak (2014) είναι:

- υποεκτίμηση κόστους επένδυσης (22%),
- ανεπαρκής χρηματοδότηση (19%),
- λανθασμένος τύπος Σύμβασης Έργου (11%).

Σημειώνεται ότι όλα τα προηγούμενα ποσοστά της έρευνας δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους καθώς κάποιες αστοχίες δύναται να συμβαίνουν ταυτόχρονα.

2.6 Διαχείριση Κινδύνων HDD και Μέτρα Αντιμετώπισης

Οι Peters et al. (2014), έχοντας από την εμπειρία τους εντοπίσει τους περισσότερους κινδύνους που συνδέονται με αστοχίες της μεθόδου HDD κυρίως στην έλλειψη επαρκούς γεωτεχνικής έρευνας και σε σχεδιαστικές αστοχίες και λιγότερο στη φάση κατασκευής, προτείνουν τα εξής μέτρα αντιμετώπισης:

Γεωτεχνική Έρευνα

- Τοποθεσία γεωτρήσεων: Ένα συχνό λάθος κατά τους ερευνητές είναι η διεξαγωγή διερευνητικών γεωτρήσεων ακριβώς πάνω στη γραμμή όδευσης της HDD. Όταν όμως οι γεωτρήσεις αυτές δεν πληρωθούν σωστά δημιουργούν ένα κανάλι διαφυγής του λασπώδους υγρού της γεώτρησης προς το περιβάλλον. Γι' αυτό το λόγο οι ερευνητές συνιστούν οι διερευνητικές γεωτρήσεις να τοποθετούνται σε απόσταση τουλάχιστον 25 ft (7,62 m) από το κέντρο όδευσης της HDD, κατά προτίμηση εναλλάξ.

- Βάθος γεώτρησης: Σε περίπτωση που λόγω δυσκολιών κατά τη φάση κατασκευής της HDD αποφασίζεται σημαντική αύξηση του βάθους της, τότε συνιστάται η διεξαγωγή πρόσθετων διερευνητικών γεωτρήσεων έτσι ώστε να επιβεβαιωθούν οι εδαφικές συνθήκες στο νέο βάθος.

Μελέτη/Σχεδιασμός

- Προσεκτική μελέτη των αποτελεσμάτων της γεωτεχνικής έρευνας για το βέλτιστο σχεδιασμό της HDD: Ειδική μνεία γίνεται στις εναλλαγές στρωματογραφίας από μαλακά εδάφη σε βραχώδη πετρώματα, καθώς μπορεί να επηρεάσουν τις γωνίες εισόδου και εξόδου της διάτρησης ενώ ταυτόχρονα απαιτούνται διαφορετικές διατρητικές κεφαλές. Προσοχή επίσης χρειάζεται και στις αβαθείς οδεύσεις σε συνδυασμό με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα για την αποφυγή φαινομένων άνωσης.
- Γεωμετρία διάτρησης: Συνιστάται η ήπια γεωμετρία όδευσης της διάτρησης.
- Ακτίνα καμπυλότητας: Συνιστάται η αποφυγή στο μέτρο του δυνατού της ταυτόχρονης οριζόντιας και κατακόρυφης καμπυλότητας (3D curves) καθώς παρουσιάζει αυξημένη δυσκολία επιτυχίας κατά την κατασκευή. Όπου δεν είναι εφικτή η αποφυγή, συνιστάται η υιοθέτηση μεγάλων ακτινών καμπυλότητας ως μέσο μείωσης της δυσκολίας κατασκευής.
- Ακτίνα καμπυλότητας κατά τη διάτρηση: Η ακτίνα καμπυλότητας διάτρησης πρέπει να καθορίζεται έπειτα από διερεύνηση της ακτίνας καμπυλότητας του στελέχους διάτρησης σε συνδυασμό με τη μέγιστη καμπύλη στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ασφαλώς ο σωλήνας χωρίς αστοχία υλικού. Σε κάθε περίπτωση συνιστώνται μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας της τάξης των χιλίων και δυο χιλιάδων ποδών (περίπου 305 και 610 μέτρα αντίστοιχα) ανάλογα και με το υλικό και τη διάμετρο του προς εγκατάσταση αγωγού.
- Διαρροή του λασπώδους υγρού γεώτρησης στην επιφάνεια του εδάφους ή σε υδάτινο φορέα: Συνιστάται η χρήση γεωτεχνικού υπολογιστικού προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y) λαμβάνοντας υπόψιν την προτεινόμενη γεωμετρία σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας. Ταυτόχρονα θεωρείται επιβεβλημένη η εκ των

προτέρων εκπόνηση ενός πλάνου άμεσης διαχείρισης της διαρροής σε περίπτωση που αυτή συμβεί.

Κατασκευή

- Χρήση κυλίνδρων στο σημείο εξόδου για την υποστήριξη των σωλήνων πριν την έλκυση και επιλογή σωλήνων με τοιχώματα επαρκούς μηχανικής αντοχής.
- Συνεχής επίβλεψη από εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό.

Για την αποφυγή κινδύνων που σχετίζονται με την καταστροφή δικτύων κοινής ωφέλειας ο Οργανισμός Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας του Υπουργείου Εργασίας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής εξέδωσε τις εξής οδηγίες (OSHA, 2018):

- Σήμανση επί του εδάφους της όδευσης κάθε γνωστού δικτύου στην περιοχή του έργου.
- Οπτικό έλεγχο κατά μήκος της όδευσης της HDD για κατασκευές που σχετίζονται με πιθανά υπόγεια δίκτυα (π.χ. μετρητές φυσικού αερίου και καλύμματα/καπάκια φρεατίων).
- Έλεγχο υπαρχόντων σχεδίων δικτύων και επαφή με τις εταιρείες κοινής ωφέλειας για εξακρίβωση των θέσεων των δικτύων.
- Σύγκριση των γραμμών σήμανσης με τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν για να διασφαλιστεί ότι έχουν εντοπιστεί και επισημανθεί όλα τα δίκτυα.
- Εκσκαφή ερευνητικών τάφρων για περαιτέρω εξακρίβωση των θέσεων των υπόγειων δικτύων.

Η Krechowicz (2020) από την άλλη δεν στάθηκε στο να προτείνει μέτρα αντιμετώπισης για κάποιους από τους συχνότερους κινδύνους που συναντώνται στην HDD, αλλά πρότεινε την εφαρμογή ενός ολιστικού μοντέλου διαχείρισής τους βασισμένο σε πέντε (5) πυλώνες: ανάλυση κινδύνων, αντιμετώπιση κινδύνων, μητρώο καταγραφής κινδύνων, παρακολούθηση και επανεξέταση των κινδύνων, καθώς και χρηματοδότηση έναντι των κινδύνων.

Σε μελέτη του 2021 πάνω στη διαχείριση γεωτεχνικών κινδύνων της HDD η Krechowicz ανέπτυξε τη μεθοδολογία της γύρω από 4 βασικές στρατηγικές

διαχείρισης: αποδοχή του κινδύνου (risk retention), μεταβίβαση του κινδύνου (risk transfer), εξάλειψη του κινδύνου (risk elimination) και μείωση του κινδύνου (risk reduction). Στην ουσία αποδοχή του κινδύνου σημαίνει το να μη ληφθεί κανένα μέτρο (do nothing approach) και μεταβίβαση του κινδύνου σημαίνει το να αναλάβει το κόστος εμφάνισης του κινδύνου ένα τρίτο εμπλεκόμενο μέρος, συνήθως μια ασφαλιστική εταιρεία. Όσον αφορά την εξάλειψη του κινδύνου αυτό γίνεται είτε λαμβάνοντας σημαντικά μέτρα, είτε αλλάζοντας την όδευση της HDD για να αποφευχθεί κάποιος συγκεκριμένος κίνδυνος στην πορεία της, είτε αλλάζοντας κατασκευαστική μέθοδο είτε ακόμη και εγκαταλείποντας το έργο. Τέλος, μείωση του κινδύνου σημαίνει να ληφθούν μέτρα έτσι ώστε είτε να μειωθεί η πιθανότητα να εμφανιστεί ο συγκεκριμένος κίνδυνος είτε να αμβλυνθούν οι επιπτώσεις του στο έργο ή και τα δύο.

2.7 Ερευνητικά Ερωτήματα

Εξετάζοντας το έργο άλλων ερευνητών φαίνεται να υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία ως προς τους κινδύνους της μεθόδου HDD, όμως ελάχιστοι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη συστηματική καταγραφή, την ποσοτικοποίησή τους και την παρουσίαση σχεδίου διαχείρισης. Ακόμη όμως και σε αυτές τις περιπτώσεις η ανάλυση και εκτίμηση κινδύνου έχει γίνει περισσότερο από την οπτική γωνία του εργολάβου HDD και όχι από την οπτική γωνία του μελετητή, του επιβλέποντα ή του Διαχειριστή/Κυρίου του Έργου (Project Manager or Project Owner). Επίσης, στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν άλλες έρευνες που να παρουσιάζουν στοιχεία για την εφαρμογή και τους κινδύνους της μεθόδου HDD στον ελλαδικό χώρο, καθώς και προτάσεις για τη διαχείρισή τους.

Σκοπός λοιπόν της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι να απαντήσει τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

- 1) Ποιοι θεωρείται ότι είναι οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι κίνδυνοι της μεθόδου HDD στον ελλαδικό χώρο;
- 2) Πόσο σημαντικές φαίνεται να είναι οι επιπτώσεις τους από την οπτική γωνία του μελετητή, του επιβλέποντα ή του Διαχειριστή/Κυρίου του Έργου (Project Manager or Project Owner);
- 3) Ποια θα ήταν τα προτεινόμενα μέτρα διαχείρισής τους και πώς θα ήταν ένα τυπικό μητρώο διαχείρισης κινδύνου HDD;

Στόχος της διπλωματικής είναι η εκπόνηση ενός σχεδίου βάσης για τη διαχείριση των κινδύνων της μεθόδου HDD, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από επαγγελματίες που εμπλέκονται με τον σχεδιασμό και την κατασκευή αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων και ηλεκτρικής ενέργειας.

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

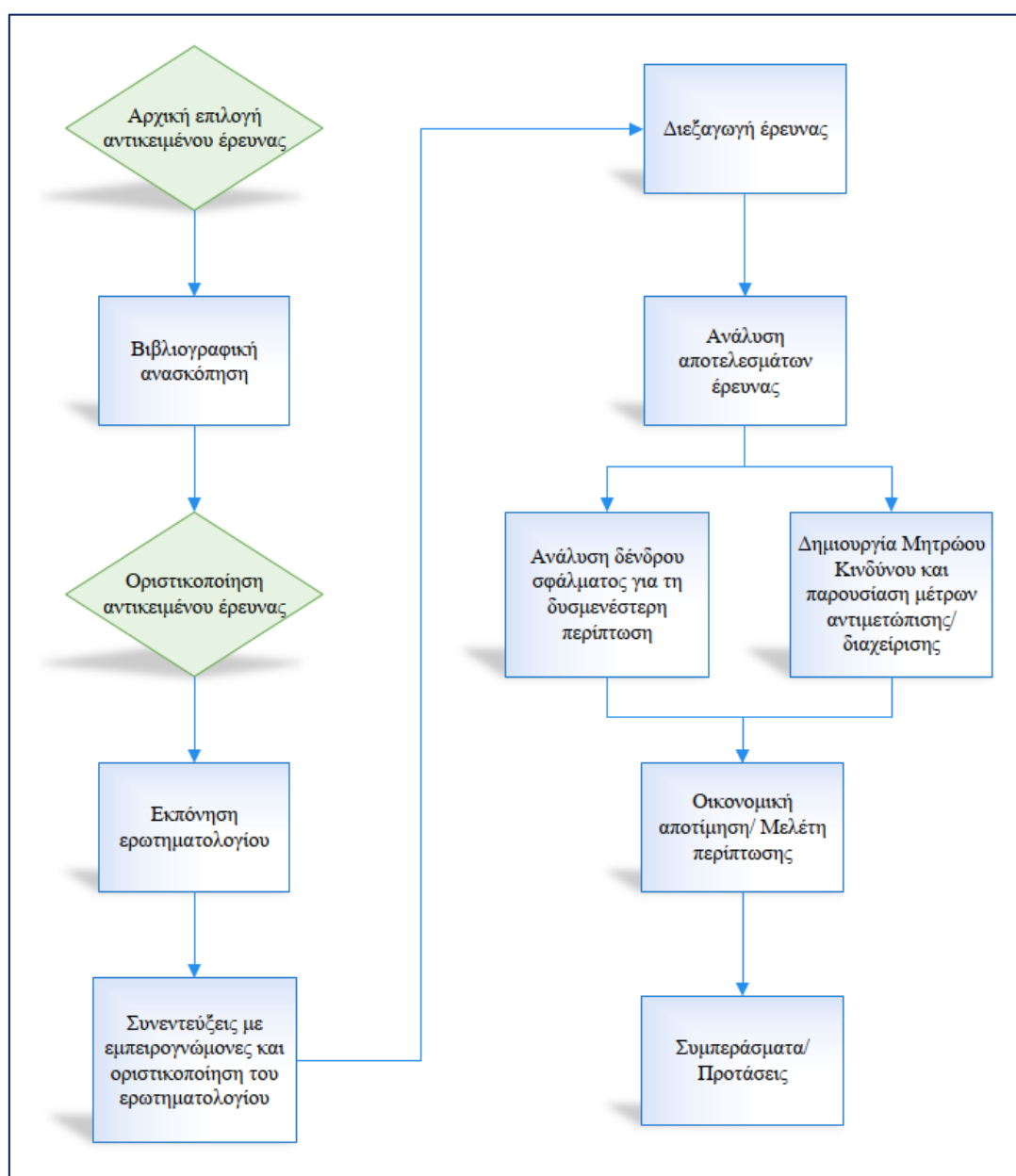
3.1 Βήματα Εργασίας

Για την εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας εφαρμόζονται τα παρακάτω βήματα:

- Αρχική επιλογή του αντικειμένου της έρευνας βάσει της επαγγελματικής εμπειρίας και των ενδιαφερόντων της φοιτήτριας.
- Βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό να διερευνηθεί τι έχει γίνει από άλλους ερευνητές στο αντικείμενο και να εντοπισθούν κενά, τα οποία θα μπορούσαν να διερευνηθούν περαιτέρω μέσω της διπλωματικής εργασίας.
- Οριστικοποίηση αντικειμένου έρευνας.
- Εκπόνηση ερωτηματολογίου έρευνας με στόχο την ποσοτικοποίηση των συνηθέστερων κινδύνων κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων HDD, καθώς και των δυνητικών επιπτώσεων σε ένα έργο στην περίπτωση εμφάνισής τους.
- Καθορισμός της κλίμακας πιθανότητας εμφάνισης, της κλίμακας σοβαρότητας των επιπτώσεων και της κλίμακας διακινδύνευσης.
- Επιλεκτικές συνεντεύξεις με εμπειρογνώμονες με στόχο τη βελτιστοποίηση του ερωτηματολογίου έτσι ώστε να διασφαλιστεί η αρτιότητα και η σχετικότητα των ερωτήσεων.
- Οριστικοποίηση ερωτηματολογίου.
- Διεξαγωγή έρευνας: επιλογή και ενημέρωση των συμμετεχόντων στην έρευνα για το αντικείμενο και τον τρόπο συμπλήρωσης των ερωτηματολογίων.
- Ανάλυση των αποτελεσμάτων της έρευνας και εκτίμηση διακινδύνευσης.
- Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος (FTA) για τη θεωρητικά δυσμενέστερη περίπτωση.

- Δημιουργία Μητρώου Κινδύνου (Risk Register) HDD και παρουσίαση μέτρων αντιμετώπισης για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της διακινδύνευσης.
- Εξέταση μελέτης περίπτωσης με στόχο την οικονομική αποτίμηση της μεθόδου HDD έναντι της μεθόδου ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης, λαμβάνοντας υπόψιν τα συμπεράσματα της έρευνας και την ανάλυση δένδρου σφάλματος.

Συνοπτικά τα βήματα της διπλωματικής εργασίας απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (flow chart) (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής εργασίας

Σημειώνεται ότι η διπλωματική εργασία δεν εξετάζει γενικούς εργοταξιακούς κινδύνους, κινδύνους που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη λειτουργία του έργου/αγωγού ή κινδύνους τύπου «Μαύρος Κύκνος» (Black Swan), δηλαδή κινδύνους με εξαιρετικά μικρή πιθανότητα να συμβούν (και πολλές φορές αδύνατο να προβλεφθούν) αλλά με εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις στο έργο, όπως π.χ. μια πανδημία τύπου Covid-19 ή μια γενικευμένη πολεμική σύρραξη.

Όσον αφορά τις εξεταζόμενες κατηγορίες δυνητικών επιπτώσεων των κινδύνων στο έργο, δεν έχει τεθεί κάποιος περιορισμός στην παρούσα εργασία, επομένως οι επιπτώσεις μπορεί να αφορούν το κόστος, τον χρόνο, την ποιότητα, το περιβάλλον ή/και την υγεία και ασφάλεια των εργαζομένων. Άλλωστε οι περισσότερες επιπτώσεις μεταφράζονται τελικά σε κόστος, π.χ. η επέκταση ενός χρονοδιαγράμματος επιφέρει αύξηση κόστους, ένα πολύ σοβαρό ατύχημα μπορεί να συνοδεύεται από οικονομικές αποζημιώσεις ή/και απώλεια φήμης και εσόδων μιας εταιρείας κ.ο.κ.

