



Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας (ΣΘΕΤ)

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση και Διαχείριση Κινδύνων κατά τη Φάση Κατασκευής
Ηλεκτροπαραγωγικών Σταθμών με Καύσιμο το Φυσικό Αέριο

Νικόλαος Καραβασιλικός

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Αξιολόγηση και Διαχείριση Κινδύνων κατά τη Φάση Κατασκευής Ηλεκτροπαραγωγικών Σταθμών με Καύσιμο το Φυσικό Αέριο

Νικόλαος Καραβασιλικός

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή
Αναπλ. Καθηγήτρια Πανεπιστημίου
Πελοποννήσου
& ΣΕΠ ΕΑΠ ΔΧΤ/ΔΕ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
Μιχάλης Φραγκιαδάκης
Καθηγητής Εθνικού Μετσόβιου
Πολυτεχνείου
& ΣΕΠ ΕΑΠ ΔΧΤ/ΔΕ

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την αξιολόγηση και διαχείριση κινδύνων κατά τη φάση κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών με καύσιμο το φυσικό αέριο. Η κατασκευή τέτοιων ενεργειακών έργων χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό τεχνικής πολυπλοκότητας, αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας και σημαντικές οικονομικές επενδύσεις, γεγονός που καθιστά τη συστηματική διαχείριση κινδύνων απαραίτητη για την επιτυχή ολοκλήρωσή τους. Σκοπός της εργασίας είναι η αναγνώριση, ανάλυση και αξιολόγηση των βασικών κινδύνων που εμφανίζονται κατά την κατασκευαστική φάση, καθώς και η διαμόρφωση προτάσεων για τον αποτελεσματικό περιορισμό των επιπτώσεών τους.

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών επιστημονικών πηγών, προτύπων διαχείρισης κινδύνων και πρακτικών που εφαρμόζονται σε μεγάλα ενεργειακά έργα. Για την αναγνώριση και ανάλυση των κινδύνων αναπτύσσεται ένα υβριδικό πλαίσιο που συνδυάζει Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure), τεχνικές HAZID/HAZOP και expert elicitation, ποιοτική αξιολόγηση μέσω πίνακα εκτίμησης κινδύνων (Risk Matrix), ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων (Risk Register) και μηχανισμό ελέγχου σταδίων (stage-gate governance). Το πλαίσιο αυτό εφαρμόζεται ενδεικτικά σε μελέτη περίπτωσης κατασκευής σταθμού συνδυασμένου κύκλου.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η ενδεικτική εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου καταδεικνύουν ως ιδιαίτερα σημαντικούς τους κινδύνους που σχετίζονται με τεχνικές αστοχίες στη διεπαφή αεριοστροβίλου–HRSG–ατμοστροβίλου, ζητήματα ασφάλειας και υγείας, καθυστερήσεις αδειοδότησης και προμηθειών, προβλήματα συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και οικονομικές υπερβάσεις. Παράλληλα, προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα πρόληψης και διαχείρισης, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ασφάλειας, της αποτελεσματικότητας και του ελέγχου κόστους των έργων. Η εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για μηχανικούς, διαχειριστές έργων και στελέχη του ενεργειακού τομέα που εμπλέκονται στην κατασκευή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου.

Λέξεις – Κλειδιά

Διαχείριση Κινδύνων, Ηλεκτροπαραγωγικοί Σταθμοί Φυσικού Αερίου, Κατασκευαστικά Έργα Ενέργειας, Αξιολόγηση Επικινδυνότητας, Risk Register, Risk Breakdown Structure, Ενεργειακές Υποδομές.

Abstract

This diploma thesis examines the assessment and management of risks during the construction phase of natural gas-fired power plants. The construction of such energy projects is characterized by a high level of technical complexity, strict safety requirements, and significant financial investments, making systematic risk management essential for their successful completion. The aim of this study is to identify, analyze, and evaluate the main risks arising during the construction phase, as well as to propose measures for the effective mitigation of their impacts.

The research methodology is based on a literature review of international scientific sources, risk management standards, and practices applied in large-scale energy projects. For risk identification and analysis, a hybrid framework is developed, combining a Risk Breakdown Structure, HAZID/HAZOP techniques and expert elicitation, qualitative assessment through a Risk Matrix, the development of a dynamic Risk Register, and a stage-gate governance mechanism. This framework is illustratively applied to a case study of a combined-cycle power plant construction project.

The literature review and the illustrative application of the proposed framework identify as particularly significant the risks associated with technical failures at the gas turbine–HRSG–steam turbine interface, health and safety issues, permitting and supply-chain delays, coordination problems among stakeholders, and cost overruns. Furthermore, specific prevention and management measures are proposed, which can contribute to improving safety, operational efficiency, and cost control in such projects. This thesis aspires to serve as a useful tool for engineers, project managers, and energy sector professionals involved in the construction of natural gas-fired power generation facilities.

Keywords:

Risk Management, Natural Gas-Fired Power Plants, Energy Construction Projects, Risk Assessment, Risk Register, Risk Breakdown Structure, Energy Infrastructure.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	iv
Πίνακας Περιεχομένων	vi
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	x
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xi
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Εργασίας	2
1.2 Η Σημασία του Φυσικού Αερίου στο Ενεργειακό Μείγμα	2
1.3 Η Παρουσίαση του Προβλήματος: Προκλήσεις στην Κατασκευή Μονάδων	4
1.4 Δομή της Εργασίας	6
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	8
2.1 Τεχνολογίες Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής με Φυσικό Αέριο (Συνδυασμένος Κύκλος κ.λπ.)	8
2.2 Θεωρητικό Πλαίσιο Διαχείρισης Κινδύνων (Risk Management Standards – ISO 31000)	10
2.3 Ιδιαιτερότητες και Κίνδυνοι στα Ενεργειακά Κατασκευαστικά Έργα	12
2.4 Ανασκόπηση Διεθνούς Εμπειρίας και Αστοχιών σε Παρόμοια Έργα	14
2.5 Μέθοδοι Αναγνώρισης και Αξιολόγησης Κινδύνων στη Διεθνή Βιβλιογραφία	15
2.6 Τεχνικοί Κίνδυνοι στις Διεπαφές Αεριοστροβίλου–HRSG–Ατμοστροβίλου και στο Commissioning	17
2.7 Governance, Έλεγχος Σταδίων (Stage-Gate) και Ψηφιακή Παρακολούθηση	19
2.8 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης	21
3. Μεθοδολογία Διαχείρισης Κινδύνων	24
3.1 Ερευνητική Προσέγγιση και Σχεδιασμός Μεθοδολογίας	24
3.2 Ανάπτυξη Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure)	25