3.2 Καθορισμός Κλιμάκων Μητρώου Κινδύνου

Για τη βαθμολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης των κινδύνων και της σοβαρότητας των επιπτώσεών τους, επιλέχθηκαν οι πενταβάθμιες κλίμακες των Πινάκων 3.1 και 3.2. Ο υπολογισμός της εκτίμησης διακινδύνευσης και ο ορισμός της κλίμακάς της δίνονται στους Πίνακες 3.3 και 3.4, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Κλίμακα Πιθανότητας Εμφάνισης

Κλίμακα	Περιγραφή	Πιθανότητα
1	Πολύ Μικρή	0% - 20%
2	Μικρή	20% - 40%
3	Μέτρια	40% - 60%
4	Μεγάλη	60% - 80%
5	Πολύ Μεγάλη	80% - 100%

Πίνακας 3.2: Κλίμακα Σοβαρότητας Επιπτώσεων

Κλίμακα	Περιγραφή	Σοβαρότητα Επιπτώσεων
1	Πολύ Μικρή	Πολύ μικρή βλάβη ή απώλεια – Κανέναν τραυματισμός
2	Μικρή	Μικρή βλάβη, απώλεια ή καθυστέρηση ή/και μικρός τραυματισμός
3	Μέτρια	Σημαντική βλάβη, απώλεια ή καθυστέρηση ή/και σοβαρός τραυματισμός
4	Μεγάλη	Πολύ σημαντική βλάβη, απώλεια ή καθυστέρηση ή/και πολύ σοβαρός τραυματισμός
5	Πολύ Μεγάλη	Καταστροφική βλάβη, απώλεια ή καθυστέρηση ή/και θανάσιμος τραυματισμός

Πίνακας 3.3: Πίνακας Εκτίμησης Διακινδύνευσης

Πιθανότητα		Σοβαρότητα				
		1	2	3	4	5
		Πολύ Μικρή	Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη	Πολύ Μεγάλη
1	Πολύ Μικρή	1	2	3	4	5
2	Μικρή	2	4	6	8	10
3	Μέτρια	3	6	9	12	15
4	Μεγάλη	4	8	12	16	20
5	Πολύ Μεγάλη	5	10	15	20	25

Πίνακας 3.4: Κλίμακα Διακινδύνευσης

Κατηγορία	Περιγραφή
Μικρή (1-8)	Αποδεκτή διακινδύνευση με χρήση συνήθων μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης
Μέτρια (9-19)	Απαιτείται η λήψη μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης πλέον των συνήθων
Μεγάλη (20-25)	Μη αποδεκτή διακινδύνευση. Ακύρωση ή επανασχεδιασμός δραστηριότητας

Οι παραπάνω πίνακες έχουν ληφθεί και προσαρμοστεί από την οδηγία CD 622: Managing Geotechnical Risk του οργανισμού Highways England του Ηνωμένου Βασιλείου (Highways England, 2019).

3.3 Ερωτηματολόγια/Συνεντεύξεις

Έχοντας ολοκληρώσει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (Κεφάλαιο 2) και έχοντας καταλήξει στους κινδύνους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3, διαμορφώθηκε ερωτηματολόγιο συμπλήρωσης με την εξής ερώτηση: *«Με βάση την εμπειρία σας βαθμολογήστε πόσο συχνά θεωρείτε ότι εμφανίζονται τα παρακάτω προβλήματα/αστοχίες κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της μεθόδου HDD και πόσο σοβαρές είναι οι επιπτώσεις τους»*. Ως προβλήματα/αστοχίες καταγράφηκαν οι κίνδυνοι του Πίνακα 2.3.

Στη συνέχεια διεξήχθησαν προσωπικές συνεντεύξεις με δύο ειδικούς του χώρου (έναν Project Manager έργων φυσικού αερίου με πάνω από 40 χρόνια εμπειρίας και έναν μελετητή/επιβλέποντα έργων φυσικού αερίου με πάνω από 20 χρόνια εμπειρίας στο αντικείμενο) για να διασφαλιστεί ότι το ερωτηματολόγιο καλύπτει τους βασικότερους κινδύνους της μεθόδου HDD, αλλά και ότι η διατύπωσή του είναι σύμφωνη με την καθομιλουμένη εργοταξιακή/μελετητική ορολογία. Μετά τις υποδείξεις των ειδικών το ερωτηματολόγιο της έρευνας διαμορφώθηκε όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα 8.1. Σημειώνεται ότι οι κύριες αλλαγές αφορούν:

- Αφαίρεση του κινδύνου *«"Κόλλημα" σωλήνα κατά την εγκατάσταση»* καθώς αυτός κρίθηκε συνδυαστικό αποτέλεσμα άλλων κινδύνων όπως η *«Διαρροή λασπώδους υγρού γεώτρησης/μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών σε βραχώδεις σχηματισμούς)»*, η *«Κατάρρευση οπής διάτρησης»*, ο *«Ανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης του σωλήνα για την εγκατάστασή του»* κ.ά.
- Αφαίρεση του κινδύνου *«Καθυστερήσεις κατά το στάδιο εγκατάστασης των σωλήνων»* καθώς κι αυτός κρίθηκε συνδυαστικό αποτέλεσμα άλλων κινδύνων όπως η *«Διαρροή λασπώδους υγρού γεώτρησης/μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών σε βραχώδεις σχηματισμούς)»*, η *«Κατάρρευση οπής διάτρησης»*, τα *«Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών»* κ.ά.
- Προσθήκη του κινδύνου *«Ανατροπή μηχανήματος HDD»*.

Σημειώνεται ότι, παρόλη την προσπάθεια να δημιουργηθεί μια λίστα κινδύνων που να είναι όσο το δυνατόν πιο ανεξάρτητοι μεταξύ τους, λόγω της φύσης του

προβλήματος ένας μικρός βαθμός αλληλοεπικάλυψης εξακολουθεί να υφίσταται σε κάποιους από αυτούς.

Το τελικό ερωτηματολόγιο του Παραρτήματος 8.1, διανεμήθηκε ως αρχείο excel μέσω email σε επιλεγμένους επαγγελματίες του χώρου, αφού προηγήθηκε προφορική ενημέρωσή τους είτε δια ζώσης είτε δια τηλεφώνου σχετικά με το αντικείμενο της έρευνας και τον τρόπο συμπλήρωσής του, τονίζοντας το καθεστώς ανωνυμίας των απαντήσεων. Για στατιστικούς και μόνο λόγους συνελέχθησαν στοιχεία όπως η ειδικότητα και τα χρόνια εμπειρίας του κάθε ερωτηθέντα.

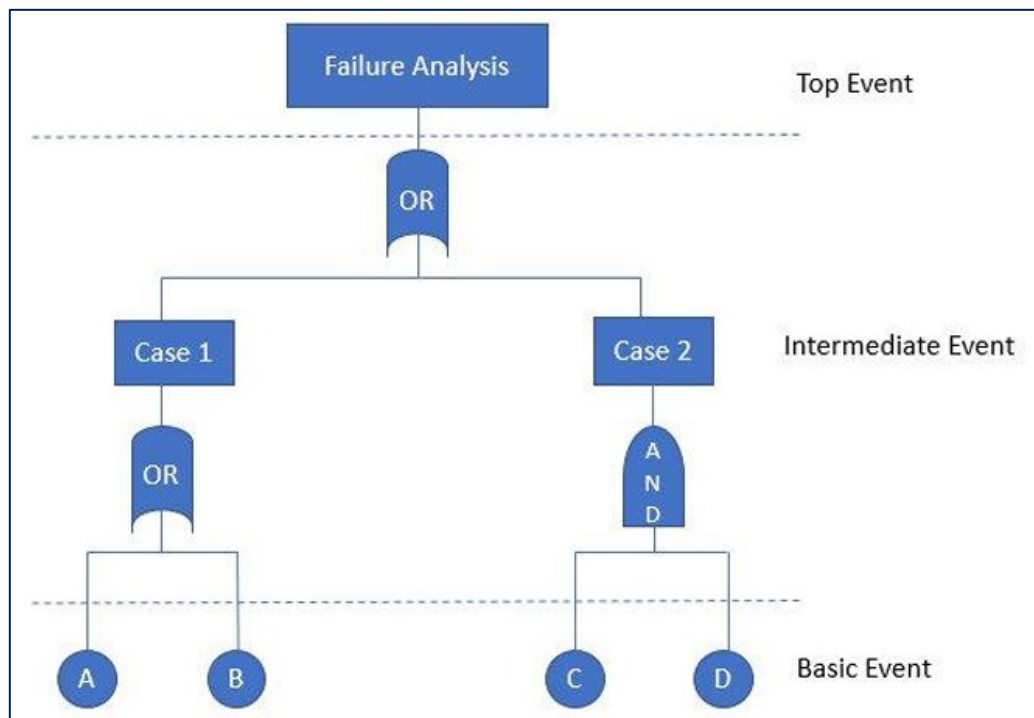
Στο σύνολό τους επιστραφήκαν συμπληρωμένα δέκα εννιά (19) ερωτηματολόγια με την επαγγελματική εμπειρία των συμμετεχόντων στην έρευνα να κυμαίνεται μεταξύ δεκαέξι (16) και σαράντα τριών (43) ετών. Οι συμμετέχοντες είναι κατά κύριο λόγο πολιτικοί μηχανικοί, γεωλόγοι, μηχανολόγοι και τοπογράφοι μηχανικοί, οι οποίοι έχουν συμμετάσχει σε έργα διάτρησης HDD ως μελετητές, επιβλέποντες, υπεύθυνοι αδειοδοτήσεων και διαχειριστές έργων αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαιοειδών.

3.4 Ανάλυση Δένδρου Σφάλματος (Fault Tree Analysis)

Η μέθοδος ανάλυσης δένδρου σφάλματος [Fault Tree Analysis (FTA)], η οποία αναπτύχθηκε αρχικά το 1961 από τον H. A. Watson των τηλεφωνικών εργαστηρίων “Bell”, χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση των αιτιών αποτυχίας ενός συστήματος και τον υπολογισμό της αξιοπιστίας του (Mahmood, Ahmadi, Verma, Srividya & Kumar, 2013). Από τη σύλληψή της μέχρι σήμερα, η μέθοδος FTA έχει τροποποιηθεί από πολλούς ερευνητές και μια αρκετά διαδεδομένη παραλλαγή της είναι αυτή της Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για να καλύψει κενά ποσοτικών δεδομένων και για να μοντελοποιήσει γλωσσικές μεταβλητές (Mahmood et al., 2013). Καθώς η FFTA εμπεριέχει σε μεγάλο βαθμό μαθηματική επεξεργασία που ξεφεύγει από το πλαίσιο αυτής της διπλωματικής και επειδή ο κύριος στόχος της παρούσης εργασίας είναι να κατανοήσει ο μέσος μηχανικός, αλλά και ο μέσος αναγνώστης που ασχολείται με ανάλογα έργα, τους λόγους και κύριους μηχανισμούς που μπορεί να οδηγήσουν σε αποτυχημένη εφαρμογή της μεθόδου οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης (HDD) επιλέχθηκε για πιο απλή παρουσίαση η απλή μέθοδος FTA.

Για την εφαρμογή της μεθόδου FTA απαιτείται ο καθορισμός ενός κορυφαίου γεγονότος σφάλματος/αστοχίας, το οποίο στη συνέχεια αναλύεται σε μια δενδροειδή

καταγραφή ενδιάμεσων και βασικών γεγονότων που οδηγούν στην εμφάνισή του (βλέπε Σχήμα 3.2). Η σύνδεση των γεγονότων γίνεται με τη χρήση λογικών πυλών, εκ των οποίων οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι η πύλη “AND” (και) και η πύλη “OR” (ή). Η πύλη “AND” χρησιμοποιείται για να δείξει ότι για να συμβεί ένα γεγονός απαιτείται να συμβούν όλα τα γεγονότα που καταγράφονται κάτω από αυτό, δηλαδή όλα τα γενεσιουργά αίτια, ενώ η πύλη “OR” δείχνει ότι για να συμβεί ένα γεγονός αρκεί να συμβεί έστω ένα από τα γεγονότα που έχουν καταγραφεί κάτω από αυτό (Rausand & Høyland, 2004).



Σχήμα 3.2: Βασική δομή δένδρου σφάλματος (Ibrahim, 2018 όπ. αναφ. στο Ehiagwina, Kehinde, Nafiu, Afolabi & Olatinwo, 2022)

Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η διερεύνηση ως κορυφαίου γεγονότος αυτό της δυσμενέστερης περίπτωσης όπου κατά τη φάση κατασκευής διαπιστώνεται ότι είναι πλέον αδύνατο να συνεχιστεί η διάτρηση της HDD στην πορεία/τροχιά της ως έχει και απαιτείται είτε εναλλακτική τροχιά είτε εγκατάλειψη της μεθόδου HDD και χρήση εναλλακτικής μεθόδου εγκατάστασης αγωγού.

Η ανάλυση δένδρου σφάλματος επιλέχθηκε διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην ποιοτική και ποσοτική διερεύνηση μιας αστοχίας καθώς:

- α. οδηγεί σε μια ξεκάθαρη απεικόνιση των γεγονότων/αιτιών της αστοχίας και των μεταξύ τους σχέσεων, και

- β. οδηγεί στον υπολογισμό της πιθανότητας να συμβεί το κορυφαίο γεγονός, υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η πιθανότητα εμφάνισης κάθε βασικού γεγονότος και το εάν είναι ή όχι στατιστικά ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα.

Σημειώνεται όμως ότι για πολύπλοκα συστήματα με πολλά βασικά γεγονότα και πύλες, όπως είναι και τα κατασκευαστικά έργα, η δημιουργία ενός εκτεταμένου δένδρου σφάλματος μπορεί να είναι εξαιρετικά περίπλοκη και χρονοβόρα (Ahmed, Kayis & Amornsawadwatana, 2007).

3.5 Μελέτη Περίπτωσης (Case Study)

Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι, με βάση το υπόβαθρο των συμμετεχόντων, το ερωτηματολόγιο αφορά κυρίως την εγκατάσταση αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαιοειδών με τη μέθοδο HDD, επιλέχθηκε για την οικονομική αποτίμηση της μεθόδου η μελέτη περίπτωσης ενός αγωγού φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η εγκατάσταση αγωγού φυσικού αερίου 36" κάτω από κλάδο ελληνικής Εθνικής Οδού με δύο (2) λωρίδες και Λωρίδα Έκτακτης Ανάγκης (ΛΕΑ) ανά κατεύθυνση, με πλάτος οδοστρώματος 20 m, στο ίδιο περίπου επίπεδο με τη γύρω περιοχή.

Πίνακας 3.5: Δεδομένα Μελέτης Περίπτωσης

Παράμετρος	Περιγραφή
Εγκατάσταση:	Αγωγός Φυσικού Αερίου
Διάμετρος αγωγού:	36" ή 914,4 mm (DN 900)
Υλικό αγωγού:	Χάλυβας Υψηλής Αντοχής API 5L X65 Grade B W.T. 9,53 mm με μόνωση 3LPE (3-Layer Polyethylene)
Πλάτος οδοστρώματος:	20 m
Μέγιστο βάθος:	8 m (κάτω από το οδόστρωμα)

Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην Ενότητα 5.1 - Μέθοδος HDD.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Πιθανότητα Εμφάνισης Κινδύνου

Τα αποτελέσματα της έρευνας αναφορικά με την πιθανότητα εμφάνισης των κινδύνων του ερωτηματολογίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και στο Σχήμα 4.1 παρακάτω. Η πιθανότητα εμφάνισης κάθε κινδύνου έχει προκύψει από τον μέσο όρο των πιθανοτήτων που έδωσαν οι ερωτηθέντες.

Πίνακας 4.1: Πιθανότητα Εμφάνισης Κινδύνου HDD

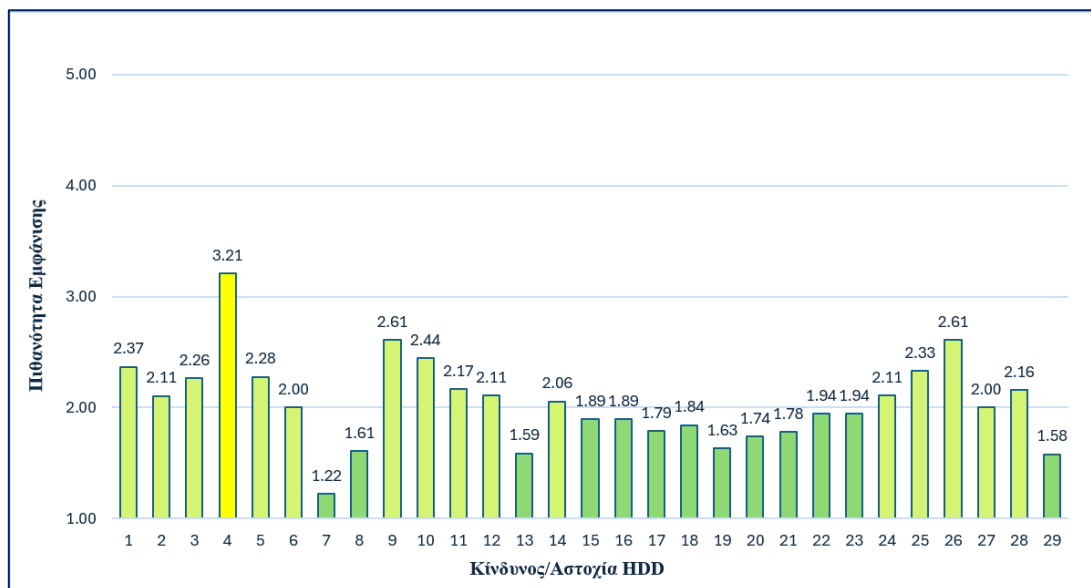
α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης (1 έως 5)
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης	
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)	2,37
2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας	2,11
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα	2,26
4	Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)	3,21
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης	2,28
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης	
6	Τεχνική βλάβη μηχανήματος HDD	2,00
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD	1,22
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού	1,61
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)	2,61
10	Βλάβη διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διεύρυνσης οπών (HDD reamer)	2,44
11	Βλάβη στελεχών διάτρησης	2,17
12	Βλάβη του συστήματος επανακυκλοφορίας του μπετονίτη	2,11
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της	1,59
14	Βλάβη λοιπού εξοπλισμού (π.χ. rollers, balancing system, συρματόσχοινα κ.λπ.)	2,06
Γ	Μελετητικές αστοχίες	

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης (1 έως 5)
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα	1,89
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης	1,89
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης	1,79
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του	1,84
19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων	1,63
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)	1,74
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες	
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)	1,78
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών	1,94
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας	1,94
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών	2,11
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα	2,33
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού	2,61
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους	2,00
Ε	Εξωτερικές συνθήκες	
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνας κ.λπ.)	2,16
29	Πλημμυρικά φαινόμενα	1,58

Διατηρώντας την χρωματική κωδικοποίηση του Πίνακα 3.1 της παρούσης εργασίας γίνεται πιο άμεσα αντιληπτό ότι η πιθανότητα εμφάνισης της πλειοψηφίας των κινδύνων του ερωτηματολογίου χαρακτηρίστηκε από τους ερωτηθέντες ως πολύ μικρή και μικρή. Ένας μόνο κίνδυνος φαίνεται να εμφανίζει μέτρια πιθανότητα εμφάνισης, ενώ δεν καταγράφηκε κανένας κίνδυνος με μεγάλη ή πολύ μεγάλη πιθανότητα.

Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα έδειξαν τις κάτωθι πιθανότητες εμφάνισης:

- Πολύ μικρή πιθανότητα (0% – 20%) για 13 από τους 29 κινδύνους (πράσινο),
- Μικρή πιθανότητα (20% – 40%) για 15 από τους 29 κινδύνους (ανοιχτό πράσινο), και
- Μέτρια πιθανότητα (40% – 60%) για 1 κίνδυνο (κίτρινο).



Σχήμα 4.1: Πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου HDD

Ο κίνδυνος με τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης σύμφωνα με την έρευνα είναι αυτός της διαρροής του μείγματος μπετονίτη (Κίνδυνος A4), κίνδυνος που αναγνωρίστηκε και κατά το στάδιο των προσωπικών συνεντεύξεων με τους εμπειρογνώμονες ως το πιο συχνά εμφανιζόμενο γεγονός στο πεδίο. Έπονται στην κατάταξη οι Κίνδυνοι B9 και Δ26 οι οποίοι περιγράφονται ως αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating) και υποεκτίμηση προϋπολογισμού, αντίστοιχα.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα από την οπτική γωνία των ομάδων Α έως Ε, τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι:

- Α (1-5): Από τους πέντε (5) κινδύνους που σχετίζονται με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης, τέσσερις (4) έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης (2,11-2,37) και ένας (1) όπως ήδη αναφέρθηκε έχει μέτρια πιθανότητα εμφάνισης (3,21).

- Β (6-14): Από τους εννέα (9) κινδύνους που σχετίζονται με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης, έξι (6) έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης (2,00-2,61) και τρεις (3) πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης (1,22-1,61).
- Γ (15-20): Όλοι οι κίνδυνοι που σχετίζονται με μελετητικές αστοχίες (έξι (6) το σύνολο) έχουν πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης (1,63-1,89).
- Δ (21-27): Από τους επτά (7) κινδύνους που σχετίζονται με οργανωτικές/ διαχειριστικές αστοχίες, τέσσερις (4) έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης (2,00-2,61) και τρεις (3) πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης (1,78-1,94).
- Ε (28-29): Από τους δύο (2) κινδύνους που σχετίζονται με εξωτερικές συνθήκες, ένας (1) έχει μικρή πιθανότητα εμφάνισης (2,16) και ένας (1) πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης (1,58).

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η πιο συχνά εμφανιζόμενη κατηγορία κινδύνων είναι αυτή των κινδύνων που σχετίζονται με τις εδαφικές συνθήκες (Α), ενώ η λιγότερο συχνά εμφανιζόμενη κατηγορία κινδύνων είναι αυτή των μελετητικών αστοχιών (Γ).

Από τους κινδύνους που σχετίζονται με οργανωτικές/ διαχειριστικές αστοχίες (Δ) και με εξωτερικές συνθήκες (Ε), οι μισοί περίπου φαίνεται να παρουσιάζουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης και οι άλλοι μισοί πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης.

Αντιθέτως στην κατηγορία Β που σχετίζεται με τον εξοπλισμό, κυριαρχούν οι κίνδυνοι με μικρή πιθανότητα εμφάνισης έναντι των κινδύνων με πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης (6 έναντι 3).

4.2 Σοβαρότητα των Επιπτώσεων

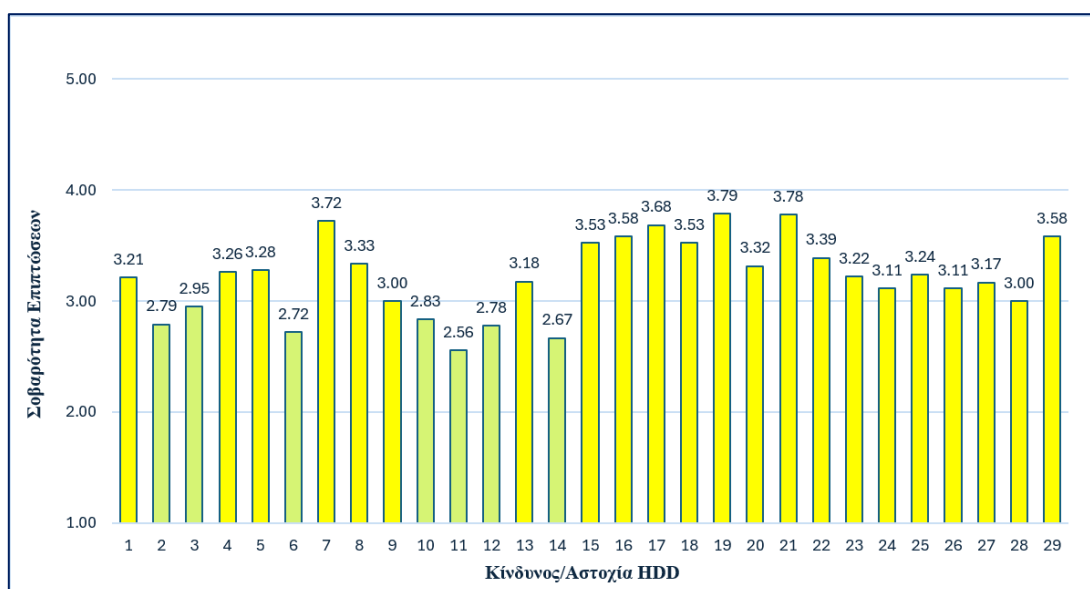
Τα αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με τη σοβαρότητα των επιπτώσεων των κινδύνων του ερωτηματολογίου παρουσιάζονται στη συνέχεια στον Πίνακα 4.2 και στο Σχήμα 4.2. Η εκτίμηση της σοβαρότητας των επιπτώσεων κάθε κινδύνου έχει προκύψει από τον μέσο όρο της εκτίμησης της σοβαρότητας των επιπτώσεων που έδωσαν οι ερωτηθέντες.

Πίνακας 4.2: Σοβαρότητα Επιπτώσεων Κινδύνων HDD

a/a	Κίνδυνοι	Σοβαρότητα Επιπτώσεων (1 έως 5)
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης	
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)	3,21
2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας	2,79
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα	2,95
4	Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)	3,26
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης	3,28
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης	
6	Τεχνική βλάβη μηχανήματος HDD	2,72
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD	3,72
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού	3,33
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)	3,00
10	Βλάβη διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διεύρυνσης οπών (HDD reamer)	2,83
11	Βλάβη στελεχών διάτρησης	2,56
12	Βλάβη του συστήματος επανακυκλοφορίας του μπετονίτη	2,78
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της	3,18
14	Βλάβη λοιπού εξοπλισμού (π.χ. rollers, balancing system, συρματόσχοινα κ.λπ.)	2,67
Γ	Μελετητικές αστοχίες	
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα	3,53
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης	3,58
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης	3,68
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του	3,53
19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων	3,79
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)	3,32

α/α	Κίνδυνοι	Σοβαρότητα Επιπτώσεων (1 έως 5)
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες	
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)	3,78
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών	3,39
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας	3,22
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών	3,11
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα	3,24
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού	3,11
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους	3,17
Ε	Εξωτερικές συνθήκες	
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνας κ.λπ.)	3,00
29	Πλημμυρικά φαινόμενα	3,58

Διατηρώντας τη χρωματική κωδικοποίηση του Πίνακα 3.2 της παρούσης εργασίας, διακρίνεται άμεσα από το παρακάτω σχήμα ότι οι επιπτώσεις της πλειονότητας των κινδύνων (22 από 29), σε περίπτωση που αυτοί εμφανιστούν, κατατάσσονται ως μέτριας σοβαρότητας, δηλαδή βάσει του ορισμού που δόθηκε στον ίδιο πίνακα έχουν ως επίπτωση «σημαντική βλάβη, απώλεια ή καθυστέρηση ή/και σοβαρό τραυματισμό».



Σχήμα 4.2: Σοβαρότητα επιπτώσεων κινδύνων HDD

Για τους υπόλοιπους κινδύνους (επτά (7) το σύνολο) οι επιπτώσεις κατατάσσονται ως μικρής σοβαρότητας, δηλαδή «*Μικρή βλάβη, απώλεια ή καθυστέρηση ή/και μικρό τραυματισμό*». Εξετάζοντας την ομαδοποίηση των κινδύνων παρατηρείται ότι δύο (2) από αυτούς αφορούν τις εδαφικές συνθήκες (Α) και πέντε (5) τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης (Β).

Ως εκ τούτου όλοι οι κίνδυνοι του ερωτηματολογίου που σχετίζονται με μελετητικές αστοχίες (Κατηγορία Γ), οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες (Κατηγορία Δ) και εξωτερικές συνθήκες (Κατηγορία Ε) έχουν επιπτώσεις μέτριας σοβαρότητας.

4.3 Εκτίμηση Διακινδύνευσης

Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 της επόμενης σελίδας και στο Σχήμα 4.3 που τον ακολουθεί. Για τον υπολογισμό της διακινδύνευσης κάθε γραμμής έχει πολλαπλασιαστεί ο μέσος όρος της πιθανότητας εμφάνισης του κινδύνου με το μέσο όρο της σοβαρότητας των επιπτώσεών του.

Με μια γρήγορη ματιά και με βοηθό τη χρωματική απεικόνιση των διαφόρων κατηγοριών, διαφαίνεται ότι η διακινδύνευση γενικά είναι μικρή με μόνες εξαιρέσεις τη διαρροή μπετονίτη (Κίνδυνος Α4) και την υποεκτίμηση του προϋπολογισμού (Κίνδυνος Δ26). Σε αυτές τις περιπτώσεις η διακινδύνευση κατατάσσεται ως μέτρια, γεγονός που με βάση τον Πίνακα 3.4 σημαίνει ότι «*Απαιτείται η λήψη μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης πλέον των συνήθων*».

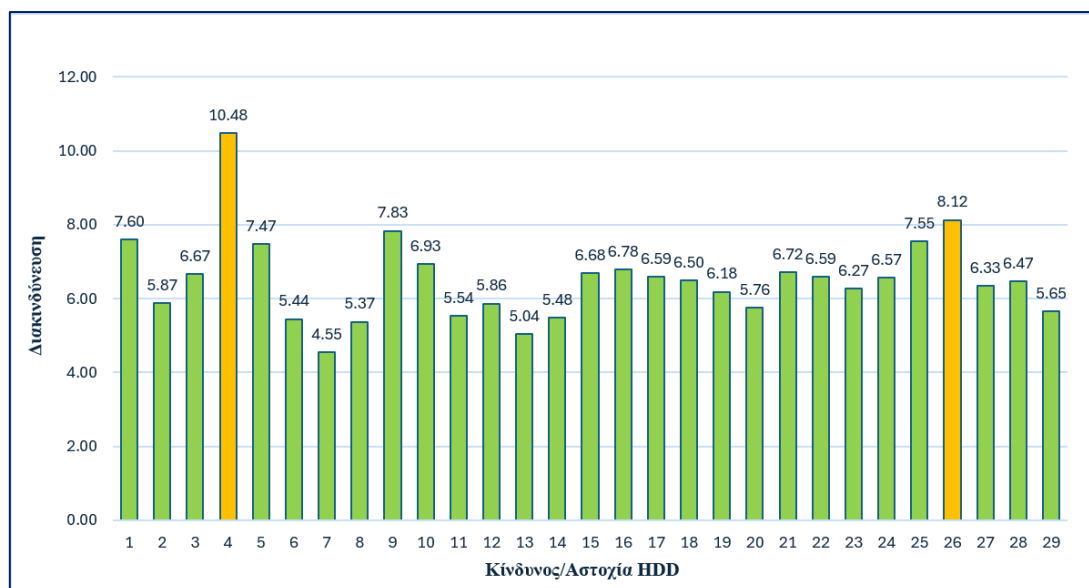
Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει μια σειρά κινδύνων των οποίων η διακινδύνευση βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο να χαρακτηριστεί ως μέτρια και αυτοί είναι με σειρά κατάταξης οι εξής:

- Β9: Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating).
- Α1: Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας).
- Δ25: Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/Νομικά ζητήματα.
- Α5: Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης.

Πίνακας 4.3: Συνολικά Αποτελέσματα Έρευνας

Επεξήγηση Κλιμάκων:		Κλίμακα Πιθανότητας Εμφάνισης																			Κλίμακα Σοβαρότητας Επιπτώσεων																			Κλίμακα Διακινδύνευσης		
		1: Πολύ Μικρή																			1: Πολύ Μικρή																			-		
		2: Μικρή																			2: Μικρή																			Μικρή (1-8)		
		3: Μέτρια																			3: Μέτρια																			Μέτρια (9-19)		
		4: Μεγάλη																			4: Μεγάλη																			Μεγάλη (20-25)		
		5: Πολύ Μεγάλη																			5: Πολύ Μεγάλη																					
Ερωτήσεις:																																										
α/α	Με βάση την εμπειρία σας βαθμολογήστε πόσο συχνά θεωρείτε ότι εμφανίζονται τα παρακάτω προβλήματα/αστοχίες κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της μεθόδου HDD και πόσο σοβαρές είναι οι επιπτώσεις τους	Πιθανότητα Εμφάνισης (Κλίμακα 1 έως 5)																			Σοβαρότητα Επιπτώσεων σε Περίπτωση Εμφάνισης (Κλίμακα 1 έως 5)																			Διακινδύνευση		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	M.O.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	M.O.	
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης																																									
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)	2	4	1	2	2	2	2	3	1	2	2	4	3	2	1	2	4	4	2	2.37	3	3	1	4	3	3	4	3	4	4	4	4	2	4	4	2	3	3	3	3.21	7.60
2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας	1	1	1	3	2	3	1	1	2	3	3	4	2	2	2	1	4	2	2	2.11	3	3	1	4	3	4	3	3	3	2	4	1	2	2	2	3	4	3	2.79	5.87	
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα	1	2	2	2	3	2	4	3	1	3	2	2	3	2	1	2	2	3	3	2.26	2	3	1	4	4	3	4	3	2	3	4	4	1	2	5	1	3	3	4	2.95	6.67
4	Διαρροή μπεντονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)	2	4	3	3	3	3	4	4	3	4	2	4	4	3	4	3	3	4	1	3.21	3	4	2	2	4	4	3	5	1	4	3	4	3	4	4	2	4	3	3	3.26	10.48
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης	1	3	1	2	3	3	1	-	2	3	1	2	2	3	3	2	3	4	2	2.28	4	3	4	2	5	4	5	-	2	4	4	3	1	3	4	1	3	3	4	3.28	7.47
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης																																									
6	Τεχνική βλάβη μηχανήματος HDD	2	1	1	2	2	1	3	3	1	3	-	2	1	3	2	2	4	2	1	2.00	4	2	3	3	3	1	1	3	2	4	-	4	1	3	2	2	3	4	4	2.72	5.44
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	-	1	1	1	1	1	2	2	1	1.22	5	4	3	4	4	1	4	4	1	5	-	4	1	5	5	3	4	5	5	3.72	4.55
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού	1	2	1	1	1	2	1	2	1	3	-	2	1	1	1	2	4	2	1	1.61	4	3	3	4	4	2	5	4	2	5	-	3	1	5	3	1	3	4	4	3.33	5.37
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)	1	4	2	1	3	3	4	2	3	4	-	3	1	3	1	2	4	4	2	2.61	2	2	2	4	4	3	4	4	2	3	-	5	1	3	3	1	3	4	4	3.00	7.83
10	Βλάβη διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διέυρυνσης οπών (HDD reamer)	2	4	2	3	2	2	2	3	2	3	-	3	2	3	2	2	3	3	1	2.44	3	1	1	3	3	2	4	5	4	4	-	4	1	4	2	2	3	2	3	2.83	6.93
11	Βλάβη στελεχών διάτρησης	1	3	1	3	2	2	1	3	2	4	-	3	1	2	2	1	3	3	2	2.17	3	1	3	3	3	2	3	4	2	4	-	4	1	2	2	1	3	2	3	2.56	5.54
12	Βλάβη του συστήματος επανακυκλοφορίας του μπεντονίτη	1	3	1	2	2	2	2	3	3	3	-	3	2	2	2	1	3	2	1	2.11	3	3	1	2	3	3	3	5	1	5	-	4	1	4	3	1	3	3	2	2.78	5.86
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της	1	1	1	3	2	2	2	-	1	3	-	2	1	1	1	1	2	1	2	1.59	3	2	2	3	4	3	4	-	4	4	-	5	1	5	2	2	2	5	3	3.18	5.04
14	Βλάβη λουπού εξοπλισμού (π.χ. rollers, balancing system, συρματοσχίνα κ.λπ.)	1	3	1	3	2	2	2	2	3	2	-	3	2	2	2	1	2	2	2	2.06	3	2	2	2	3	2	3	5	1	4	-	5	1	3	2	2	2	4	2	2.67	5.48
Γ	Μελετητικές αστοχίες																																									
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα	1	1	1	2	2	2	4	2	1	3	1	2	2	1	1	2	3	3	2	1.89	3	3	2	4	4	3	5	5	4	3	4	5	1	4	4	1	4	4	4	3.53	6.68
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης	1	2	1	1	2	2	3	3	1	3	2	2	2	1	2	2	3	2	1	1.89	3	3	1	5	4	3	4	5	4	4	3	5	1	5	3	2	4	4	5	3.58	6.78
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης	1	1	1	1	2	2	1	3	1	2	1	2	2	1	3	2	3	4	1	1.79	3	3	3	4	5	3	4	4	4	4	5	5	1	5	4	2	4	3	4	3.68	6.59
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του	1	2	1	1	2	2	1	3	1	3	2	2	1	1	3	1	3	4	1	1.84	3	2	4	3	5	3	4	4	4	5	5	5	1	4	4	1	4	3	3	3.53	6.50
19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων	1	1	1	1	2	2	1	3	1	3	1	2	1	1	2	1	3	3	1	1.63	3	3	4	4	5	4	4	4	4	5	5	5	1	5	4	1	4	3	4	3.79	6.18
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)	1	2	1	1	2	2	3	3	1	3	1	2	1	1	2	1	3	1	2	1.74	2	3	2	4	4	4	4	4	4	4	3	5	1	4	3	2	4	3	3	3.32	5.76
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες																																									
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	-	2	1	2	4	1	3	2	2	1.78	2	5	4	4	4	3	5	4	5	4	-	5	1	5	4	3	3	4	3	3.78	6.72
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών	1	3	1	1	2	1	3	3	1	3	-	2	1	2	2	1	3	2	3	1.94	3	2	4	3	4	3	4	4	4	4	-	5	1	4	3	3	3	3	4	3.39	6.59
23	Ελαττωματικά υλικά/ πρόβλημα στο σύστημα ποιότητας	1	3	1	1	2	2	2	3	1	3	-	2	2	1	3	1	3	2	2	1.94	3	3	3	3	4	4	3	4	5	4	-	4	1	4	3	2	3	3	2	3.22	6.27
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών	2	1	2	3	2	2	2	4	2	3	-	1	1	2	2	1	3	3	2	2.11	3	4	3	3	3	4	4	5	3	4	-	3	1	3	2	2	3	3	3	3.11	6.57
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα	2	3	3	3	1	1	3	3	1	3	-	1	2	3	2	1	4	4	2	2.33	2	5	3	4	4	2	4	-	3	3	-	5	1	3	3	3	4	4	2	3.24	7.55
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού	1	3	3	4	2	2	3	2	2	2	-	3	3	3	3	1	4	4	2	2.61	3	3	2	3	3	4	3	4	3	4	-	3	1	4	3	2	4	4	3	3.11	8.12
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους	1	2	2	3	1	2	3	2	2	2	-	2	2	1	2	1	4	3	1	2.00	2	4	5	3	2	4	3	4	3	4	-	3	1	3	3	2	4	4	3	3.17	6.33
E	Εξωτερικές συνθήκες																																									
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνας κ.λπ.)	1	3	3	2	2	1	2	1	2	3	2	3	2	3	2	2	3	2	2	2.16	4	2	4	3	3	4	2	3	2	4	4	4	1	3	2	2	4	3	3	3.00	6.47
29	Πλημμυρικά φαινόμενα	1																																								