3.3 Αναγνώριση Κινδύνων: HAZID/HAZOP, Επισκόπηση Εγγράφων και Expert Elicitation	26
3.3.1 HAZID / HAZOP Workshops	27
3.3.2 Επισκόπηση Τεχνικών Εγγράφων (Document Review).....	27
3.3.3 Expert Elicitation και Brainstorming.....	27
3.4 Ποιοτική και Ημι-ποσοτική Αξιολόγηση: Risk Matrix και Fuzzy/MCDM Ιεράρχηση	28
3.5 Ανάπτυξη και Δομή Μητρώου Κινδύνων (Risk Register)	30
3.6 Στρατηγικές Αντιμετώπισης και Μετριασμού Κινδύνων	30
3.7 Governance, Έλεγχος Σταδίων (Stage-Gate) και Παρακολούθηση KPI.....	31
3.8 Περιορισμοί της Μεθοδολογίας.....	32
4. Μελέτη Περίπτωσης	34
4.1 Περιγραφή του Ενδεικτικού Έργου	34
4.2 Εφαρμογή της Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (RBS) στο Έργο.....	35
4.3 Αναγνώριση Κινδύνων μέσω HAZID/HAZOP και Expert Elicitation	35
4.4 Ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων και Αξιολόγηση με Risk Matrix	36
4.5 Κρίσιμοι Τεχνικοί Κίνδυνοι στις Διεπαφές GT–HRSG–ST	38
4.6 Αδειοδοτικοί και Προμηθευτικοί Κίνδυνοι	39
4.7 Προτεινόμενα Μέτρα Μετριασμού και Σχέδιο Δράσης.....	40
4.8 Συζήτηση Αποτελεσμάτων Μελέτης Περίπτωσης	41
4.9 Διδάγματα (Lessons Learned).....	42
5. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	43
5.1 Σύνοψη Ευρημάτων	43
5.2 Πρωτοτυπία και Συνεισφορά της Εργασίας.....	44
5.3 Πρακτικές Προτάσεις για τη Βιομηχανία	45
5.4 Περιορισμοί της Έρευνας	46
5.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	47
Βιβλιογραφία	49

Παράρτημα Α: Πλήρες Ενδεικτικό Μητρώο Κινδύνων (Risk Register) Μελέτης Περίπτωσης	54
Παράρτημα Β: Ενδεικτικός Κατάλογος Ελέγχου HAZID και Ερωτήσεων Expert Elicitation	55
B.1 Ενδεικτικός Κατάλογος Ελέγχου HAZID ανά Κατηγορία RBS	55
B.2 Ενδεικτικές Ερωτήσεις για Expert Elicitation	55

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 : Ρόλος του φυσικού αερίου στην ενεργειακή μετάβαση.....	4
Σχήμα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία ενός έργου ηλεκτροπαραγωγής.....	6
Σχήμα 3: Απλουστευμένη διάταξη σταθμού συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (CCGT).	10
Σχήμα 4: Κύκλος διαδικασίας διαχείρισης κινδύνων σύμφωνα με το ISO 31000:2018.....	12
Σχήμα 5: Ταξινόμηση κινδύνων κατασκευής σταθμού φυσικού αερίου.....	14
Σχήμα 6: Διεπαφή αεριοστροβίλου (GT) – HRSG – ατμοστροβίλου (ST) και ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης.....	19
Σχήμα 7: Υβριδικό μεθοδολογικό πλαίσιο αναγνώρισης, αξιολόγησης και παρακολούθησης κατασκευαστικού κινδύνου.	25
Σχήμα 8: Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS) για την κατασκευή σταθμών φυσικού αερίου...26	
Σχήμα 9: Πίνακας αξιολόγησης κινδύνου (Risk Matrix) 5×5 με βαθμολόγηση Πιθανότητα × Σοβαρότητα.....	29
Σχήμα 10: Μηχανισμός ελέγχου σταδίων (stage-gate) με επανεξέταση Μητρώου Κινδύνων σε κάθε πύλη.....	31
Σχήμα 11: Ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα φάσεων κατασκευής της μελέτης περίπτωσης CCGT.	35
Σχήμα 12: Κατανομή αναγνωρισμένων κινδύνων ανά κατηγορία RBS – μελέτη περίπτωσης.	36
Σχήμα 13: Κατανομή κρίσιμων κινδύνων στο Risk Matrix – μελέτη περίπτωσης.	38

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση βασικών καυσίμων ηλεκτροπαραγωγής (πηγή: προσαρμογή από IEA, 2023· IPCC, 2022).....	3
Πίνακας 2: Βασικές κατηγορίες κινδύνων (πηγή: ISO, 2018· PMI, 2021)	6
Πίνακας 3: Σύγκριση τεχνολογιών OCGT και CCGT (πηγή: προσαρμογή από IEA, 2023)..	10
Πίνακας 4: Κατηγορίες κινδύνων σε έργα ηλεκτροπαραγωγής (πηγή: προσαρμογή από PMI, 2021· ISO, 2018· Sovacool & Ryu, 2025)	13
Πίνακας 5: Διεθνείς μελέτες που ανασκοπήθηκαν	15
Πίνακας 6: Σύγκριση κύριων μεθοδολογιών αναγνώρισης και αξιολόγησης κατασκευαστικού κινδύνου	17
Πίνακας 7: Εργαλεία governance και συνδεόμενα οφέλη σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία	21
Πίνακας 8: Περιγραφή των πέντε κατηγοριών της Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (RBS)	26
Πίνακας 9: Ενδεικτική εφαρμογή λέξεων-οδηγών HAZOP σε φάση κατασκευής CCGT	27
Πίνακας 10: Κλίμακα πιθανότητας εμφάνισης κινδύνου	28
Πίνακας 11: Κλίμακα σοβαρότητας συνεπειών κινδύνου	28
Πίνακας 12: Δομή πεδίων του προτεινόμενου Μητρώου Κινδύνων (Risk Register)	30
Πίνακας 13: Προτεινόμενα μέτρα μετριασμού ανά κατηγορία κινδύνου (RBS)	31
Πίνακας 14: Ενδεικτικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) για την παρακολούθηση κατασκευαστικού κινδύνου	32
Πίνακας 15: Βασικά χαρακτηριστικά του ενδεικτικού έργου μελέτης περίπτωσης.....	34
Πίνακας 16: Συνοπτικό Μητρώο Κινδύνων – οι δέκα κίνδυνοι με την υψηλότερη βαθμολογία στη μελέτη περίπτωσης (P = Πιθανότητα, S = Σοβαρότητα)	37
Πίνακας 17: Ενδεικτικό σχέδιο δράσης για τους πέντε κρισιμότερους κινδύνους της μελέτης περίπτωσης.....	41
Πίνακας 18: Πλήρες ενδεικτικό Μητρώο Κινδύνων (Risk Register) της μελέτης περίπτωσης	54

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
AHP	Analytic Hierarchy Process
AR6	Sixth Assessment Report
BIM	Building Information Modeling
BoP	Balance of Plant
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine
CO₂	Carbon Dioxide
COD	Commercial Operation Date
EPC	Engineering, Procurement, Construction
EU	European Union
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability Study
HRSG	Heat Recovery Steam Generator
HSE	Health, Safety and Environment
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
I&C	Instrumentation & Control
KPI	Key Performance Indicator
LNG	Liquefied Natural Gas
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MWh	Megawatt-hour
Natech	Natural Hazard Triggering Technological Disaster
OCGT	Open Cycle Gas Turbine
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
PMI	Project Management Institute
PSM	Process Safety Management
RBS	Risk Breakdown Structure
SIL	Safety Integrity Level
ST	Steam Turbine
GT	Gas Turbine
TRIR	Total Recordable Incident Rate

1. Εισαγωγή

Ο τομέας της ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της οικονομικής ανάπτυξης και της βιομηχανικής δραστηριότητας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, σε συνδυασμό με την ανάγκη μετάβασης σε αποδοτικότερα και περιβαλλοντικά φιλικότερα ενεργειακά συστήματα, έχει οδηγήσει στην ενίσχυση των επενδύσεων σε σύγχρονες ενεργειακές υποδομές. Στο πλαίσιο αυτό, οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί με καύσιμο το φυσικό αέριο διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο σύγχρονο ενεργειακό μίγμα, καθώς προσφέρουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, ευελιξία λειτουργίας και μειωμένες εκπομπές ρύπων συγκριτικά με άλλες συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας.

Η κατασκευή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου αποτελεί μία σύνθετη και απαιτητική διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό τεχνικών, οργανωτικών και οικονομικών παραμέτρων. Τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό τεχνολογικής πολυπλοκότητας, αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας και σημαντικό επενδυτικό κόστος.

Παράλληλα, κατά τη φάση κατασκευής εμφανίζονται πολυάριθμοι κίνδυνοι που δύνανται να επηρεάσουν την πρόοδο, το κόστος, την ποιότητα και τη συνολική επιτυχία του έργου. Οι κίνδυνοι αυτοί σχετίζονται τόσο με τεχνικά ζητήματα και πιθανές αστοχίες εξοπλισμού, όσο και με οργανωτικά προβλήματα, καθυστερήσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα, ανθρώπινα σφάλματα, οικονομικές μεταβολές και θέματα υγείας, ασφάλειας και περιβαλλοντικής προστασίας.

Στο πλαίσιο αυτό εντάσσεται η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία εξετάζει τους κινδύνους που εμφανίζονται κατά την κατασκευαστική φάση τέτοιων μονάδων, μέσα από τη μελέτη διεθνούς βιβλιογραφίας, σύγχρονων προτύπων διαχείρισης κινδύνων και μιας ενδεικτικής εφαρμογής σε υποθετικό έργο. Πέραν της θεωρητικής της αξίας, η εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει πρακτικό εργαλείο για μηχανικούς, στελέχη έργων και επαγγελματίες του ενεργειακού κλάδου που καλούνται να διαχειριστούν αντίστοιχους κινδύνους στην πράξη. Η συνεισφορά της εργασίας, η οποία σχετίζεται με την ανάπτυξη ενός ενοποιημένου υβριδικού πλαισίου διαχείρισης κινδύνου, θεμελιώνεται μέσα από το βιβλιογραφικό κενό που αναδεικνύεται στο Κεφάλαιο 2 και συζητείται αναλυτικά στην ενότητα 5.2.

Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία επιχειρεί να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα: (α) Ποιοι είναι οι βασικοί κίνδυνοι κατά τη φάση κατασκευής ενός σταθμού CCGT; (β) Με ποιον

τρόπο μπορούν να αναγνωριστούν, να αξιολογηθούν και να ιεραρχηθούν συστηματικά; (γ) Πώς μπορεί το Μητρώο Κινδύνων να ενσωματωθεί στη διακυβέρνηση και στον έλεγχο των σταδίων του έργου; Οι απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Κεφάλαιο 5.

1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση, αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων που εμφανίζονται κατά τη φάση κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών με καύσιμο το φυσικό αέριο, και ειδικότερα μονάδων συνδυασμένου κύκλου (CCGT). Κατά την κατασκευαστική φάση τέτοιων έργων εμπλέκονται πολλαπλοί φορείς — εργολάβοι, υπεργολάβοι, προμηθευτές, τεχνικοί σύμβουλοι— γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα του συντονισμού και ενισχύει την πιθανότητα καθυστερήσεων, τεχνικών αστοχιών και οργανωτικών προβλημάτων (PMI, 2021· ISO, 2018).

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστηματικού πλαισίου αναγνώρισης, ανάλυσης και αξιολόγησης κινδύνων για την κατασκευαστική φάση τέτοιων μονάδων, το οποίο θα υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων μέσω της ιεράρχησης των κινδύνων με βάση την πιθανότητα εμφάνισης και τη σοβαρότητά τους. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού αξιοποιούνται καθιερωμένες μεθοδολογίες —ποιοτική ανάλυση μέσω Risk Matrix, δομημένη αναγνώριση μέσω HAZID/HAZOP και expert elicitation, ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων (Risk Register)— σε συνδυασμό με μια αναλυτική ενδεικτική εφαρμογή σε υποθετικό έργο συνδυασμένου κύκλου (ISO, 2018· IEC, 2019).

Τα αποτελέσματα της εργασίας απευθύνονται σε μηχανικούς έργων, project managers και στελέχη του ενεργειακού τομέα, με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας των κατασκευαστικών διαδικασιών σε έργα ηλεκτροπαραγωγής.

1.2 Η Σημασία του Φυσικού Αερίου στο Ενεργειακό Μείγμα

Το φυσικό αέριο αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας στο σύγχρονο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του ενεργειακού μείγματος πολλών χωρών. Η χρήση του έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω των τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα, όπως ο λιγνίτης και το πετρέλαιο. Συγκεκριμένα, οι μονάδες φυσικού αερίου εκπέμπουν σημαντικά χαμηλότερες ποσότητες

διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του ενεργειακού τομέα (IEA, 2023).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου είναι η υψηλή απόδοση των σύγχρονων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, ιδιαίτερα των συνδυασμένων κύκλων (Combined Cycle Gas Turbine – CCGT), οι οποίοι μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλούς βαθμούς ενεργειακής απόδοσης μέσω της αξιοποίησης θερμότητας από τα καυσαέρια (IEA, 2023). Παράλληλα, οι σταθμοί φυσικού αερίου παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία λειτουργίας, καθώς μπορούν να εκκινούν και να μεταβάλλουν την παραγωγή τους ταχέως, υποστηρίζοντας τη σταθερότητα των ηλεκτρικών δικτύων (IPCC, 2022).

Καύσιμο	Εκπομπές CO ₂	Ευελιξία Λειτουργίας	Βαθμός Απόδοσης
Λιγνίτης	Υψηλές	Χαμηλή	30–40%
Πετρέλαιο	Υψηλές	Μέτρια	35–45%
Φυσικό Αέριο (CCGT)	Χαμηλότερες	Υψηλή	55–62%
ΑΠΕ	Πολύ χαμηλές	Εξαρτάται από τον πόρο	—

Πίνακας 1: Σύγκριση βασικών καυσίμων ηλεκτροπαραγωγής (πηγή: προσαρμογή από IEA, 2023· IPCC, 2022)

Η σημασία του φυσικού αερίου ενισχύεται περαιτέρω στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης. Καθώς η διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται, δημιουργούνται προκλήσεις λόγω της στοχαστικής φύσης της παραγωγής τους. Σε αυτό το πλαίσιο, το φυσικό αέριο λειτουργεί ως καύσιμο «μετάβασης», υποστηρίζοντας την ευστάθεια του συστήματος και εξασφαλίζοντας την ενεργειακή επάρκεια (IEA, 2023· IPCC, 2022).