* Σημείωση: Ως συνέπεια της χρήσης φύλλου excel για τους υπολογισμούς, τα γινόμενα της διακινδύνευσης έχουν μικροδιαφορές δεκαδικών ψηφίων σε σχέση με τους υπολογισμούς που είναι ορατοί στον αναγνώστη.



Σχήμα 4.3: Διακινδύνευση HDD

Με τη βοήθεια της χρωματικής κωδικοποίησης των κλιμάκων πιθανοτήτων και σοβαρότητας συνεπειών, ένα πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται από τον Πίνακα 4.3 είναι ότι η σοβαρότητα των επιπτώσεων έχει σε όλες τις περιπτώσεις αξιολογηθεί υψηλότερα από την πιθανότητα εμφάνισης. Για παράδειγμα ενώ για όλους τους κινδύνους μελετητικής αστοχίας (Γ) ο μέσος όρος των απαντήσεων δίνει πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης, η σοβαρότητα των επιπτώσεων τους κατατάσσεται ως μέτρια. Επίσης, συγκρίνοντας τη χρωματική παλέτα του δεξιού μέρους του πίνακα (σοβαρότητα επιπτώσεων) με το αριστερό μέρος του πίνακα (πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου), γίνεται αντιληπτό ότι το δεξί κομμάτι κινείται περισσότερο στις αποχρώσεις του ροζ σε σχέση με το αριστερό. Πιο συγκεκριμένα, το αριστερό κομμάτι συγκέντρωσε ελάχιστα τεσσάρια (4) και κανένα πεντάρι (5), δηλαδή ελάχιστες εκτιμήσεις μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης κάποιου κινδύνου και καμία εκτίμηση πολύ μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης. Αντίθετα στο δεξί κομμάτι καταγράφονται πολλές απαντήσεις όπου η σοβαρότητα των επιπτώσεων κατατάσσεται ως μεγάλη (4) ή πολύ μεγάλη (5). Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, από κανένα γινόμενο πιθανότητας επί τη σοβαρότητα δεν προέκυψε πολύ μεγάλη διακινδύνευση.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της έρευνας της παρούσης διπλωματικής εργασίας έναντι των αποτελεσμάτων των ερευνών που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.5 της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, προκύπτει ότι αυτά είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα της Gierczak (2014) καθώς αναδεικνύονται τα προβλήματα διαρροής μπετονίτη, η απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος, η

τοπική κατάρρευση της οπής διάτρησης και η υποεκτίμηση του προϋπολογισμού. Επίσης τόσο στην παρούσα έρευνα όσο και στην έρευνα της Gierczak (2014) οι κίνδυνοι κατά την κατασκευή αξιολογούνται ως πιθανότερο να συμβούν σε σχέση με κινδύνους σχετιζόμενους με τη μελέτη, όπως για παράδειγμα η υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων ή ο λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης.

Σε αντίθεση με την έρευνα της Gierczak (2014) που διεξήχθη με στοιχεία από έργα σε Πολωνία, Γαλλία, Ολλανδία, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και Γερμανία, η παρούσα έρευνα δείχνει ότι στον ελλαδικό χώρο προβλήματα εγκρίσεων και αδειοδοτήσεων εκτιμώνται από τους συμμετέχοντες ως πιο πιθανά να συμβούν εν συγκρίσει με τους συμμετέχοντες των άλλων χωρών και με υψηλή σχετικά διακινδύνευση. Ωστόσο δεν δύναται να αξιολογηθεί εάν αυτή η διαφορά έγκειται μόνο στη διαφορετική οργάνωση κάθε χώρας ή εάν οφείλεται εν μέρη και στο γεγονός ότι οι συμμετέχοντες της παρούσης έρευνας δεν είναι εργολάβοι HDD αλλά μελετητές, επιβλέποντες και διαχειριστές έργων.

Σε κάθε περίπτωση η λήψη μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης των κινδύνων έχει εξέχουσα σημασία για την επιτυχία ενός έργου. Ειδικότερα για τους κινδύνους με μέτρια διακινδύνευση A4 και Δ26, όπως ήδη αναφέρθηκε, απαιτείται η λήψη μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης πλέον των συνήθων. Ανάλογα μέτρα συνιστώνται υπέρ της ασφαλείας και για τους κινδύνους των οποίων η διακινδύνευση βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο να χαρακτηριστεί ως μέτρια, δηλαδή τους κινδύνους B9, A1, Δ25 και A5.

Προτεινόμενα μέτρα για τη μείωση της διακινδύνευσης των κινδύνων του ερωτηματολογίου παρουσιάζονται στις Ενότητες 4.5 και 4.6 της παρούσης.

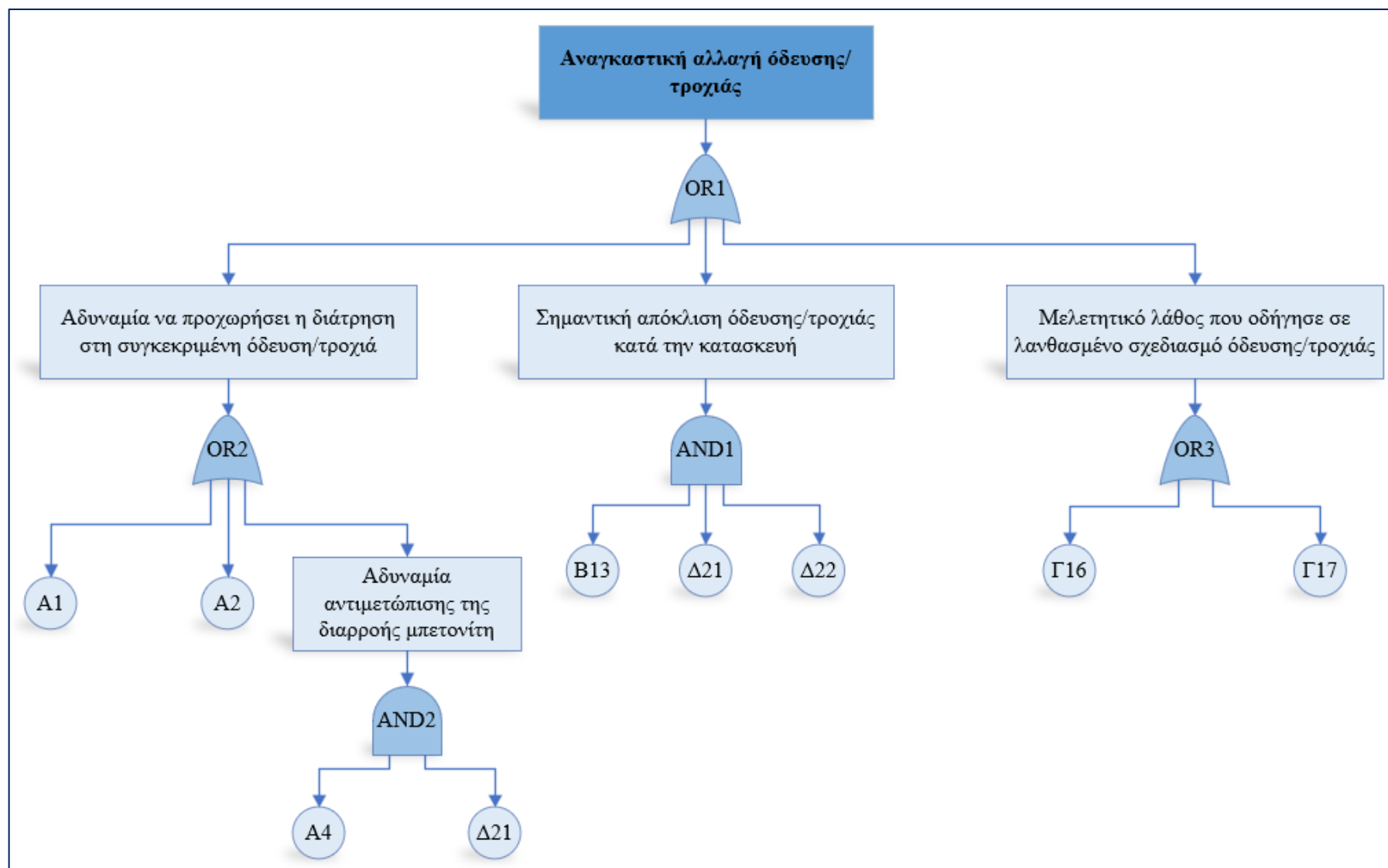
4.4 Εφαρμογή Ανάλυσης Δένδρου Σφάλματος

Για την εφαρμογή ανάλυσης δένδρου σφάλματος, ακολουθώντας το παράδειγμα της Krechowicz (2020), ορίστηκε ως κορυφαίο γεγονός (top event) η περίπτωση κατά την οποία η αστοχία της HDD είναι τέτοια ώστε να μην επιτυγχάνονται πλέον οι στόχοι του έργου, να γίνεται υπέρβαση του εγκεκριμένου προϋπολογισμού ή/και υπέρβαση του εγκεκριμένου χρονοδιαγράμματος του έργου. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4, η περίπτωση που επιλέχθηκε αφορά στη θεωρητικά δυσμενέστερη περίπτωση όπου,

ενώ η εκτέλεση της HDD βρίσκεται σε εξέλιξη, διαπιστώνεται ότι δεν είναι πλέον δυνατό να συνεχίσει την τροχιά της ως έχει και απαιτείται η διακοπή της και εξέταση εναλλακτικής τροχιάς ή η χρήση εναλλακτικής μεθόδου εγκατάστασης του αγωγού.

Λαμβάνοντας υπόψιν ως βασικά γεγονότα τους κινδύνους του ερωτηματολογίου της έρευνας και εξετάζοντας ποια από αυτά και υπό ποιες προϋποθέσεις μπορούν να οδηγήσουν στο κορυφαίο γεγονός αστοχίας της HDD, προέκυψε το δένδρο σφάλματος της επόμενης σελίδας (Σχήμα 4.4). Για την ευκολότερη κατανόηση του σχήματος παρατίθεται παρακάτω η κωδικοποίηση των γεγονότων σύμφωνα με το ερωτηματολόγιο έρευνας:

- A1: Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)
- A2: Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας
- A4: Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)
- B13: Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της
- Γ16: Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης
- Γ17: Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης
- Δ21: Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)
- Δ22: Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών



Σχήμα 4.4: Ανάλυση δένδρου σφάλματος

Υιοθετώντας την παραδοχή ότι τα γεγονότα του ερωτηματολογίου της έρευνας, τα οποία παρατίθενται εκ νέου στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4.4), καλύπτουν το σύνολο των κινδύνων της HDD και ότι είναι στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους υπολογίζεται η σχετική πιθανότητα εμφάνισής τους σε κλίμακα από 0 έως 1.

Πίνακας 4.4: Υπολογισμός Σχετικής Πιθανότητας

<i>a/a</i>	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης (1 έως 5)	Σχετική Πιθανότητα Εμφάνισης (0 έως 1)
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες edάφους κατά το στάδιο της διάτρησης		
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)	2,37	0,040
2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας	2,11	0,036
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα	2,26	0,038
4	Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)	3,21	0,054
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης	2,28	0,038
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης		
6	Τεχνική βλάβη μηχανήματος HDD	2,00	0,034
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD	1,22	0,021
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού	1,61	0,027
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)	2,61	0,044
10	Βλάβη διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διεύρυνσης οπών (HDD reamer)	2,44	0,041
11	Βλάβη στελεχών διάτρησης	2,17	0,037
12	Βλάβη του συστήματος επανακυκλοφορίας του μπετονίτη	2,11	0,036
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της	1,59	0,027
14	Βλάβη λοιπού εξοπλισμού (π.χ. rollers, balancing system, συρματοσχοίνα κ.λπ.)	2,06	0,035
Γ	Μελετητικές αστοχίες		
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα	1,89	0,032

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης (1 έως 5)	Σχετική Πιθανότητα Εμφάνισης (0 έως 1)
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης	1,89	0,032
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης	1,79	0,030
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του	1,84	0,031
19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων	1,63	0,028
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)	1,74	0,029
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες		
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)	1,78	0,030
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών	1,94	0,033
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας	1,94	0,033
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών	2,11	0,036
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα	2,33	0,039
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού	2,61	0,044
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους	2,00	0,034
Ε	Εξωτερικές συνθήκες		
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνα κ.λπ.)	2,16	0,036
29	Πλημμυρικά φαινόμενα	1,58	0,027
	ΣΥΝΟΛΟ:	59,28	1,000

Για στατιστικώς ανεξάρτητα γεγονότα η πιθανότητα του κορυφαίου γεγονότος του δένδρου σφάλματος του Σχήματος 4.4, δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = [P(A1) + P(A2) + P(A4) \times P(\Delta 21)] + [P(B13) \times P(\Delta 21) \times P(\Delta 22)] + [P(\Gamma 16) \times P(\Gamma 17)]$$

Αντικαθιστώντας με τις σχετικές πιθανότητες του Πίνακα 4.4 για τα γεγονότα A1, A2, A4, Δ21, B13, Δ22, Γ16 και Γ17, η παραπάνω σχέση δίνει:

$$P = [0,040 + 0,036 + (0,054 \times 0,030)] + (0,027 \times 0,030 \times 0,033) + (0,032 + 0,030)] = 0,139$$

Αυτό σημαίνει ότι το ενδεχόμενο να συμβεί το κορυφαίο γεγονός κατά την εκτέλεση της HDD, δηλαδή να σταματήσει η διάτρηση ή η εγκατάσταση του αγωγού και να χρειαστεί αλλαγή όδευσης/τροχιάς ή αλλαγή μεθόδου εγκατάστασης του αγωγού, έχει περίπου 14% πιθανότητα να συμβεί.

4.5 Προτεινόμενα Μέτρα και Σχέδιο Βάσης για τη Διαχείριση Κινδύνου της HDD

Αξιολογώντας τις βασικές στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου που αναφέρονται στην Ενότητα 2.3.2, επιλέγεται ως καταλληλότερη για τη διαχείριση των κινδύνων της HDD η στρατηγική μείωσης της πιθανότητας να συμβεί το γεγονός του κινδύνου ή/και μείωσης της σοβαρότητας των επιπτώσεών του. Αυτό πρακτικά σημαίνει τη λήψη μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης.

Τα προτεινόμενα μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης των κινδύνων της HDD προκύπτουν βάσει εμπειρίας και βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Ενότητα 2.6) και δίνονται στον παρακάτω Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου HDD (Πίνακας 4.5). Το μητρώο αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό σχέδιο βάσης διαχείρισης των κινδύνων της HDD για κάθε επαγγελματία και εταιρεία που δραστηριοποιείται στο χώρο.