Επιπλέον, η ανάπτυξη υποδομών φυσικού αερίου, όπως δίκτυα μεταφοράς και τερματικοί σταθμοί LNG, έχει ενισχύσει τη γεωστρατηγική και οικονομική σημασία του καυσίμου, συμβάλλοντας στην ενεργειακή ασφάλεια και στη διαφοροποίηση των πηγών προμήθειας (European Commission, 2023). Παρόλα αυτά, η χρήση του φυσικού αερίου συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως η εξάρτηση από διεθνείς αγορές και η μεταβλητότητα των τιμών, γεγονός που απαιτεί προσεκτικό ενεργειακό σχεδιασμό.



Σχήμα 1 : Ρόλος του φυσικού αερίου στην ενεργειακή μετάβαση.

Συνολικά, το φυσικό αέριο αποτελεί σήμερα έναν κρίσιμο πυλώνα του ενεργειακού μείγματος, λειτουργώντας ως μεταβατικό καύσιμο που υποστηρίζει την ενεργειακή ασφάλεια, την ευελιξία των συστημάτων και τη σταδιακή μετάβαση προς ένα πιο χαμηλών εκπομπών ενεργειακό μέλλον.

1.3 Η Παρουσίαση του Προβλήματος: Προκλήσεις στην Κατασκευή Μονάδων

Η κατασκευή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, και ειδικότερα σταθμών συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (CCGT), αποτελεί ένα από τα πλέον σύνθετα είδη μεγάλων τεχνικών έργων (megaprojects). Τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό τεχνολογικής πολυπλοκότητας, αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας και ασφάλειας, καθώς και σημαντικές απαιτήσεις σε κεφαλαιουχικές επενδύσεις και χρόνο υλοποίησης. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα ενεργειακά megaprojects παρουσιάζουν συχνά αυξημένο κίνδυνο υπερβάσεων κόστους και καθυστερήσεων, λόγω της πολυπλοκότητας των διεργασιών και της εμπλοκής πολλών διαφορετικών ενδιαφερόμενων μερών (Flyvbjerg, 2014· Sovacool & Ryu, 2025).

Μία από τις βασικές προκλήσεις στην κατασκευή τέτοιων έργων είναι ο πολύπλοκος συντονισμός μεταξύ εργολάβων, υπεργολάβων, προμηθευτών και τεχνικών συμβούλων. Η κατακερματισμένη δομή των συμβάσεων (EPC – Engineering, Procurement, Construction)

αυξάνει την πιθανότητα αστοχιών στον συντονισμό, καθυστερήσεων στην παράδοση εξοπλισμού και ασυνεπειών στην εκτέλεση των εργασιών (PMI, 2021). Παράλληλα, η εξάρτηση από διεθνείς εφοδιαστικές αλυσίδες καθιστά τα έργα ευάλωτα σε καθυστερήσεις, αυξήσεις κόστους πρώτων υλών και γεωπολιτικούς κινδύνους.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα αφορά την τεχνική πολυπλοκότητα των συστημάτων. Οι μονάδες φυσικού αερίου περιλαμβάνουν προηγμένο μηχανολογικό εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας, όπως αεριοστρόβιλους, ατμοστρόβιλους και συστήματα ανάκτησης θερμότητας, τα οποία απαιτούν εξειδικευμένη εγκατάσταση και αυστηρούς ελέγχους ποιότητας. Τυχόν σφάλματα κατά τη φάση της εγκατάστασης ή της δοκιμαστικής λειτουργίας (commissioning) μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές καθυστερήσεις ή ακόμα και σε αστοχίες του συστήματος (Sánchez-Colmenarejo et al., 2022).

Εξίσου καθοριστικές είναι οι απαιτήσεις για υγεία και ασφάλεια στην εργασία (HSE). Τα εργοτάξια ενεργειακών μονάδων χαρακτηρίζονται από υψηλό κίνδυνο εργατικών ατυχημάτων λόγω της ταυτόχρονης εκτέλεσης πολλαπλών εργασιών, της χρήσης βαρέως εξοπλισμού και της ύπαρξης επικίνδυνων ενεργειακών συστημάτων υψηλής πίεσης. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η ανεπαρκής διαχείριση HSE μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά ατυχήματα με σημαντικές ανθρώπινες και οικονομικές συνέπειες (ISO, 2018).

Σημαντικό παράγοντα κινδύνου αποτελούν και οι οικονομικές και χρηματοοικονομικές προκλήσεις. Οι διακυμάνσεις στις τιμές υλικών, οι αλλαγές στο ρυθμιστικό πλαίσιο και οι καθυστερήσεις στην εκτέλεση μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές υπερβάσεις κόστους, οι οποίες είναι συχνό φαινόμενο σε μεγάλα ενεργειακά έργα (Sovacool & Ryu, 2025). Σε πολλές περιπτώσεις, τα έργα αυτά παρουσιάζουν αποκλίσεις από τον αρχικό προϋπολογισμό, γεγονός που επηρεάζει τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Τέλος, σημαντική πρόκληση αποτελεί και η περιβαλλοντική και αδειοδοτική διάσταση των έργων. Οι αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και οι διαδικασίες αδειοδότησης μπορούν να οδηγήσουν σε καθυστερήσεις ή ανασχεδιασμό των έργων, επηρεάζοντας το συνολικό χρονοδιάγραμμα υλοποίησης. Η ανάγκη συμμόρφωσης με διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα ενισχύει περαιτέρω την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής.

Συνολικά, οι προκλήσεις στην κατασκευή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου είναι πολυδιάστατες και αλληλένδετες, συνδυάζοντας τεχνικούς, οργανωτικούς, οικονομικούς και κανονιστικούς παράγοντες. Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των προκλήσεων απαιτεί

συστηματική προσέγγιση διαχείρισης κινδύνων, η οποία αποτελεί και το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Κατηγορία	Ενδεικτικά Παραδείγματα	Κύρια Φάση Επίδρασης
Τεχνικοί	Αστοχία εξοπλισμού, σφάλματα σχεδιασμού	Ανέγερση, commissioning
Οικονομικοί	Υπέρβαση κόστους, μεταβολή τιμών υλικών	Καθ' όλη τη διάρκεια του έργου
Χρονοδιαγράμματος	Καθυστερήσεις προμηθειών, change orders	Προμήθειες, ανέγερση
HSE	Εργατικά ατυχήματα, επικίνδυνες εργασίες	Εργοταξιακές εργασίες
Περιβαλλοντικοί / Αδειοδοτικοί	Καθυστερήση αδειών, περιβαλλοντικοί όροι	Σχεδιασμός, προ-κατασκευή
Συμβατικοί / Governance	Ασαφείς συμβάσεις, ανεπαρκής εποπτεία	Καθ' όλη τη διάρκεια του έργου

Πίνακας 2: Βασικές κατηγορίες κινδύνων (πηγή: ISO, 2018· PMI, 2021)



Σχήμα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία ενός έργου ηλεκτροπαραγωγής.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε πέντε βασικά κεφάλαια, με στόχο τη συστηματική ανάλυση και προσέγγιση του αντικειμένου της αξιολόγησης και διαχείρισης κινδύνων κατά τη φάση κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών με καύσιμο το φυσικό αέριο.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή: Παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της εργασίας, το αντικείμενο και ο σκοπός της μελέτης, καθώς και η σημασία του φυσικού αερίου στο σύγχρονο ενεργειακό μείγμα. Επιπλέον, αναλύονται οι βασικές προκλήσεις που σχετίζονται με την κατασκευή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και τίθενται οι βάσεις για την ανάγκη συστηματικής διαχείρισης κινδύνων.

Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση: Πραγματοποιείται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου, τις βασικές

αρχές διαχείρισης κινδύνων, τα διεθνή πρότυπα και μεθοδολογίες που εφαρμόζονται σε μεγάλα τεχνικά και ενεργειακά έργα, καθώς και τις εξειδικευμένες μεθόδους αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων (HAZID/HAZOP, expert elicitation, fuzzy/MCDM) και τις πρακτικές governance που εντοπίζονται στη διεθνή εμπειρία.

Κεφάλαιο 3 – Μεθοδολογία Διαχείρισης Κινδύνων: Παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται στην εργασία. Αναλύονται η Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure), οι διαδικασίες αναγνώρισης κινδύνων, η ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση μέσω εργαλείων όπως ο πίνακας επικινδυνότητας (Risk Matrix), η ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων (Risk Register), καθώς και οι στρατηγικές αντιμετώπισης, μετριασμού και governance.

Κεφάλαιο 4 – Μελέτη Περίπτωσης: Εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία σε ενδεικτικό έργο κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου. Πραγματοποιείται αναγνώριση και αξιολόγηση κρίσιμων κινδύνων, αναλύονται σε βάθος οι τεχνικοί κίνδυνοι στις διεπαφές αεριοστροβίλου–HRSG–ατμοστροβίλου και παρουσιάζονται προτάσεις διαχείρισης με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και του ελέγχου κόστους.

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα και Προτάσεις: Συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της εργασίας, αναδεικνύεται η πρωτότυπη συνεισφορά της, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης και επισημαίνονται οι περιορισμοί της έρευνας. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της διαχείρισης κινδύνων σε ενεργειακά έργα.

Με τη δομή αυτή επιδιώκεται η ομαλή μετάβαση από το θεωρητικό υπόβαθρο στην πρακτική εφαρμογή, με στόχο την ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος της διαχείρισης κινδύνων σε έργα ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποτελεί βασικό στάδιο της παρούσας έρευνας, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση των θεωρητικών και πρακτικών προσεγγίσεων που έχουν αναπτυχθεί σχετικά με τους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς φυσικού αερίου και τη διαχείριση κινδύνων σε μεγάλα ενεργειακά έργα. Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή τεχνική πολυπλοκότητα, σημαντικές επενδυτικές απαιτήσεις και αυξημένη έκθεση σε τεχνικούς, οικονομικούς και οργανωτικούς κινδύνους (Zhao, 2023· Sovacool & Ryu, 2025).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο, τα πρότυπα διαχείρισης κινδύνων που εφαρμόζονται διεθνώς, οι κυριότερες κατηγορίες κινδύνων στα ενεργειακά κατασκευαστικά έργα, οι εξειδικευμένες μεθοδολογίες αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων, οι τεχνικοί κίνδυνοι στις διεπαφές του κύκλου CCGT, οι πρακτικές governance που καταγράφονται διεθνώς, καθώς και εμπειρίες από αντίστοιχα έργα που έχουν υλοποιηθεί σε διεθνές επίπεδο.

2.1 Τεχνολογίες Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής με Φυσικό Αέριο (Συνδυασμένος Κύκλος κ.λπ.)

Το φυσικό αέριο αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς συνδυάζει υψηλή ενεργειακή απόδοση, χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα και μεγάλη λειτουργική ευελιξία. Η συνεχής αύξηση της συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει ενισχύσει περαιτέρω τον ρόλο των μονάδων φυσικού αερίου, οι οποίες μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα στις διακυμάνσεις της ζήτησης και της παραγωγής από στοχαστικές πηγές ενέργειας (IEA, 2023).

Οι κυριότερες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο είναι οι σταθμοί ανοικτού κύκλου (Open Cycle Gas Turbine – OCGT) και οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine – CCGT). Στους σταθμούς ανοικτού κύκλου, το φυσικό αέριο καίγεται σε θάλαμο καύσης και τα παραγόμενα καυσαέρια κινούν έναν αεριοστρόβιλο που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από γρήγορη εκκίνηση και χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης, παρουσιάζει όμως μικρότερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (IEA, 2023).

Οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου αποτελούν σήμερα την πλέον διαδεδομένη τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο. Η λειτουργία τους βασίζεται στον συνδυασμό ενός αεριοστρόβιλου και ενός ατμοστρόβιλου. Η θερμότητα των καυσαερίων που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο δεν απορρίπτεται στο περιβάλλον αλλά αξιοποιείται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator – HRSG) για την παραγωγή ατμού, ο οποίος στη συνέχεια κινεί έναν ατμοστρόβιλο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται βαθμοί απόδοσης που συχνά υπερβαίνουν το 60%, καθιστώντας τις μονάδες αυτές ιδιαίτερα αποδοτικές και ανταγωνιστικές (IEA, 2023).

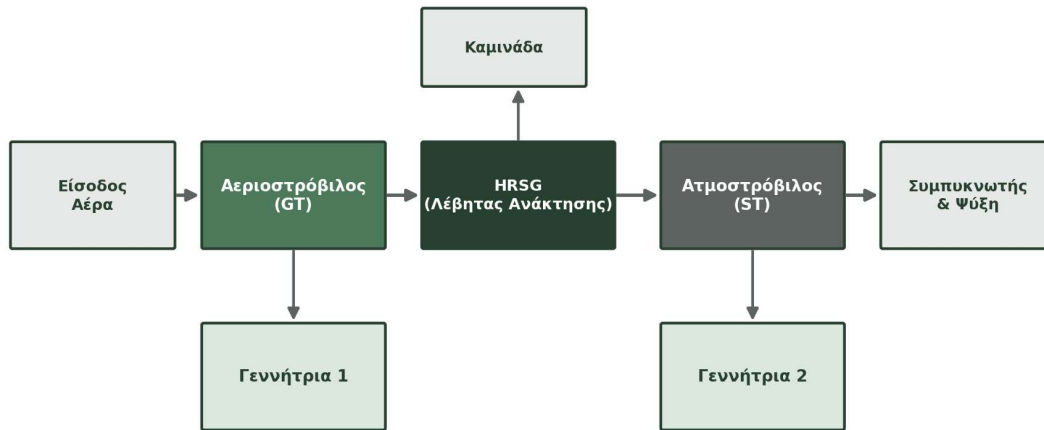
Οι βασικές εγκαταστάσεις ενός σύγχρονου σταθμού συνδυασμένου κύκλου περιλαμβάνουν τον αεριοστρόβιλο, τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας, τον ατμοστρόβιλο, τα συστήματα ψύξης, τα βοηθητικά συστήματα καυσίμου και τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς. Η κατασκευή και εγκατάσταση του εξοπλισμού αυτού απαιτεί υψηλή ακρίβεια, εξειδικευμένο προσωπικό και αυστηρές διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου. Σύμφωνα με τους Sánchez-Colmenarejo et al. (2022), οι εργασίες εγκατάστασης και θέσης σε λειτουργία (commissioning) αποτελούν από τις πλέον κρίσιμες φάσεις του έργου, καθώς κατά το στάδιο αυτό εμφανίζεται σημαντικός αριθμός τεχνικών κινδύνων που μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια, το κόστος και το χρονοδιάγραμμα του έργου.