Βάσει των αποτελεσμάτων της έρευνας και της ανάλυσης δένδρου σφάλματος, για τους πιο συχνά εμφανιζόμενους κινδύνους, για αυτούς με τη μεγαλύτερη διακινδύνευση, καθώς και για αυτούς που δύναται να οδηγήσουν στο κορυφαίο γεγονός της εγκατάλειψης της HDD, αξίζει να τονιστεί ιδιαίτερα η λήψη των παρακάτω μέτρων:

- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας.
- Προσεκτικός σχεδιασμός της όδευσης/τροχιάς της HDD.

- Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.
- Προσεκτικός καθορισμός του ιξώδους του λασπώδους υγρού γεώτρησης μέσω ακριβούς καθορισμού του μείγματος νερού/μπετονίτη/πρόσθετων. Συνεχής παρακολούθηση καθ' όλη τη διαδικασία εκτέλεσης της HDD. Εκπόνηση σχεδίου αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση διαρροής μείγματος μπετονίτη, με ιδιαίτερη έμφαση στην προστασία υδάτινων συστημάτων, όπως ποτάμια, υδροβιότοποι, κ.λπ.
- Εκτίμηση και διασφάλιση επιπλέον κονδυλίου επί του προϋπολογισμού για τα απρόβλεπτα της HDD.
- Προσεκτικός υπολογισμός της αντοχής της εξωτερικής προστατευτικής επένδυσης του αγωγού.
- Συστηματική επίβλεψη των εργασιών από έμπειρο προσωπικό.
- Καθορισμός σχεδίου δράσης για την περίπτωση που προκύψει ανάγκη για επιπλέον αδειοδοτήσεις κατά την εκτέλεση του έργου.

Πίνακας 4.5: Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου HDD

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης				
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)	2,37	3,21	7,60	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. - Επισταμένη έρευνα και συγκέντρωση στοιχείων για την ύπαρξη υπόγειων τεχνικών έργων ή άλλων εμποδίων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ύπαρξής τους πριν την οριστικοποίηση της θέσης της διάτρησης.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας	2,11	2,79	5,87	• Σήμανση επί του εδάφους της όδευσης κάθε γνωστού δικτύου στην περιοχή του έργου. • Οπτικός έλεγχος κατά μήκος της όδευσης της HDD για κατασκευές που σχετίζονται με πιθανά υπόγεια δίκτυα (π.χ. μετρητές φυσικού αερίου και καλύμματα/καπάκια φρεατίων). • Έλεγχος υπαρχόντων σχεδίων δικτύων και επαφή με τις εταιρείες κοινής ωφέλειας για εξακρίβωση των θέσεων των δικτύων. • Σύγκριση των γραμμών σήμανσης με τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν για να διασφαλιστεί ότι έχουν εντοπιστεί και επισημανθεί όλα τα δίκτυα. • Εκσκαφή ερευνητικών τάφρων για περαιτέρω εξακρίβωση των θέσεων των υπόγειων δικτύων. (OSHA, 2018) • Εκπόνηση πλάνου έκτακτης ανάγκης και άμεσης διαχείρισης σε περίπτωση που χτυπηθεί δίκτυο κοινής ωφέλειας (Latorre et al., 2002).

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα	2,26	2,95	6,67	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. - Σε περίπτωση που αποφασιστεί σημαντική αύξηση του βάθους της HDD σε σχέση με την αρχική μελέτη συνιστάται η διεξαγωγή πρόσθετων διερευνητικών γεωτρήσεων ώστε να επιβεβαιωθούν οι εδαφικές συνθήκες στο νέο βάθος (Peters et al., 2014).

4	Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)	3,21	3,26	10,48	• Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. • Τοποθέτηση των γεωτρήσεων της γεωτεχνικής έρευνας σε απόσταση τουλάχιστον 7,6 m από τον άξονα της όδευσης της HDD, έτσι ώστε να μη δημιουργούνται δυνητικά κανάλια διαφυγής μπετονίτη (Peters et al., 2014). • Καθώς η διαρροή μπετονίτη σε προστατευόμενες περιοχές δύναται να δημιουργήσει σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα, τα σημεία εισόδου και εξόδου πρέπει να τοποθετούνται εκτός ζωνών υψηλής προστασίας. • Προσεκτική επιλογή μείγματος λάσπης γεώτρησης βάσει της γεωτεχνικής έρευνας. • Συνιστάται η χρήση ειδικού γεωτεχνικού υπολογιστικού προγράμματος H/Y για τη μελέτη (Peters et al., 2014). • Παρακολούθηση πίεσης λάσπης: Συνεχής παρακολούθηση της πίεσης του δακτυλιοειδούς υγρού γεώτρησης για να διασφαλιστεί ότι δεν υπερβαίνει την αντοχή θραύσης του γεωλογικού σχηματισμού, αποτρέποντας τις ρωγμές. • Εκπόνηση πλάνου έκτακτης ανάγκης και άμεσης διαχείρισης σε περίπτωση διαρροής (Peters et al., 2014).
---	---	------	------	-------	--

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης	2,28	3,28	7,47	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. - Κατάλληλη επιλογή γεωτεχνικών παραμέτρων για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής των πετρωμάτων έναντι υδραυλικής ρωγμάτωσης/θραύσης η οποία δύναται να προκληθεί από υψηλή πίεση του μείγματος μπετονίτη (Park, Kang & Bayat, 2023; Park et al., 2024) - Επιλογή κατάλληλου μείγματος μπετονίτη και διασφάλιση της συνεχούς ροής του. - Παρακολούθηση πίεσης λάσπης: Συνεχής παρακολούθηση της πίεσης του δακτυλιοειδούς υγρού γεώτρησης για να διασφαλιστεί ότι δεν υπερβαίνει την αντοχή θραύσης του γεωλογικού σχηματισμού, αποτρέποντας τις ρωγμές.
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης				
6	Τεχνική βλάβη μηχανήματος HDD	2,00	2,72	5,44	Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD	1,22	3,72	4,55	• Τοποθέτηση του μηχανήματος πάνω σε ειδικά διαμορφωμένο έδαφος/ πλατφόρμα. • Λήψη μέτρων σταθεροποίησης όπως η αγκύρωση με συρματόσχοινα ή η τοποθέτηση πασσαλότοιχου μπροστά από το μηχάνημα. • Τήρηση αποστάσεων ασφαλείας από το προσωπικό, ανάλογα με την εργασία που εκτελεί.
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού	1,61	3,33	5,37	• Κατάλληλη επιλογή υλικού κατά τη μελέτη. • Υιοθέτηση ήπιας κλίσης τροχιάς του αγωγού. • Ποιοτικός έλεγχος των προμηθειών.
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)	2,61	3,00	7,83	• Επιλογή κατάλληλου μείγματος μπετονίτη και διασφάλιση της συνεχούς ροής του για την αποφυγή τριβής των σωλήνων με τους γεωλογικούς σχηματισμούς. • Χρήση καθοδικής προστασίας.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
10	Βλάβη διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διεύρυνσης οπών (HDD reamer)	2,44	2,83	6,93	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους για την επιλογή κατάλληλης κεφαλής γεώτρησης και διαμορφωτών. - Χρήση εργαλείων διεύρυνσης με αυξημένη αντοχή υλικού (Zhu et al., 2014). - Σε περιπτώσεις εναλλαγής μαλακών και σκληρών εδαφών κατά τη διάτρηση συνιστάται η μείωση της δύναμης έλκυσης και των στροφών ανά λεπτό (Zhu et al., 2014).
11	Βλάβη στελεχών διάτρησης	2,17	2,56	5,54	- Υιοθέτηση ήπιας κλίσης τροχιάς του αγωγού. - Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.
12	Βλάβη του συστήματος επανακυκλοφορίας του μπετονίτη	2,11	2,78	5,86	Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της	1,59	3,18	5,04	Τεχνολογία Παρακολούθησης: Χρήση προηγμένων μεθόδων παρακολούθησης, όπως ηλεκτρομαγνητικά συστήματα walk-over ή παρακολούθηση με βάση γυροσκόπια, για να διατηρηθεί το τρυπάνι στην καθορισμένη διαδρομή, αποφεύγοντας την υπερβολική γεώτρηση.
14	Βλάβη λοιπού εξοπλισμού (π.χ. rollers, balancing system, συρματόσχοινα κ.λπ.)	2,06	2,67	5,48	Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.
Γ	Μελετητικές αστοχίες				
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα	1,89	3,53	6,68	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. - Σε περίπτωση που αποφασιστεί σημαντική αύξηση του βάθους της HDD σε σχέση με την αρχική μελέτη συνιστάται η διεξαγωγή πρόσθετων διερευνητικών γεωτρήσεων ώστε να επιβεβαιωθούν οι εδαφικές συνθήκες στο νέο βάθος (Peters et al., 2014).

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης	1,89	3,58	6,78	- Υιοθέτηση οδηγιών όπως αυτών του US Army Corps of Engineers® Engineer Research and Development Center, το οποίο προδιαγράφει το ελάχιστο βάθος από 1,2 m έως 4,5 m, ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού (Latorre et al., 2002). - Ιδιαίτερη προσοχή στις περιπτώσεις με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα (Peters et al., 2014).
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης	1,79	3,68	6,59	- Επιλογή ήπιας γεωμετρίας. - Αποφυγή ταυτόχρονης οριζόντιας και κατακόρυφης καμπυλότητας. - Υιοθέτηση μεγάλων ακτίνων καμπυλότητας. - Καθορισμός ακτίνας καμπυλότητας διάτρησης έπειτα από διερεύνηση της ακτίνας καμπυλότητας του στελέχους διάτρησης σε συνδυασμό με τη μέγιστη καμπύλη στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ασφαλώς ο σωλήνας χωρίς αστοχία υλικού. (Peters et al., 2014)
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του	1,84	3,53	6,50	- Επιλογή έμπειρου μελετητή. - Επιλογή μεγέθους μηχανήματος HDD υπέρ της ασφαλείας.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων	1,63	3,79	6,18	Επιλογή έμπειρου μελετητή.
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)	1,74	3,32	5,76	Χρήση καθοδικής προστασίας.
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες				
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)	1,78	3,78	6,72	Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών	1,94	3,39	6,59	Διασφάλιση συνεχούς επίβλεψης από έμπειρο προσωπικό.
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας	1,94	3,22	6,27	- Άμεση αντικατάσταση των ελαττωματικών υλικών. - Διερεύνηση των προβλημάτων στο σύστημα ποιότητας έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα ξαναπαρουσιαστούν.
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών	2,11	3,11	6,57	- Έγκαιρη παραγγελία των απαραίτητων υλικών, εξοπλισμού και ανταλλακτικών. - Συνεννοήσεις με τοπικούς προμηθευτές έτσι ώστε να διασφαλιστούν εγκαίρως πρόσθετες ποσότητες εφόσον χρειαστούν.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα	2,33	3,24	7,55	- Απαιτείται η συμβολή ειδικών επί των αδειοδοτήσεων έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι θα ληφθούν όλες οι απαιτούμενες άδειες, σύμφωνα και με τη νομοθεσία, πριν από την έναρξη του έργου. - Καθορισμός σχεδίου δράσης για την περίπτωση που προκύψει ανάγκη για επιπλέον αδειοδοτήσεις κατά την εκτέλεση του έργου.
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού	2,61	3,11	8,12	- Εκτίμηση προϋπολογισμού από ειδικό με πολυετή εμπειρία στο συγκεκριμένο αντικείμενο. - Εκτίμηση και διασφάλιση επιπλέον κονδυλίου επί του προϋπολογισμού για τα απρόβλεπτα της HDD. Συνιστάται αυτό να είναι πάνω από το 10% που συνήθως εκτιμάται για τα απρόβλεπτα των έργων (βλ. Ενότητα 5.3.2).
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους	2,00	3,17	6,33	Απαιτείται η συμβολή εξειδικευμένων Νομικών Συμβούλων και Διαχειριστή Συμβάσεων.
E	Εξωτερικές συνθήκες				
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνας κ.λπ.)	2,16	3,00	6,47	Διακοπή εργασιών.

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης
29	Πλημμυρικά φαινόμενα	1,58	3,58	5,65	- Αποφυγή στησίματος εργοταξίου εντός πλημμυρικής ζώνης. - Κατάλληλη διασφάλιση εξοπλισμού και υλικών από ενδεχόμενη πλημμύρα. - Κατάλληλη διασφάλιση των υλικών εκσκαφής και του επαναχρησιμοποιημένου μείγματος λάσπης μπετονίτη ώστε να μην διαρρεύσουν και επιβαρύνουν περιβαλλοντικά καλλιεργήσιμες περιοχές και υδάτινα συστήματα (Sun et al., 2024; The City of Overland Park, 2002). - Διακοπή εργασιών.

* Σημείωση: Ως συνέπεια της χρήσης φύλλου excel για τους υπολογισμούς, τα γινόμενα της διακινδύνευσης έχουν μικροδιαφορές δεκαδικών ψηφίων σε σχέση με τους υπολογισμούς που είναι ορατοί στον αναγνώστη.

4.6 Εκτίμηση Διακινδύνευσης μετά τη Λήψη Μέτρων Διαχείρισης Κινδύνου – Εναπομένουσα Διακινδύνευση

Θεωρώντας ότι θα εφαρμοστούν τα προτεινόμενα μέτρα της προηγούμενης ενότητας, εξετάζεται στη συνέχεια η εκτιμώμενη αποτελεσματικότητά τους και η εναπομένουσα διακινδύνευση για τις περιπτώσεις όπου είτε η πιθανότητα εμφάνισης είτε η σοβαρότητα των επιπτώσεων είτε η διακινδύνευση εκτιμήθηκαν αρχικά ως μέτριες. Οι περιπτώσεις αυτές αφορούν τους είκοσι δύο (22) από τους είκοσι εννέα (29) κινδύνους της έρευνας και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων έγινε βάσει επαγγελματικής εμπειρίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 της επόμενης σελίδας.

Πίνακας 4.6: Μητρώο Εναπομένουσας Διακινδύνευσης HDD

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης							
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)	2,37	3,21	7,60	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. - Επισταμένη έρευνα και συγκέντρωση στοιχείων για την ύπαρξη υπόγειων τεχνικών έργων ή άλλων εμποδίων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ύπαρξής τους πριν την οριστικοποίηση της θέσης της διάτρησης.	1	3	3

4	Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)	3,21	3,26	10,48	• Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. • Τοποθέτηση των γεωτρήσεων της γεωτεχνικής έρευνας σε απόσταση τουλάχιστον 7,6 m από τον άξονα της όδευσης της HDD, έτσι ώστε να μη δημιουργούνται δυνητικά κανάλια διαφυγής μπετονίτη (Peters et al., 2014). • Καθώς η διαρροή μπετονίτη σε προστατευόμενες περιοχές δύναται να δημιουργήσει σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα, τα σημεία εισόδου και εξόδου πρέπει να τοποθετούνται εκτός ζωνών υψηλής προστασίας. • Προσεκτική επιλογή μείγματος λάσπης γεώτρησης βάσει της γεωτεχνικής έρευνας. • Συνιστάται η χρήση ειδικού γεωτεχνικού υπολογιστικού προγράμματος H/Y για τη μελέτη (Peters et al., 2014). • Παρακολούθηση πίεσης λάσπης: Συνεχής παρακολούθηση της πίεσης του δακτυλιοειδούς υγρού γεώτρησης για να διασφαλιστεί ότι δεν υπερβαίνει την αντοχή θραύσης του γεωλογικού	2	2	4
---	---	------	------	-------	--	---	---	---

<i>a/a</i>	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
					σχηματισμού, αποτρέποντας τις ρωγμές. Εκπόνηση πλάνου έκτακτης ανάγκης και άμεσης διαχείρισης σε περίπτωση διαρροής (Peters et al., 2014).			

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης	2,28	3,28	7,47	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. - Κατάλληλη επιλογή γεωτεχνικών παραμέτρων για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής των πετρωμάτων έναντι υδραυλικής ρωγμάτωσης/θραύσης η οποία δύναται να προκληθεί από υψηλή πίεση του μείγματος μπετονίτη (Park, Kang & Bayat, 2023; Park et al., 2024) - Επιλογή κατάλληλου μείγματος μπετονίτη και διασφάλιση της συνεχούς ροής του. - Παρακολούθηση πίεσης λάσπης: Συνεχής παρακολούθηση της πίεσης του δακτυλιοειδούς υγρού γεώτρησης για να διασφαλιστεί ότι δεν υπερβαίνει την αντοχή θραύσης του γεωλογικού σχηματισμού, αποτρέποντας τις ρωγμές.	1	3	3
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης							

a/a	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD	1,22	3,72	4,55	- Τοποθέτηση του μηχανήματος πάνω σε ειδικά διαμορφωμένο έδαφος/ πλατφόρμα. - Λήψη μέτρων σταθεροποίησης όπως η αγκύρωση με συρματόσχοινα ή η τοποθέτηση πασσαλότοιχου μπροστά από το μηχάνημα. - Τήρηση αποστάσεων ασφαλείας από το προσωπικό, ανάλογα με την εργασία που εκτελεί.	1	3	3
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού	1,61	3,33	5,37	- Κατάλληλη επιλογή υλικού κατά τη μελέτη. - Υιοθέτηση ήπιας κλίσης τροχιάς του αγωγού. - Ποιοτικός έλεγχος των προμηθειών.	1	3	3
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)	2,61	3,00	7,83	- Επιλογή κατάλληλου μείγματος μπετονίτη και διασφάλιση της συνεχούς ροής του για την αποφυγή τριβής των σωλήνων με τους γεωλογικούς σχηματισμούς. - Χρήση καθοδικής προστασίας.	2	2	4

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της	1,59	3,18	5,04	Τεχνολογία Παρακολούθησης: Χρήση προηγμένων μεθόδων παρακολούθησης, όπως ηλεκτρομαγνητικά συστήματα walk-over ή παρακολούθηση με βάση γυροσκόπια, για να διατηρηθεί το τρυπάνι στην καθορισμένη διαδρομή, αποφεύγοντας την υπερβολική γεώτρηση.	1	3	3
Γ	Μελετητικές αστοχίες							
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα	1,89	3,53	6,68	- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας. Ολοκληρωμένη δειγματοληψία εδάφους. - Σε περίπτωση που αποφασιστεί σημαντική αύξηση του βάθους της HDD σε σχέση με την αρχική μελέτη συνιστάται η διεξαγωγή πρόσθετων διερευνητικών γεωτρήσεων ώστε να επιβεβαιωθούν οι εδαφικές συνθήκες στο νέο βάθος (Peters et al., 2014).	1	3	3

a/a	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης	1,89	3,58	6,78	- Υιοθέτηση οδηγιών όπως αυτών του US Army Corps of Engineers® Engineer Research and Development Center, το οποίο προδιαγράφει το ελάχιστο βάθος από 1,2 m έως 4,5 m, ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού (Latorre et al., 2002). - Ιδιαίτερη προσοχή στις περιπτώσεις με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα (Peters et al., 2014).	1	3	3
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης	1,79	3,68	6,59	- Επιλογή ήπιας γεωμετρίας. - Αποφυγή ταυτόχρονης οριζόντιας και κατακόρυφης καμπυλότητας. - Υιοθέτηση μεγάλων ακτίνων καμπυλότητας. - Καθορισμός ακτίνας καμπυλότητας διάτρησης έπειτα από διερεύνηση της ακτίνας καμπυλότητας του στελέχους διάτρησης σε συνδυασμό με τη μέγιστη καμπύλη στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ασφαλώς ο σωλήνας χωρίς αστοχία υλικού. (Peters et al., 2014)	1	2	2

a/a	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του	1,84	3,53	6,50	- Επιλογή έμπειρου μελετητή. - Επιλογή μεγέθους μηχανήματος HDD υπέρ της ασφαλείας.	1	3	3
19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων	1,63	3,79	6,18	Επιλογή έμπειρου μελετητή.	1	3	3
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)	1,74	3,32	5,76	Χρήση καθοδικής προστασίας.	1	2	2
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες							
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)	1,78	3,78	6,72	Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.	1	2	2
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών	1,94	3,39	6,59	Διασφάλιση συνεχούς επίβλεψης από έμπειρο προσωπικό.	1	3	3

α/α	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας	1,94	3,22	6,27	- Άμεση αντικατάσταση των ελαττωματικών υλικών. - Διερεύνηση των προβλημάτων στο σύστημα ποιότητας έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα ξαναπαρουσιαστούν.	1	2	2
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών	2,11	3,11	6,57	- Έγκαιρη παραγγελία των απαραίτητων υλικών, εξοπλισμού και ανταλλακτικών. - Συνεννοήσεις με τοπικούς προμηθευτές έτσι ώστε να διασφαλιστούν εγκαίρως πρόσθετες ποσότητες εφόσον χρειαστούν.	1	2	2
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα	2,33	3,24	7,55	- Απαιτείται η συμβολή ειδικών επί των αδειοδοτήσεων έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι θα ληφθούν όλες οι απαιτούμενες άδειες, σύμφωνα και με τη νομοθεσία, πριν από την έναρξη του έργου. - Καθορισμός σχεδίου δράσης για την περίπτωση που προκύψει ανάγκη για επιπλέον αδειοδοτήσεις κατά την εκτέλεση του έργου.	1	2	2

a/a	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού	2,61	3,11	8,12	- Εκτίμηση προϋπολογισμού από ειδικό με πολυετή εμπειρία στο συγκεκριμένο αντικείμενο. - Εκτίμηση και διασφάλιση επιπλέον κονδυλίου επί του προϋπολογισμού για τα απρόβλεπτα της HDD. Συνιστάται αυτό να είναι πάνω από το 10% που συνήθως εκτιμάται για τα απρόβλεπτα των έργων (βλ. Ενότητα 5.3.2).	1	2	2
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους	2,00	3,17	6,33	Απαιτείται η συμβολή εξειδικευμένων Νομικών Συμβούλων και Διαχειριστή Συμβάσεων.	1	2	2
E	Εξωτερικές συνθήκες							
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνας κ.λπ.)	2,16	3,00	6,47	Διακοπή εργασιών.	2	2	4

a/a	Κίνδυνοι	Πιθανότητα Εμφάνισης	Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Διακινδύνευση	Προτεινόμενα Μέτρα Πρόληψης και Αντιμετώπισης	Νέα Πιθανότητα Εμφάνισης	Νέα Σοβαρότητα Επιπτώσεων	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
29	Πλημμυρικά φαινόμενα	1,58	3,58	5,65	- Αποφυγή στησίματος εργοταξίου εντός πλημμυρικής ζώνης. - Κατάλληλη διασφάλιση εξοπλισμού και υλικών από ενδεχόμενη πλημμύρα. - Κατάλληλη διασφάλιση των υλικών εκσκαφής και του επαναχρησιμοποιημένου μείγματος λάσπης μπετονίτη ώστε να μην διαρρέυσουν και επιβαρύνουν περιβαλλοντικά καλλιεργήσιμες περιοχές και υδάτινα συστήματα (Sun et al., 2024; The City of Overland Park, 2002). - Διακοπή εργασιών.	1	2	2

4.6.1 Μέτρα Διαχείρισης και Μείωση Πιθανότητας Εμφάνισης

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.6, ένα πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις τα προτεινόμενα μέτρα μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης του κινδύνου. Ιδιαίτερα στην περίπτωση διαρροής μπετονίτη (Κίνδυνος A4) που ήταν και η μοναδική στην κατηγορία μέτριας πιθανότητας, η πιθανότητα εμφάνισής της πέφτει σε μικρή.

4.6.2 Μέτρα Διαχείρισης και Μείωση Σοβαρότητας Επιπτώσεων

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, τα προτεινόμενα μέτρα δεν φαίνεται να επηρεάζουν το ίδιο όλες τις ομάδες κινδύνων ως προς τη μείωση της σοβαρότητας των επιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα:

- Στην Ομάδα Α (κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης), από τους τρεις (3) κινδύνους η σοβαρότητα των επιπτώσεων φαίνεται ουσιαστικά να μειώνεται μόνο για την περίπτωση διαρροής μπετονίτη (Κίνδυνος A4).
- Στην Ομάδα Β (κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης), από τους τέσσερις (4) κινδύνους η σοβαρότητα των επιπτώσεων φαίνεται ουσιαστικά να μειώνεται μόνο για την περίπτωση βλάβης της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating) (Κίνδυνος B9).
- Στην Ομάδα Γ (μελετητικές αστοχίες), η σοβαρότητα των επιπτώσεων φαίνεται ουσιαστικά να μειώνεται σε δύο (2) από τους έξι (6) κινδύνους: Γ17 και Δ20.
- Στην Ομάδα Δ (οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες), η σοβαρότητα των επιπτώσεων μειώνεται στις περισσότερες από τις περιπτώσεις από μέτρια σε μικρή (έξι (6) στις επτά (7) περιπτώσεις).
- Στην Ομάδα Ε (εξωτερικές συνθήκες), η σοβαρότητα των επιπτώσεων μειώνεται και για τους δύο (2) κινδύνους E28 και E29.

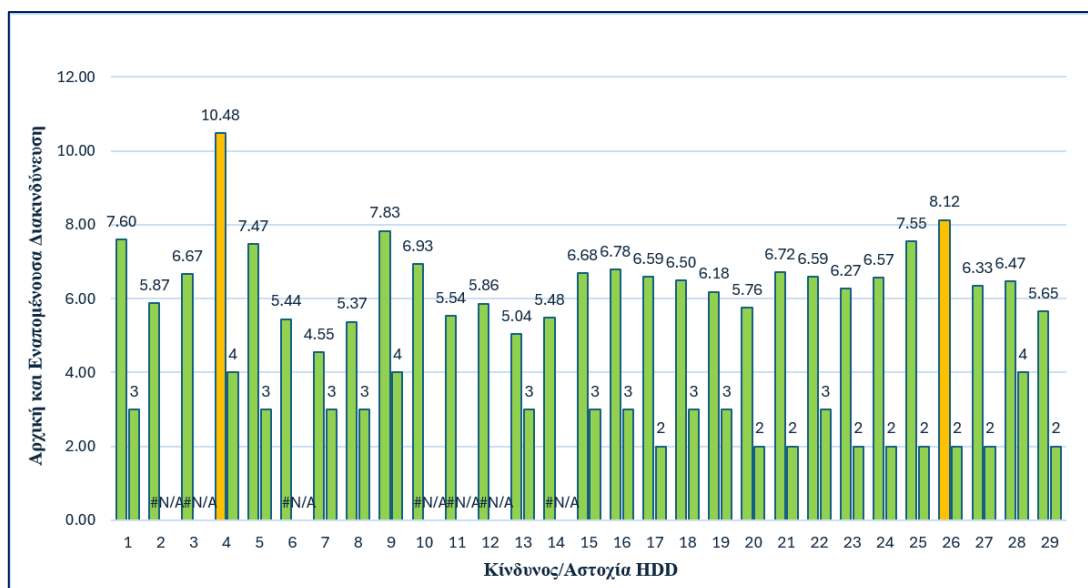
Με άλλα λόγια τα προτεινόμενα μέτρα μειώνουν τη σοβαρότητα των επιπτώσεων κυρίως για τους κινδύνους που αφορούν οργανωτικές/διαχειριστικές αστοχίες και εξωτερικές συνθήκες και λιγότερο για τους κινδύνους που αφορούν το έδαφος και τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης ή μελετητικές αστοχίες.

4.6.3 Εναπομένουσα Διακινδύνευση

Επιστρέφοντας στην αρχική διακινδύνευση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν δύο (2) κίνδυνοι για τους οποίους αυτή έχει εκτιμηθεί ως μέτρια: η διαρροή μπετονίτη (Κίνδυνος A4) και η υποεκτίμηση του προϋπολογισμού (Δ26). Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.6 δείχνουν ότι με τα προτεινόμενα μέτρα η τιμή της διακινδύνευσης και για τις δύο αυτές περιπτώσεις μειώνεται σημαντικά και πέφτει σε κατάταξη από μέτρια σε μικρή. Ταυτόχρονα, σημαντική μείωση της τιμής διακινδύνευσης παρατηρείται και στους υπόλοιπους κινδύνους των οποίων η αρχική διακινδύνευση είχε ήδη καταταχθεί ως μικρή. Το γεγονός αυτό φαίνεται πιο καθαρά στον Πίνακα 4.7, ο οποίος αποτελεί σύνοψη του Πίνακα 4.6 και συγκρίνει την αρχική με την εναπομένουσα διακινδύνευση, καθώς και στο Σχήμα 4.5 της επόμενης σελίδας.

Πίνακας 4.7: Σύγκριση Αρχικής και Τελικής Διακινδύνευσης

a/a	Αρχική Διακινδύνευση	Εναπομένουσα Διακινδύνευση	a/a	Αρχική Διακινδύνευση	Εναπομένουσα Διακινδύνευση
A			Δ		
1	7,60	3	21	6,72	2
4	10,48	4	22	6,59	3
5	7,47	3	23	6,27	2
B			24	6,57	2
7	4,55	3	25	7,55	2
8	5,37	3	26	8,12	2
9	7,83	4	27	6,33	2
13	5,04	3	E		
Γ			28	6,47	4
15	6,68	3	29	5,65	2
16	6,78	3			
17	6,59	2			
18	6,50	3			
19	6,18	3			
20	5,76	2			



Σχήμα 4.5: Σύγκριση αρχικής και εναπομένουσας διακινδύνευσης HDD

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται σαφές ότι με τα κατάλληλα μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης, όπως αυτά που προτείνονται στο Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου (Πίνακας 4.5), η διακινδύνευση της μεθόδου HDD μπορεί να μειωθεί σημαντικά και η εναπομένουσα διακινδύνευση να αξιολογηθεί ως μικρή, δηλαδή αποδεκτή με χρήση συνήθων μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης.

5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ

5.1 Μέθοδος HDD

Για την οικονομική αποτίμηση της μεθόδου της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης (HDD) εξετάζεται το σενάριο της μελέτης περίπτωσης της Ενότητας 3.5. Πρόκειται για την εγκατάσταση αγωγού διαμέτρου 36" (API 5L X65 Grade B W.T. 9,53 mm με μόνωση 3LPE) κάτω από Εθνική Οδό με δύο (2) λωρίδες και Λωρίδα Έκτακτης Ανάγκης (ΛΕΑ) ανά κατεύθυνση, πλάτους οδοστρώματος 20 m. Για την εγκατάσταση δεν προβλέπεται η χρήση μανδύα.

5.1.1 Συνοπτική Τεχνική Περιγραφή και Μεθοδολογία Εγκατάστασης

Λαμβάνοντας υπόψιν το πλάτος του οδοστρώματος (20 m) και τη μέγιστη ακτίνα κάμψης του χαλύβδινου 36"-άρι αγωγού, η υπόγεια τροχιά διαμορφώνεται στα 140 m συνολικό μήκος με κάλυψη περίπου 6 με 8 μέτρα κάτω από το οδόστρωμα.

Οι φάσεις εγκατάστασης του αγωγού είναι οι εξής:

- Φάση 1 (Πιλοτική οπή): Διάνοιξη οδηγού οπής 9"–12" με ψηφιακή καθοδήγηση.
- Φάση 2: Σταδιακή διεύρυνση της οπής σε 4 στάδια (18" → 28" → 38" → 48") μέχρι την τελική διάμετρο των 48 ιντσών. Κατά τη διάρκεια της διάτρησης χρησιμοποιείται συνεχώς λάσπη μπετονίτη.
- Φάση 3 (Pipe string & Pullback):
 - Συγκόλληση αγωγού στην επιφάνεια σε ένα ενιαίο κομμάτι 140 μέτρων.
 - 100% ραδιογραφικός έλεγχος (X-Ray & Holiday Test), υδραυλική δοκιμή και τράβηγμα (pullback) εντός της οπής.

5.1.2 Απαιτήσεις Ελεύθερου Χώρου

Βάση εμπειρίας, για τη μελέτη περίπτωσης απαιτούνται οι εξής ελεύθεροι χώροι για να χρησιμοποιηθούν ως χώροι εργασίας:

- Πλευρά μηχανήματος (Rig side): Επίπεδη ζώνη εργασίας 35 m μήκος × 20 m πλάτος για το Maxi-Rig, τις αντλίες και το σύστημα ανακύκλωσης λάσπης (mud recycling).
- Πλευρά αγωγού (Pipe side): Μια ευθεία λωρίδα 140 m μήκος × 12 m πλάτος για τη συναρμολόγηση του αγωγού πάνω σε ειδικά ράουλα (rollers).

5.1.3 Προϋπολογισμός Μεθόδου HDD

Βάσει των παραπάνω στοιχείων ο προϋπολογισμός κόστους της μεθόδου HDD για τη μελέτη περίπτωσης εκτιμάται ως κάτωθι (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1: Προϋπολογισμός HDD

Εργασία	Κόστος* €
Κινητοποίηση εργολάβου και μεταφορά εξοπλισμού	50.000
Υλικά αγωγού 36" (API 5L X65 Grade B W.T. 9,53 mm με μόνωση 3LPE) Μήκος: 140 m	110.000
Αναλώσιμα (ηλεκτρόδια, θερμοσυστελλόμενα μανίκια συνδέσεων)	10.000
Υλικά γεώτρησης/Μπετονίτης HDD	20.000
Υδροδότηση εργοταξίου και νόμιμη διάθεση αποβλήτων λάσπης	10.000
Χωματουργικά, διάνοιξη λάκκων συλλογής (pits) και διάστρωση με χαλίκι 3Α	25.000
Εργασία διάτρησης, διεύρυνσης και έλξης (μηχάνημα και προσωπικό)	116.000
Συγκόλληση αγωγού στην επιφάνεια	25.000
Ποιοτικός έλεγχος συγκολλήσεων και μόνωσης (100% X-Ray, UT, Holiday Testing)	8.000
Υδραυλική δοκιμή αγωγού	8.000
Απρόβλεπτα (~10%)	38.000
ΣΥΝΟΛΟ ΚΟΣΤΟΥΣ HDD:	420.000 €

* Στις τιμές δεν περιλαμβάνεται ο Φ.Π.Α.

Σημειώνεται ότι:

- Η παραπάνω εκτίμηση κόστους αφορά μόνο το κόστος κατασκευής και δεν συμπεριλαμβάνει το κόστος της απαιτούμενης γεωτεχνικής έρευνας, των μελετών, της αδειοδότησης και της χρήσης γης.

- Στο κόστος κατασκευής δεν έχουν ληφθεί υπόψιν γενικά εργολαβικά/εργοταξιακά έξοδα, καθώς η διασταύρωση του αγωγού με την Εθνική Οδό αποτελεί υποέργο ενός μεγαλύτερου έργου εγκατάστασης αγωγού.
- Η εκτίμηση κόστους έχει γίνει με βάση τιμές από αντίστοιχα έργα.

5.2 Μέθοδος Ανοιχτής Εκσκαφής (Open Cut)

Για την οικονομική σύγκριση της μεθόδου HDD με άλλη μέθοδο εγκατάστασης/διασταύρωσης αγωγού με την Εθνική Οδό της μελέτης περίπτωσης, επιλέχθηκε η μέθοδος της ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης καθώς αποτελεί την πιο απλή, οικονομική και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Για να καταστεί δυνατή η απευθείας σύγκριση κόστους, παρότι το πλάτος οδοστρώματος είναι 20 m, έγινε κοστολόγηση για το ίδιο μήκος αγωγού, δηλαδή 140 m. Επίσης θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση μανδύα προστασίας κάτω από την Εθνική Οδό.