Επιπλέον, η λειτουργία των μονάδων φυσικού αερίου συνδέεται με ειδικούς κινδύνους που αφορούν πιθανές διαρροές καυσίμου, εκρήξεις, πυρκαγιές και απελευθέρωση επικίνδυνων αερίων. Η ποσοτική αξιολόγηση αυτών των κινδύνων αποκτά ολοένα μεγαλύτερη σημασία για τον σχεδιασμό ασφαλών εγκαταστάσεων και την προστασία του προσωπικού και του περιβάλλοντος (Li, Sun, Zhang & Zhang, 2024).

Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου (CCGT) αποτελούν σήμερα την πλέον αποδοτική και ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο. Κατά τον IEA (2023), οι υψηλοί βαθμοί απόδοσης και η λειτουργική ευελιξία καθιστούν τις μονάδες αυτές βασικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης.

Παράλληλα, οι Sánchez-Colmenarejo et al. (2022) επισημαίνουν ότι η τεχνολογική πολυπλοκότητα των εγκαταστάσεων αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις κατά την κατασκευή και τη θέση σε λειτουργία. Συνεπώς, η κατανόηση των τεχνολογικών χαρακτηριστικών των

σταθμών φυσικού αερίου αποτελεί προϋπόθεση για την αποτελεσματική αναγνώριση και διαχείριση των κινδύνων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του έργου.



Καυσαέρια GT → HRSG → Ατμός → ST — αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας

Σχήμα 3: Απλουστευμένη διάταξη σταθμού συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (CCGT).

Χαρακτηριστικό	OCGT	CCGT
Βαθμός Απόδοσης	35–40%	55–62%
Χρόνος Εκκίνησης	Πολύ μικρός	Μικρός
Επενδυτικό Κόστος	Χαμηλό	Υψηλότερο
Κατανάλωση Καυσίμου	Υψηλότερη	Χαμηλότερη
Εκπομπές CO ₂ ανά MWh	Υψηλότερες	Χαμηλότερες
Συνήθης Χρήση	Αιχμές φορτίου	Βασική και ευέλικτη παραγωγή

Πίνακας 3: Σύγκριση τεχνολογιών OCGT και CCGT (πηγή: προσαρμογή από IEA, 2023)

2.2 Θεωρητικό Πλαίσιο Διαχείρισης Κινδύνων (Risk Management Standards – ISO 31000)

Η διαχείριση κινδύνων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες της σύγχρονης διοίκησης έργων και οργανισμών. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 31000:2018, κίνδυνος ορίζεται ως η επίδραση της αβεβαιότητας στους στόχους ενός οργανισμού ή έργου (ISO, 2018). Η διαχείριση κινδύνων αποσκοπεί στον εντοπισμό, την ανάλυση, την αξιολόγηση και την αντιμετώπιση πιθανών γεγονότων που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά ή θετικά την επίτευξη των στόχων ενός έργου.

Το πρότυπο ISO 31000 παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη συστηματική διαχείριση κινδύνων. Σύμφωνα με αυτό, η διαδικασία περιλαμβάνει τον καθορισμό του πλαισίου

λειτουργίας, την αναγνώριση κινδύνων, την ανάλυση κινδύνων, την αξιολόγηση κινδύνων, την αντιμετώπιση κινδύνων, καθώς και τη συνεχή παρακολούθηση και αναθεώρηση των αποτελεσμάτων (ISO, 2018).

Ταυτόχρονα, το PMBOK® Guide της Project Management Institute (PMI, 2021) ενσωματώνει τη διαχείριση κινδύνων ως βασικό γνωστικό αντικείμενο της διοίκησης έργων. Σύμφωνα με το PMBOK, η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων συμβάλλει στη μείωση της αβεβαιότητας και αυξάνει τις πιθανότητες επιτυχούς ολοκλήρωσης ενός έργου εντός χρονοδιαγράμματος και προϋπολογισμού.

Η διαδικασία αναγνώρισης κινδύνων (Risk Identification) αποτελεί το πρώτο και σημαντικότερο στάδιο. Κατά το στάδιο αυτό εντοπίζονται όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι που ενδέχεται να επηρεάσουν το έργο. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση μέσω εργαλείων όπως οι πίνακες επικινδυνότητας (Risk Matrix), η ανάλυση πιθανότητας και επιπτώσεων και η ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων (Risk Register).

Κατά τον Zhao (2023), η σύγχρονη έρευνα στη διαχείριση κατασκευαστικών κινδύνων μετατοπίζεται από παραδοσιακές ποιοτικές προσεγγίσεις προς περισσότερο δυναμικά και ψηφιακά συστήματα αξιολόγησης που επιτρέπουν συνεχή παρακολούθηση των κινδύνων καθ' όλη τη διάρκεια του έργου. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για μεγάλα ενεργειακά έργα, όπου η πολυπλοκότητα και η αβεβαιότητα είναι αυξημένες.

Αν και το ISO 31000 αποτελεί τη διεθνώς αποδεκτή προσέγγιση, η γενικότητά του συνιστά ταυτόχρονα και περιορισμό όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα ενεργειακά megaprojects: το πρότυπο περιγράφει έναν γενικό κύκλο διαχείρισης κινδύνου, χωρίς όμως να προσδιορίζει τεχνικές αναγνώρισης προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες μιας μονάδας CCGT —όπως η ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης στη διεπαφή GT–HRSG–ST— ή στη διαδοχή αδειοδοτικών σταδίων ενός έργου EPC.

Ο Zhao (2023) υπογραμμίζει επιπλέον ότι η μετάβαση από στατικές σε δυναμικά παρακολουθούμενες προσεγγίσεις κινδύνου παραμένει, στην πράξη, περιορισμένη σε πολλά έργα. Η διαπίστωση αυτή δικαιολογεί την ανάγκη ενός πιο εξειδικευμένου μεθοδολογικού πλαισίου, όπως αναπτύσσεται στις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 4: Κύκλος διαδικασίας διαχείρισης κινδύνων σύμφωνα με το ISO 31000:2018.

2.3 Ιδιαιτερότητες και Κίνδυνοι στα Ενεργειακά Κατασκευαστικά Έργα

Τα ενεργειακά έργα μεγάλης κλίμακας συγκαταλέγονται στα πλέον σύνθετα τεχνικά έργα παγκοσμίως. Οι ιδιαιτερότητές τους σχετίζονται με το μεγάλο μέγεθος της επένδυσης, τη μεγάλη χρονική διάρκεια υλοποίησης, την εξάρτηση από εξειδικευμένο εξοπλισμό και τη συμμετοχή πολλών διαφορετικών φορέων και αναδόχων.