5.2.1 Συνοπτική Τεχνική Περιγραφή και Μεθοδολογία Εγκατάστασης

Η μέθοδος open cut απαιτεί την πλήρη κοπή του οδοστρώματος της Εθνικής Οδού σε πλάτος 20 μέτρων και κατά συνέπεια τη διακοπή της οδικής κυκλοφορίας. Λόγω της πλήρους διακοπής της κυκλοφορίας, είναι υποχρεωτική η κατασκευή παρακαμπτήριων οδών (bypass) ή η εκτέλεση του έργου σε δύο φάσεις (10 μέτρων ανά ρεύμα), γεγονός που προκαλεί τεράστια κυκλοφοριακή συμφόρηση και απαιτεί εγκρίσεις από τους αρμόδιους φορείς όπως η Τροχαία και η τοπική Περιφέρεια.

Κατασκευαστικά, η εγκατάσταση του αγωγού χωρίζεται στις εξής φάσεις:

- Εκσκαφή & Αντιστήριξη: Διάνοιξη τάφρου πλάτους ~2 m και βάθους 4-5 m. Απαιτείται βαριά μεταλλική αντιστήριξη (trench boxes) για την προστασία του δρόμου εκατέρωθεν.
- Τοποθέτηση μανδύα (casing): Εγκατάσταση χαλύβδινου μανδύα προστασίας 48".
- Τοποθέτηση αγωγού: Ο αγωγός 36" τοποθετείται εντός του μανδύα πατώντας σε μονωτικούς δακτυλίους (spacers).
- Αποκατάσταση: Επίχωση με ειδικά συμπτυκνωμένα υλικά (3A) και πλήρης ανακατασκευή του ασφαλτικού τάπητα της Εθνικής Οδού.

5.2.2 Προϋπολογισμός Μεθόδου Ανοιχτής Εκσκαφής

Όπως αναφέρθηκε ήδη, για να είναι οικονομικά συγκρίσιμες οι δύο μέθοδοι έχει συμπεριληφθεί στην κοστολόγηση διασταύρωσης του αγωγού με την Εθνική Οδό (20 m) επιπλέον μήκος 120 m εκτός Εθνικής Οδού.

Επίσης θεωρήθηκε ότι η εκτέλεση του έργου γίνεται σε δύο φάσεις κλείνοντας πλήρως σε κάθε φάση την κυκλοφορία των οχημάτων στο μισό οδόστρωμα και εκτρέποντάς τη στο δεύτερο μισό. Για την ταυτόχρονη χρήση της μισής διατομής του οδοστρώματος για τις δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας απαιτείται μια σειρά ενεργειών όπως ειδική κυκλοφοριακή μελέτη, προσωρινή σήμανση, μείωση ορίου ταχύτητας, τοπικές παρεμβάσεις στα κιγκλιδώματα και στα στηθαία ασφαλείας καθώς και ενδεχόμενη τοπική διαπλάτυνση του οδοστρώματος για την καλύτερη κυκλοφορία των οχημάτων.

Συνεπώς, βάσει των παραπάνω, ο προϋπολογισμός κόστους της μεθόδου ανοιχτής εκσκαφής για τη μελέτη περίπτωσης εκτιμάται ως κάτωθι (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Προϋπολογισμός Open Cut

Εργασία	Κόστος* €
Κινητοποίηση εργολάβου	17.000
Υλικά: - Αγωγού 36" (API 5L X65 Grade B W.T. 9,53 mm με μόνωση 3LPE) Μήκος: 140 m - Χαλύβδινου μανδύα (casing) 48" και δακτυλίων κεντραρίσματος (spacers) Μήκος: 22 m	128.000
Αναλώσιμα (ηλεκτρόδια, θερμοσυστελλόμενα μανίκια συνδέσεων)	15.000
Κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, σήμανση, εργασίες τοπικής διαπλάτυνσης διατομής οδοστρώματος, τοπική κοπή και απομάκρυνση προστατευτικού κιγκλιδώματος/στηθαίου ασφαλείας	47.000
Εκσκαφή, μεταλλική αντιστήριξη τάφρου και διαχείριση μπαζών	33.000
Ειδική επίχωση τάφρου και πλήρης αποκατάσταση ασφάλτου (υλικά και εργασία)	49.000
Καταβίβαση αγωγού στην τάφρο και τοποθέτηση αγωγού εντός του μανδύα	7.000
Συγκόλληση αγωγού και μανδύα (casing pipe)	28.000

Εργασία	Κόστος* €
Ποιοτικός έλεγχος συγκολλήσεων και μόνωσης (100% X-Ray, UT, Holiday Testing)	14.000
Υδραυλική δοκιμή αγωγού	12.000
Απρόβλεπτα (~10%)	35.000
ΣΥΝΟΛΟ ΚΟΣΤΟΥΣ OPEN CUT:	385.000 €

* Στις τιμές δεν περιλαμβάνεται ο Φ.Π.Α.

Σημειώνεται ότι:

- Η παραπάνω εκτίμηση κόστους αφορά μόνο το κόστος κατασκευής και δεν συμπεριλαμβάνει το κόστος της απαιτούμενης γεωτεχνικής έρευνας, των μελετών, της αδειοδότησης και της χρήσης γης.
- Στο κόστος κατασκευής δεν έχουν ληφθεί υπόψιν γενικά εργολαβικά/εργοταξιακά έξοδα, καθώς η διασταύρωση του αγωγού με την Εθνική Οδό αποτελεί υποέργο ενός μεγαλύτερου έργου εγκατάστασης αγωγού.
- Δεν αποτυπώνεται το κόστος των καθυστερήσεων που μπορεί να έχει το κλείσιμο της κυκλοφορίας του μισού οδοστρώματος για τους χρήστες της Εθνικής Οδού και ιδιαίτερα για τους επαγγελματίες των μεταφορών.
- Η εκτίμηση κόστους έχει γίνει με βάση τιμές από αντίστοιχα έργα.

5.3 Σύγκριση Κόστους

5.3.1 Κόστος Κατασκευής

Εξετάζοντας το κατασκευαστικό κόστος της μεθόδου HDD έναντι του αντίστοιχου κόστους της μεθόδου ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης για τη μελέτη περίπτωσης φαίνεται ότι η μέθοδος HDD είναι πιο ακριβή κατά 35.000 €, ποσό το οποίο αναλογεί σε μια διαφορά της τάξης περίπου του 9%. Θεωρώντας λοιπόν ότι ένας αγωγός πολλών χιλιομέτρων μπορεί να έχει έναν σημαντικό αριθμό παρόμοιων διασταυρώσεων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέθοδος HDD δεν επιλέγεται έναντι της μεθόδου ανοιχτής εκσκαφής αν το μόνο κριτήριο επιλογής είναι το άμεσο κατασκευαστικό κόστος. Ωστόσο από τη σκοπιά του φορέα εκμετάλλευσης της Εθνικής Οδού καθώς και του ευρύτερου κοινωνικού συνόλου, το παραπάνω κόστος θεωρείται μικρό από τη στιγμή που εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη κυκλοφορία των ιδιωτικών οχημάτων και των μεταφορών. Επομένως η αδειοδότηση τοποθέτησης ενός αγωγού σε διασταύρωση με

Εθνική Οδό δύναται να επιτευχθεί ευκολότερα και γρηγορότερα αν προταθεί η μέθοδος HDD έναντι της ανοιχτής εκσκαφής. Σημειώνεται επίσης το πλεονέκτημα του μικρότερου χρόνου κατασκευής της HDD, καθώς αυτός εκτιμάται για τη μελέτη περίπτωσης σε περίπου 20 ημέρες.

Εξάλλου για διασταυρώσεις με ποτάμια και προστατευόμενους υδροβιότοπους, οι φορείς αδειοδότησης δεν θα εξέταζαν τη διαφορά κόστους ανάμεσα στις δύο μεθόδους, αλλά το γεγονός ότι η HDD δεν απαιτεί την εκτροπή ενός υδάτινου ρεύματος και δεν διαταράσσει το φυσικό περιβάλλον. Αντιθέτως οποιαδήποτε πρόταση διασταύρωσης αγωγού με ποταμό ή προστατευόμενο υδροβιότοπο με τη μέθοδο της ανοιχτής εκσκαφής θα αδυνατούσε να επιτύχει αδειοδότηση από τους αρμόδιους φορείς.

5.3.2 Κόστος Σφάλματος

Από την ανάλυση δένδρου σφάλματος προέκυψε ότι η πιθανότητα να εγκαταλειφθεί μια συγκεκριμένη όδευση/τροχιά αγωγού κατά την κατασκευή και να εξεταστεί μια εναλλακτική όδευση ή μεθοδολογία κατασκευής είναι περίπου 14%. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η οικονομική επίπτωση αυτού του γεγονότος εξαρτάται άμεσα από το εάν το πρόβλημα εντοπιστεί κατά τη διάτρηση ή κατά την έλξη/τράβηγμα του αγωγού. Στην πρώτη περίπτωση τα υλικά του αγωγού εξακολουθούν να είναι διαθέσιμα για χρήση, ενώ στη δεύτερη ο αγωγός έχει ήδη συγκολληθεί σε ένα ενιαίο κομμάτι που θα εγκαταλειφθεί. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μόνο το κόστος των σωλήνων, των υλικών συγκολλήσεων, των εργασιών συγκόλλησης, των ποιοτικών ελέγχων και της υδραυλικής δοκιμής ανέρχεται για τη μελέτη περίπτωσης σε 161.000 €, χωρίς να ληφθούν υπόψιν τα εργατικά της εκτελεσθείσας διάτρησης και το κόστος της νέας κατασκευής.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η περίπτωση εγκατάλειψης ενός συγκολλημένου αγωγού εντός της διάτρησης είναι μια θεωρητικά δυσμενής περίπτωση που όμως πρακτικά έμπειροι εργολάβοι θα προλαμβάνανε στην πλειοψηφία τους μέσω κατάλληλων χειρισμών και χρήσης ισχυρότερου μηχανήματος για την έλξη του αγωγού.

Εντούτοις, καθώς το κόστος αντιμετώπισης αρκετών αστοχιών της HDD ενδέχεται να υπερβαίνει το 10% που συνήθως εκτιμάται για τα απρόβλεπτα ενός έργου, προτείνεται η εκ των προτέρων εξασφάλιση πρόσθετων κονδυλίων από πλευράς του Κυρίου του Έργου για τη διαχείριση των κινδύνων της HDD, εφόσον παραστεί ανάγκη.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συνοπτική Περιγραφή Προβλήματος και Ανάλυσης

Η μέθοδος της Οριζόντιας Κατευθυνόμενης Διάτρησης [Horizontal Directional Drilling (HDD)] είναι μια κατασκευαστική μέθοδος διασταύρωσης αγωγών/καλωδίων με τεχνικά έργα και υδάτινα ρεύματα, με ιδιαίτερα περιβαλλοντικά και αδειοδοτικά πλεονεκτήματα. Αν και η μέθοδος χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για πάνω από δύο δεκαετίες φαίνεται να υπάρχει περιορισμένη ελληνική βιβλιογραφία ως προς τους συνηθείς κινδύνους εφαρμογής της μεθόδου και τους τρόπους πρόληψης και αντιμετώπισής τους.

Για την ποιοτική και ποσοτική διερεύνηση των πιθανών κινδύνων χρήσης της κατασκευαστικής μεθόδου της οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης (HDD) σε έργα υποδομής, έγινε αρχικά σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Στο πλαίσιο της ανασκόπησης και για την καλύτερη κατανόηση του θέματος, παρουσιάστηκαν οι συνηθέστερες μέθοδοι διασταυρώσεων αγωγών με τεχνικά έργα, όπως αυτή της ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης, πριν γίνει αναλυτικότερη περιγραφή της μεθόδου HDD. Έπειτα καταγράφηκαν οι συνηθέστεροι κίνδυνοι της HDD, ποιοτικά και ποσοτικά και διαμορφώθηκαν τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

- 1) Ποιοι θεωρείται ότι είναι οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι κίνδυνοι της μεθόδου HDD στον ελλαδικό χώρο;
- 2) Πόσο σημαντικές φαίνεται να είναι οι επιπτώσεις τους από την οπτική γωνία του μελετητή, του επιβλέποντα ή του Διαχειριστή/Κυρίου του Έργου (Project Manager or Project Owner);
- 3) Ποια θα ήταν τα προτεινόμενα μέτρα διαχείρισής τους και πώς θα ήταν ένα τυπικό μητρώο διαχείρισης κινδύνου HDD;

Για να διερευνηθεί ποιοτικά και ποσοτικά η εμφάνιση των καταγεγραμμένων κινδύνων HDD στον ελλαδικό χώρο, διεξήχθη έρευνα μέσω ερωτηματολογίων σε ειδικούς και εμπειρογνώμονες του αντικειμένου έτσι ώστε να αξιολογηθεί ποιοι φαίνεται να είναι οι επικρατέστεροι κίνδυνοι κατά τον σχεδιασμό και εφαρμογή της μεθόδου στην Ελλάδα και πόσο σοβαρές μπορεί να είναι οι επιπτώσεις τους στο έργο.

Στη συνέχεια διεξήχθη ανάλυση δένδρου σφάλματος για τη θεωρητικά δυσμενέστερη περίπτωση, κατά την οποία ενώ εκτελείται η HDD, διαπιστώνεται ότι δεν είναι πλέον δυνατό να συνεχίσει την τροχιά της ως έχει και απαιτείται η διακοπή της και η εξέταση εναλλακτικής τροχιάς ή η χρήση εναλλακτικής μεθόδου εγκατάστασης του αγωγού. Βάσει των αποτελεσμάτων της έρευνας υπολογίστηκε η πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου αυτού γεγονότος.

Έχοντας διερευνήσει και αξιολογήσει τους κινδύνους της HDD εκπονήθηκε ένα μητρώο διαχείρισης κινδύνων HDD με προτεινόμενα μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης έχοντας ως στόχο να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό σχέδιο βάσης διαχείρισης κινδύνων HDD για κάθε επαγγελματία και εταιρεία που δραστηριοποιείται στο αντικείμενο.

Ακολούθησε σύγκριση της διακινδύνευσης για τις δυσμενέστερες περιπτώσεις πριν και μετά τη λήψη των προτεινόμενων μέτρων για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους.

Τέλος, για την πληρέστερη παρουσίαση του θέματος, θεωρήθηκε η μελέτη περίπτωσης διασταύρωσης αγωγού 36" με Εθνική Οδό όπου έγινε σύγκριση κόστους της μεθόδου HDD με τη μέθοδο ανοιχτής εκσκαφής κι επανεπίχωσης.

6.2 Συμπεράσματα

Από την έρευνα προκύπτει ότι οι κίνδυνοι με τη μεγαλύτερη διακινδύνευση σε έργα HDD είναι με σειρά κατάταξης οι εξής:

- Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.).
- Υποεκτίμηση προϋπολογισμού.
- Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating).
- Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας).
- Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα.
- Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης.

Ανάλυση δένδρου σφάλματος έδειξε ότι η πιθανότητα να εγκαταλειφθεί μια συγκεκριμένη όδευση/τροχιά αγωγού κατά την κατασκευή και να εξεταστεί μια εναλλακτική όδευση ή μεθοδολογία κατασκευής είναι περίπου 14%. Η πιθανότητα αυτή αξιολογείται βάσει του Πίνακα 3.1 ως μικρή, όμως οι οικονομικές της επιπτώσεις όπως έδειξε η μελέτη περίπτωσης μπορεί να είναι της τάξης μερικών εκατοντάδων χιλιάδων ευρώ.

Καθώς η λήψη μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης των κινδύνων συμβάλλει ουσιαστικά στην επιτυχία ενός έργου, δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής ένα Μητρώο Διαχείρισης Κινδύνου HDD (Πίνακας 4.5). Το μητρώο αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα ικανοποιητικό σχέδιο βάσης διαχείρισης κινδύνων HDD για κάθε επαγγελματία και εταιρεία που δραστηριοποιείται στο χώρο.

Μερικά από τα σημαντικότερα μέτρα που προτείνονται είναι τα εξής:

- Προσεκτικός σχεδιασμός και εκτέλεση γεωτεχνικής έρευνας.
- Προσεκτικός σχεδιασμός της όδευσης/τροχιάς της HDD.
- Επιλογή έμπειρου εργολάβου HDD με κατάλληλο και καλά συντηρημένο εξοπλισμό, υιοθετώντας και ποιοτικά κριτήρια επιλογής πέραν της ελάχιστης οικονομικής προσφοράς.
- Προσεκτικός καθορισμός του ιξώδους του λασπώδους υγρού γεώτρησης μέσω ακριβούς καθορισμού του μείγματος νερού/μπετονίτη/πρόσθετων. Συνεχής παρακολούθηση καθ' όλη τη διαδικασία εκτέλεσης της HDD. Εκπόνηση σχεδίου αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση διαρροής μείγματος μπετονίτη, με ιδιαίτερη έμφαση στην προστασία υδάτινων συστημάτων, όπως ποτάμια, υδροβιότοποι, κ.λπ.
- Εκτίμηση και διασφάλιση επιπλέον κονδυλίου επί του προϋπολογισμού για τα απρόβλεπτα της HDD. Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης δένδρου σφάλματος και της οικονομικής αποτίμησης της μεθόδου συνιστάται το κονδύλι να είναι πάνω από το 10% του προϋπολογισμού που συνήθως εκτιμάται για τα απρόβλεπτα των έργων.
- Προσεκτικός υπολογισμός της αντοχής της εξωτερικής προστατευτικής επένδυσης του αγωγού.
- Συστηματική επίβλεψη των εργασιών από έμπειρο προσωπικό.

- Καθορισμός σχεδίου δράσης για την περίπτωση που προκύψει ανάγκη για επιπλέον αδειοδοτήσεις κατά την εκτέλεση του έργου.

Η συστηματική εφαρμογή των προτεινόμενων μέτρων φαίνεται να μειώνει σημαντικά την πιθανότητα εμφάνισης των περισσότερων από τους κινδύνους όχι όμως πάντα και τη σοβαρότητα των επιπτώσεών τους. Στην ουσία η σοβαρότητα των επιπτώσεων μειώνεται περισσότερο για τους κινδύνους που αφορούν οργανωτικές/διαχειριστικές αστοχίες και εξωτερικές συνθήκες και λιγότερο για τους κινδύνους που αφορούν το έδαφος και τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης ή μελετητικές αστοχίες. Ωστόσο, η διακινδύνευση της μεθόδου HDD μειώνεται σημαντικά και η εναπομένουσα διακινδύνευση αξιολογείται ως μικρή, δηλαδή αποδεκτή με χρήση συνήθων μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης.

6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση

Θα είχε εξαιρετικό ενδιαφέρον αν μπορούσε να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων με μελέτες περίπτωσης (case studies) των σπουδαιότερων έργων HDD που έχουν μελετηθεί, αδειοδοτηθεί και κατασκευαστεί στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη αναφορά στα προβλήματα που εμφανίστηκαν και τον τρόπο που αντιμετωπίστηκαν. Από αυτή τη βάση δεδομένων θα ήταν εφικτή και η δημιουργία μιας στατιστικής βάσης δεδομένων για τους κινδύνους και τις αστοχίες της HDD, τα αποτελέσματα της οποίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω βελτιστοποίηση του σχεδίου βάσης διαχείρισης των κινδύνων HDD της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Επιπρόσθετα, και ίσως πολύ πιο γρήγορα, θα είχε ενδιαφέρον να επιχειρηθεί η εκπόνηση ενός σχεδίου βάσης διαχείρισης των κινδύνων HDD με τη χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης [Artificial Intelligence (AI)] και η σύγκρισή του με το σχέδιο βάσης της παρούσης.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

7.1 Ξενόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Aboumasoudi, A. S. & Behvandi, O. (2019). Identification and ranking risks of horizontal directional drilling for oil & gas wells by using fuzzy analytic network process: A case study for Gachsaran oil field wells. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(2), 46-60. ISSN: 1735-8272
- Ahmed, A., Kayis, B. & Amornsawadwatana, S. (2007). A review of techniques for risk management in projects. *Benchmarking: An International Journal*, Vol 14 (No1), 22-36. DOI: 10.1108/14635770710730919
- Arumsari, P. & Tanuwijaya, E. (2009). Pipeline installation using horizontal directional drilling method (HDD) *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 794 (2021). DOI:10.1088/1755-1315/794/1/012009
- Baik, H.-S., Abraham, D. M. & Gokhale S. (2003). A decision support system for horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18 (2003), 99-109. DOI: 10.1016/S0886-7798(03)00002-6
- Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP) (2004). *Guideline: Planning Horizontal Directional Drilling for Pipeline Construction*. CAPP Publication 2004-0022.
- DESFA (2012). Standard Drawing No. STD-00-41-15: Typical R.O.W. Configuration and Typical Trenches for Φ36", Φ30", Φ24", Φ14", Φ10" dia N.G. Pipeline in Open Country and Road Crossings, Rev.0, January 2012.
- DESFA (2012). Standard Drawing No. STD-1-41-18: Typical Pipeline Construction Details Ravine Crossing – Bed Erosion Protection with Rip-Rap – Alternative "1", Rev.0, January 2012.
- DESFA (2012). Standard Drawing No. STD-1-41-20: Typical Pipeline Construction Details Ravine Crossing – Bed Erosion Protection with Rip-Rap – Alternative "2", Rev.0, January 2012.
- DESFA (2021). Technical Specification No. DSF-SPC-CIV-002: High Pressure (HP) Transmission Systems – Site Requirements, 2nd issue, June 2021. Retrieved

January 17, 2026 from: <https://www.desfa.gr/wp-content/uploads/2025/03/DSF-SPC-CIV-002-SITE-REQUIREMENTS.pdf>

DESFA (2021). Technical Specification No. DSF-SPC-CIV-003: High Pressure (HP) Transmission Systems – Trenching and Excavation, 2nd issue, June 2021. Retrieved January 17, 2026 from: <https://www.desfa.gr/wp-content/uploads/2025/03/DSF-SPC-CIV-003-TRENCHING-AND-EXCAVATION.pdf>

DESFA (2021). Technical Specification No. DSF-SPC-CIV-018: High Pressure (HP) Transmission Systems – Construction Specification for Installation of Pipeline by Horizontal Directional Drilling, 2nd issue, June 2021. Retrieved January 17, 2026 from: <https://www.desfa.gr/wp-content/uploads/2025/03/DSF-SPC-CIV-018-CONSTRUCTION-SPECIFICATION-FOR-INSTALLATION-OF-PIPELINE-BY-HORIZONTAL-DIRECTIONAL-DRILLING.pdf>

DESFA (2021). Technical Specification No. DSF-SPC-PIP-016: High Pressure (HP) Transmission Systems – Crossings, 2nd issue, June 2021. Retrieved January 17, 2026 from: <https://www.desfa.gr/wp-content/uploads/2025/03/DSF-SPC-PIP-016-CROSSINGS.pdf>

DESFA (2021). Technical Specification No. DSF-SPC-PIP-019: High Pressure (HP) Transmission Systems – River and Ravine Crossings, 2nd issue, June 2021. Retrieved January 17, 2026 from: <https://www.desfa.gr/wp-content/uploads/2025/03/DSF-SPC-PIP-019-RIVER-AND-RAVINE-CROSSINGS.pdf>

Ehiagwina, F. O., Kehinde, O. O., Nafiu, A. S., Afolabi, L. O. & Olatinwo, I. (2022). Fault Tree Analysis and its Modifications as Tools for Reliability and Risk Analysis of Engineering Systems—An Overview. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 3(1), 383-396. ISSN 2582-7421

Empire Generating Co, LLC (2008). PSC Case 04-T-0112 - 16” Gas Pipeline Interconnect Project: Environmental Management Plan – Appendix H: Horizontal Directional Drill Contingency Plan. Issued for Construction, Rev.0.

Gierczak, M. (2014). The qualitative risk assessment of MINI, MIDI and MAXI Horizontal Directional Drilling Projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44 (2014), 148-156. DOI: 10.1016/j.tust.2014.07.010

- Gierczak, M. (2014). The quantitative risk assessment of MINI, MIDI and MAXI Horizontal Directional Drilling Projects applying Fuzzy Fault Tree Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43 (2014), 67-77. DOI: 10.1016/j.tust.2014.04.003
- Graham, N. (2009). *PRINCE2TM for Dummies[®]*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd Publications, Chichester. ISBN: 978-0-470-71025-8
- Hair, J. D. (1995). Design and Project Management Considerations involved with Horizontal Directional Drilling. Presented at the: *International Workshop on Damage to Underwater Pipelines, Reliability Designs for New and Existing Pipelines. New Orleans, Louisiana, February 23, 1995.*
- Highways England (2019). Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) – CD 622: Managing Geotechnical Risk. Revision 0.
- International Project Management Association (IPMA[®]) (2015). *Individual Competence Baseline for Project, Programme & Portfolio Management*. Version 4.0. IPMA[®]. ISBN (pdf): 978-94-92338-01-3
- International Organization for Standardization (ISO) (2018). *International Standard ISO 31000:2018 Risk Management – Guidelines*. Second Edition 2018-02. ISO Geneva, Switzerland.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2019). *ISO International Standard IEC 31010:2019 Risk Management – Risk Assessment Techniques*. Edition 2.0 2019-06. ICE Geneva, Switzerland. ICS 03.100.01 ISBN 978-2-8322-6989-3
- Jaganathan, A.P., Shah, J.N., Allouche, E.N., Kieba, M. & Ziolkowski, C.J. (2011). Modelling of an obstacle detection sensor for horizontal directional drilling (HDD) operations. *Automation in Construction*, 20 (2011), 1079-1086. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.04.009
- Krechowicz, M. (2020). Comprehensive risk management in horizontal directional drilling projects. *Journal of construction engineering and management*, 146(5), 04020034. DOI: 10.1061/(ASCE) CO.1943-7862.0001809
- Krechowicz, M. (2021). The hybrid Fuzzy Fault and Event Tree analysis in the geotechnical risk management in HDD projects. *Georisk: Assessment and*

- Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 15(1), 12-26. DOI: 10.1080/17499518.2020.1723646
- Krechowicz, M. & Krechowicz, A. (2021). Risk assessment in energy infrastructure installations by horizontal directional drilling using machine learning. *Energies*, 14, 289. DOI: 10.3390/en14020289
- Krechowicz, M., Gierulski, W., Loneragan, S. & Kruse, H. (2021). Human and Equipment Risk Factors Evaluation in Horizontal Directional Drilling Technology Using Failure Mode and Effect Analysis. *Management and Production Engineering Review*, 12(2), 45-56. DOI: 10.24425/mper.2021.137677
- Krechowicz, M., Gierulski, W., Loneragan, S. & Kruse, H. (2022). External Risk Factors Evaluation in Horizontal Directional Drilling Technology Using Failure Mode and Effect Analysis. *Management and Production Engineering Review*, 13(1), 76-88. DOI: 10.24425/mper.2022.140878
- Kruse, H. (2009). The trenchless technique for horizontal-directional drilling: soil related risks and risk mitigation. *4th Pipeline Technology Conference, Hannover, 22-23 April 2009*.
- Kwast-Kotlarek, U., Heldak, M. & Szczepański, J. (2018). Introducing bentonite into the environment in the construction stage of linear underground investment using the HDD method. *Applied Sciences*, 8, 2210. DOI: 10.3390/app8112210
- Latorre, C. A., Wakeley, L. D. & Conroy, P. J. (2002). *ERDC/GSL TR-02-9: Guidelines for Installation of Utilities beneath Corps of Engineers Levees Using Horizontal Directional Drilling*. US Army Corps of Engineers® Engineer Research and Development Center, Washington DC.
- Mahmood, Y. A., Ahmadi, A., Verma, A. K., Srividya, A. & Kumar, U. (2013). Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. 4(1), 19–32. DOI: 10.1007/s13198-013-0145-x
- Occupational Safety & Health Administration (OSHA) (2018). *Avoiding Underground Utilities during Horizontal Directional Drilling Operations*. Safety and Health

- Information Bulletin SHIB 03-13-2018. Department of Labor, United States of America.
- Park, I., Kang, C. & Bayat, A. (2023). Determination of geotechnical parameters for underground trenchless construction design. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82:9. DOI: 10.1007/s10064-022-03008-z
- Park, I., Kang, C. & Bayat, A. (2024). Challenges with using empirically determined geotechnical parameters for borehole stability evaluation in horizontal directional drilling. *Engineering Geology*, 336 (2024). DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107565
- Peters, B., Lowe, J. S. & Katz, S. (2014). Can You See It Coming? Examining and Mitigating the Common Causes of HDD Failures. *North American Society for Trenchless Technology (NASTT) 2014 No-Dig Show, Orlando, Florida April 13-17, 2014*. Paper TM1-T2-04.
- Project Management Institute (PMITM) (2025). *PMBOK[®] Guide: A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, Eighth Edition. PMI, Inc. Pennsylvania. ANSI/PMI 99-001-2025. ISBN 978-1-62825-830-1 epub
- Rausand, M. & Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Scheuble, L. (2004). Trenchless Technologies in Pipeline Construction. *3R International Journal for Piping, Engineering, Practice*, Special Edition 13/2004. Vulkan-Verlag. ISSN 0340-3386- K 1252 E
- Smith III, A. J. (2023). An introduction to horizontal directional drill installation of high-voltage transmission lines and other duct banks: improving on conventional overhead transmission lines. *IEEE Industry Applications Magazine*, 29(3), 23-35. DOI: 10.1109/MIAS.2022.3214014
- Sun, P., He, Y., Zhou, S., Erneste, H., Gao, Q., Zou, Z. & Zhu, J. (2024). Experimental study on environmental chemical effect and purification treatment of waste slurry in horizontal directional drilling. *Tunelling and Underground Space Technology*, 145 (2024). DOI: 10.1016/j.tust.2023.105548
- The City of Overland Park, Kansas (2002). *Right-of-Way Permits: Horizontal Directional Drilling Guidelines Handbook*.

- Wan, J., Jiang, S., Xia, Y., Li, J. & Li, G. (2021). Numerical model and program development of horizontal directional drilling for non-excavation technology. *Environmental Earth Sciences* (2021) 80:579. DOI: 10.1007/s12665-021-09842-w
- Wiśniowski, R., Skrzypaszek, K., Łopata, P. & Orłowicz, G. (2020). The Catenary Method as an Alternative to the Horizontal Directional Drilling Trajectory Design in 2D Space. *Energies*, 13, 1112. DOI:10.3390/en13051112
- Zhu, X., Liu, Y. & Tong, H. (2014). Analysis of reamer failure based on vibration analysis of the rock breaking in horizontal directional drilling. *Engineering Failure Analysis*, 37 (2014), 64-74. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.11.016

7.2 Ελληνόγλωσσες Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Σπανίδης Φ.-Μ. & Πρωτοπαππά Ε. (2003). Η Οριζόντια Κατευθυνόμενη Διάτρηση και η Εφαρμογή της στον Υδροβιότοπο του Νέστου. *HELECO '03 – 4th International Exhibition and Conference on Environmental Technology, Athens, 2003*.

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ (HDD) ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Στοιχεία για Στατιστικούς Λόγους (τα οποία θα παραμείνουν ανώνυμα):

Ειδικότητα:	
Τμήμα Εργασίας (π.χ. Civil Engineering, Environmental Studies, Project Engineering κ.λπ.):	
Έτη Επαγγελματικής Εμπειρίας:	
Εμπειρία στο Αντικείμενο HDD:	
Χρόνια:	
Σκοπιά/οπτική (π.χ. μελετητής, επιβλέπων, project manager, περιβαλλοντολόγος, ειδικός αδειοδοτήσεων κ.λπ.)	

Επεξήγηση Κλιμάκων:

Κλίμακα Πιθανότητας Εμφάνισης	Κλίμακα Σοβαρότητας Επιπτώσεων
1: Πολύ Μικρή	1: Πολύ Μικρή
2: Μικρή	2: Μικρή
3: Μέτρια	3: Μέτρια
4: Μεγάλη	4: Μεγάλη
5: Πολύ Μεγάλη	5: Πολύ Μεγάλη

Ερωτήσεις:

α/α	Με βάση την εμπειρία σας βαθμολογήστε πόσο συχνά θεωρείτε ότι εμφανίζονται τα παρακάτω προβλήματα/αστοχίες κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της μεθόδου HDD και πόσο σοβαρές είναι οι επιπτώσεις τους	Πιθανότητα Εμφάνισης (Κλίμακα 1 έως 5)	Σοβαρότητα Επιπτώσεων σε Περίπτωση Εμφάνισης (Κλίμακα 1 έως 5)	Σχόλια/ Παρατηρήσεις (εφόσον υπάρχουν)
A	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τις συνθήκες εδάφους κατά το στάδιο της διάτρησης			
1	Απροσδόκητη εμφάνιση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων στο υπέδαφος (εκτός των δικτύων κοινής ωφέλειας)			

2	Απροσδόκητη εμφάνιση υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας			
3	Εδαφικές συνθήκες που δεν αποκαλύφθηκαν από τη γεωτεχνική έρευνα			
4	Διαρροή μπετονίτη στο υπέδαφος (π.χ. λόγω εκτεταμένων ασυνεχειών/καρστικών φαινομένων σε βραχώδεις σχηματισμούς, παρουσίας υψηλού υδροφόρου ορίζοντα κ.λπ.)			
5	Τοπική κατάρρευση οπής διάτρησης			
B	Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τον εξοπλισμό κατά το στάδιο της διάτρησης			
6	Τεχνική βλάβη μηχανήματος HDD			
7	Ανατροπή μηχανήματος HDD			
8	Αστοχία υλικού σωλήνων αγωγού			
9	Αστοχία/βλάβη της εξωτερικής επένδυσης του αγωγού (coating)			
10	Βλάβη διατρητικής κεφαλής/εργαλείου διεύρυνσης οπών (HDD reamer)			
11	Βλάβη στελεχών διάτρησης			
12	Βλάβη του συστήματος επανακυκλοφορίας του μπετονίτη			
13	Αστοχία/βλάβη του συστήματος παρακολούθησης της θέσης της διατρητικής κεφαλής και καθοδήγησής της			
14	Βλάβη λοιπού εξοπλισμού (π.χ. rollers, balancing system, συρματόσχοινα κ.λπ.)			
Γ	Μελετητικές αστοχίες			
15	Ελλιπής γεωτεχνική έρευνα			
16	Υποεκτίμηση του ελάχιστου απαιτούμενου βάθους της όδευσης της διάτρησης			
17	Λανθασμένος σχεδιασμός της κατακόρυφης καμπυλότητας της όδευσης σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη των σωλήνων ή των στελεχών διάτρησης			
18	Λανθασμένος υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης έλκυσης/τραβήγματος του σωλήνα για την εγκατάστασή του			

19	Υποεκτίμηση της απαιτούμενης αντοχής του υλικού των σωλήνων			
20	Υποεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων της προστατευτικής επένδυσης του αγωγού (coating)			
Δ	Οργανωτικές /διαχειριστικές αστοχίες			
21	Ανεπάρκεια τεχνογνωσίας εργολάβου (έλλειψη εμπειρίας/ ανθρώπινο λάθος λόγω ελλιπούς εξειδίκευσης)			
22	Ανεπαρκής επίβλεψη εργασιών			
23	Ελαττωματικά υλικά/ προβλήματα στο σύστημα ποιότητας			
24	Προβλήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα σωλήνων, εξοπλισμού και ανταλλακτικών			
25	Προβλήματα με τις απαιτούμενες εγκρίσεις και αδειοδοτήσεις/ Νομικά ζητήματα			
26	Υποεκτίμηση προϋπολογισμού			
27	Υπογραφή σύμβασης με ασαφείς ή δυσμενείς όρους			
Ε	Εξωτερικές συνθήκες			
28	Αντίξοες καιρικές συνθήκες (ακραία βροχόπτωση, χιονόπτωση, άνεμοι, κεραυνοί, καύσωνας κ.λπ.)			
29	Πλημμυρικά φαινόμενα			

«Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/ δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.»