Οι τεχνικοί κίνδυνοι αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες κινδύνων. Περιλαμβάνουν αστοχίες εξοπλισμού, σφάλματα σχεδιασμού, προβλήματα εγκατάστασης και δυσλειτουργίες κατά τη φάση δοκιμών και θέσης σε λειτουργία. Σύμφωνα με τους Sánchez-Colmenarejo et al. (2022), τα προσωρινά συστήματα που χρησιμοποιούνται κατά το commissioning παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο κινδύνου και απαιτούν ειδικές διαδικασίες ελέγχου.

Εξίσου σημαντικοί είναι οι κίνδυνοι υγείας και ασφάλειας (Health, Safety and Environment – HSE). Οι εργασίες ανύψωσης βαρέος εξοπλισμού, οι εργασίες σε ύψος, οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις και οι εργασίες σε περιοχές υψηλής πίεσης δημιουργούν συνθήκες αυξημένης επικινδυνότητας για το προσωπικό. Η ανεπαρκής εφαρμογή των μέτρων ασφαλείας μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά ατυχήματα, διακοπή εργασιών και σημαντικές οικονομικές απώλειες.

Παράλληλα, οι οργανωτικοί και συμβατικοί κίνδυνοι συνδέονται με τον συντονισμό των εμπλεκόμενων μερών. Τα έργα τύπου EPC (Engineering – Procurement – Construction) απαιτούν αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ μελετητών, προμηθευτών, εργολάβων και ιδιοκτητών του έργου. Ανεπαρκής επικοινωνία ή κακή διαχείριση συμβάσεων μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις και συγκρούσεις μεταξύ των συμμετεχόντων (PMI, 2021).

Σημαντική κατηγορία αποτελούν επίσης οι οικονομικοί κίνδυνοι, οι οποίοι σχετίζονται με αυξήσεις τιμών υλικών, συναλλαγματικές διακυμάνσεις, πληθωριστικές πιέσεις και μεταβολές στο κόστος χρηματοδότησης. Οι Sovacool και Ryu (2025) διαπίστωσαν ότι οι υπερβάσεις κόστους και οι καθυστερήσεις αποτελούν διαχρονικό χαρακτηριστικό πολλών ενεργειακών έργων διεθνώς.

Τέλος, οι περιβαλλοντικοί και κανονιστικοί κίνδυνοι αφορούν αλλαγές στη νομοθεσία, απαιτήσεις αδειοδότησης και συμμόρφωση με περιβαλλοντικά πρότυπα. Η μη έγκαιρη αντιμετώπιση των απαιτήσεων αυτών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές καθυστερήσεις ή ακόμη και σε αναστολή των εργασιών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι έξι αυτές κατηγορίες δεν αντιμετωπίζονται εξίσου συστηματικά στη βιβλιογραφία: οι τεχνικοί και οι κίνδυνοι HSE διαθέτουν εκτενή, ποσοτικά τεκμηριωμένη ανάλυση (Sánchez-Colmenarejo et al., 2022), ενώ οι οργανωτικοί/συμβατικοί κίνδυνοι αντιμετωπίζονται συχνότερα περιγραφικά, χωρίς ενιαία μεθοδολογία μέτρησης της σοβαρότητάς τους. Η ασυμμετρία αυτή στη βιβλιογραφική κάλυψη αποτελεί ένδειξη ότι απαιτείται ένα πλαίσιο ικανό να αντιμετωπίζει με ενιαίο τρόπο τόσο τους «σκληρούς» τεχνικούς όσο και τους «μαλακούς» οργανωτικούς κινδύνους — ζήτημα που επανεξετάζεται στην ενότητα 2.8.

Κατηγορία Κινδύνου	Παραδείγματα
Τεχνικοί	Αστοχία εξοπλισμού, σφάλματα σχεδιασμού
Χρονοδιαγράμματος	Καθυστερήσεις προμηθειών
Οικονομικοί	Υπέρβαση κόστους, πληθωρισμός
HSE	Ατυχήματα, τραυματισμοί
Περιβαλλοντικοί	Παραβίαση περιβαλλοντικών όρων
Συμβατικοί	Διαφορές μεταξύ αναδόχων
Εφοδιαστικής Αλυσίδας	Καθυστέρηση παράδοσης κρίσιμου εξοπλισμού

Πίνακας 4: Κατηγορίες κινδύνων σε έργα ηλεκτροπαραγωγής (πηγή: προσαρμογή από PMI, 2021· ISO, 2018· Sovacool & Ryu, 2025)



Σχήμα 5: Ταξινόμηση κινδύνων κατασκευής σταθμού φυσικού αερίου.

2.4 Ανασκόπηση Διεθνούς Εμπειρίας και Αστοχιών σε Παρόμοια Έργα

Η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι τα μεγάλα ενεργειακά έργα παρουσιάζουν συχνά σημαντικές αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιασμό τους. Οι υπερβάσεις κόστους, οι καθυστερήσεις χρονοδιαγράμματος και τα τεχνικά προβλήματα αποτελούν επαναλαμβανόμενα φαινόμενα σε έργα παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας.

Ο Flyvbjerg (2014) υποστηρίζει ότι τα megaprojects εμφανίζουν συστηματικά υψηλά ποσοστά αποτυχίας ως προς τους στόχους κόστους και χρόνου, κυρίως λόγω αισιόδοξων αρχικών εκτιμήσεων και ανεπαρκούς διαχείρισης κινδύνων. Αντίστοιχα, οι Sovacool και Ryu (2025), αναλύοντας μεγάλο αριθμό ενεργειακών υποδομών διεθνώς, διαπίστωσαν ότι οι καθυστερήσεις και οι υπερβάσεις κόστους αποτελούν συνηθισμένο φαινόμενο ανεξάρτητα από την τεχνολογία παραγωγής ενέργειας.

Στον τομέα των σταθμών συνδυασμένου κύκλου, οι Sánchez-Colmenarejo et al. (2022) ανέδειξαν ότι η φάση commissioning συγκεντρώνει σημαντικό ποσοστό των κρίσιμων κινδύνων, καθώς σε αυτή πραγματοποιούνται ταυτόχρονες δοκιμές πολλαπλών συστημάτων υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η ανεπαρκής προετοιμασία της φάσης αυτής μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές τεχνικές αστοχίες και καθυστερήσεις στην εμπορική λειτουργία της μονάδας.

Επιπλέον, έρευνα των Zohrehvandi και Tenera (2019) σε έργα κατασκευής σταθμών συνδυασμένου κύκλου έδειξε ότι οι σημαντικότεροι κίνδυνοι σχετίζονται με την προμήθεια κρίσιμου εξοπλισμού, τις αλλαγές σχεδιασμού, τις καθυστερήσεις κατασκευής και τις αδυναμίες συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Η εφαρμογή δομημένων

μοντέλων διαχείρισης κινδύνων συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης των έργων ως προς τον χρόνο, το κόστος και την ποιότητα.

Αντίστοιχα, ειδικότερες μελέτες σε έργα φυσικού αερίου και combined-cycle σταθμών επιβεβαιώνουν ότι οι καθυστερήσεις συνδέονται συστηματικά με late deliveries, ελλείψεις ποιοτικού ελέγχου, σφάλματα κατά την κατασκευή ή τις προμήθειες, συχνές τροποποιήσεις σύμβασης (change orders), μη ρεαλιστική διάρκεια σύμβασης και ανεπαρκή διαχείριση συμβάσεων (Derakhshanfar et al., 2019). Σε επίπεδο φάσεων, οι υπερβάσεις κόστους και χρόνου εντείνονται από αλλαγές σχεδιασμού, ελλείψεις εξοπλισμού και εργατικού δυναμικού, καθυστερημένες αποφάσεις του κυρίου του έργου, ασθενή διαχείριση εργοταξίου και ανεπαρκή επικοινωνία με τους εμπλεκόμενους φορείς (Habibi & Kermanshachi, 2018).

Συγγραφέας	Έτος	Αντικείμενο	Βασικό Συμπέρασμα
Flyvbjerg	2014	Megaprojects	Συχνές υπερβάσεις κόστους και χρόνου
Sánchez-Colmenarejo et al.	2022	Commissioning Power Plants	Υψηλοί τεχνικοί κίνδυνοι στη φάση commissioning
Sovacool & Ryu	2025	Energy Infrastructure	Συστηματικές καθυστερήσεις και υπερβάσεις
Zohrehvandi & Tenera	2019	CCGT Projects	Κρίσιμοι κίνδυνοι σε προμήθειες και συντονισμό
Derakhshanfar et al.	2019	Gas & CCGT Projects (Iran)	Καθυστερήσεις από late deliveries και αδύναμη διαχείριση σύμβασης
Habibi & Kermanshachi	2018	Phase-based EPC Analysis	Αίτια υπερβάσεων κόστους/χρόνου ανά φάση έργου

Πίνακας 5: Διεθνείς μελέτες που ανασκοπήθηκαν

2.5 Μέθοδοι Αναγνώρισης και Αξιολόγησης Κινδύνων στη Διεθνή Βιβλιογραφία

Πέραν των γενικών πλαισίων διαχείρισης κινδύνων (ISO 31000, PMBOK), σημαντικό τμήμα της διεθνούς βιβλιογραφίας εστιάζει σε εξειδικευμένες μεθοδολογίες αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων που εφαρμόζονται σε βιομηχανικά και ενεργειακά έργα. Οι μεθοδολογίες αυτές κινούνται σε τρεις βασικούς άξονες: (α) δομημένες τεχνικές ανάλυσης επικινδυνότητας διεργασιών (HAZID/HAZOP), (β) ποιοτικές προσεγγίσεις μέσω εμπειρογνωμοσύνης (expert elicitation), και (γ) ποσοτικές/ημι-ποσοτικές τεχνικές ιεράρχησης υπό αβεβαιότητα (fuzzy logic, πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων – MCDM).

Η μέθοδος HAZOP (Hazard and Operability Analysis) παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία ως ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική process hazard analysis, εστιάζοντας σε αποκλίσεις από τις

συνθήκες σχεδιασμού μέσω συστηματικών λέξεων-οδηγών (guide words), ενώ οι μελέτες HAZID/HAZOP/SIL αναφέρονται ως τυπικές HSE μελέτες σε σύνθετα βιομηχανικά έργα (Dunjó et al., 2010). Παράλληλα, σε πρακτικές ελέγχου τεχνικών εγγράφων χρησιμοποιούνται checklists, P&ID review και «cold-eyes» επανεξέταση, με ιδιαίτερη ισχύ στην αποτύπωση κινδύνων διεργασίας και μηχανολογικών συστημάτων (Perez & Madewell, 2013).

Ωστόσο, η ίδια βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι παραδοσιακές αυτές μελέτες δεν επαρκούν από μόνες τους για λεπτομερή διαχείριση HSE κατά τις σύνθετες φάσεις μηχανικής και εκτέλεσης έργων LNG και σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (Tanabe, Turco & Miyake, 2017). Συνεπώς, για έργα κατασκευής CCGT, η HAZID/HAZOP λειτουργεί αποτελεσματικότερα ως θεμέλιο παρά ως πλήρες σύστημα διαχείρισης κινδύνου κατά την κατασκευαστική φάση.

Η τεχνική expert elicitation (καταγραφή εμπειρογνωμοσύνης μέσω συνεντεύξεων και brainstorming) χρησιμοποιήθηκε σε μελέτη κινδύνου σταθμού συνδυασμένου κύκλου, όπου οι κίνδυνοι που αναδείχθηκαν ήταν κυρίως process/mechanical, όπως πυρκαγιά/έκρηξη και θραύση ατμοσωλήνων (Shirali et al., 2014). Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν τα ποσοτικά δεδομένα είναι περιορισμένα, ωστόσο το παραγόμενο risk map εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη σύνθεση και την εμπειρία της ομάδας ειδικών (Gul, 2018).

Στο ίδιο πλαίσιο, καταγράφεται αυξανόμενη χρήση μεθόδων fuzzy logic και πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (MCDM) για την ιεράρχηση κινδύνων υπό συνθήκες αβεβαιότητας, όπως οι μέθοδοι AHP, VIKOR, Fuzzy-TOPSIS, παραλλαγές Fine-Kinney και προσεγγίσεις degree-of-belief (İlibahar, Karaşan, Cebi & Kahraman, 2018· Karaşan, İlibahar, Cebi & Kahraman, 2018· Gul & Ak, 2018· Gul, Guven & Güneri, 2018· Gul, 2020).

Σε σταθμό συνδυασμένου κύκλου, εφαρμόστηκε fuzzy-logic ιεράρχηση κινδύνων μετά το στάδιο αναγνώρισης, αναδεικνύοντας πρακτική εφαρμοσιμότητα της μεθόδου σε πραγματικές εγκαταστάσεις (Shirali et al., 2014). Πιο πρόσφατα, μοντέλα δομικών εξισώσεων σε συνδυασμό με fuzzy set theory έχουν εφαρμοστεί σε έργα κατασκευής πετρελαίου και φυσικού αερίου (Al-Mhdawi, O'Connor & Qazi, 2024), ενώ αναπτύσσονται και μοντέλα με Fermatean fuzzy linguistic sets για αξιολόγηση κινδύνων υγείας και ασφάλειας (Chen, Liu, Wang & Shi, 2022).

Παρά τη διάδοσή τους, το ισχυρότερο πεδίο τεκμηρίωσης των μεθόδων fuzzy/MCDM παραμένει η ιεράρχηση κινδύνων υγείας και ασφάλειας σε επίπεδο εργοταξίου (OHS/worksite

ranking) και όχι η πλήρως ενοποιημένη διαχείριση κινδύνου σε επίπεδο ολόκληρου έργου EPC για σταθμούς φυσικού αερίου (Gul, 2018· Karaşan et al., 2018).

Μεθοδολογία	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
HAZID / HAZOP & Document Review	Συστηματική κάλυψη process/mechanical κινδύνων, διεθνώς καθιερωμένη πρακτική	Περιορισμένη κάλυψη civil/electrical/commissioning διεπαφών
Expert Elicitation / Brainstorming	Αξιοποιεί εμπειρία πεδίου, χρήσιμη υπό έλλειψη δεδομένων	Εξαρτάται από τη σύνθεση της ομάδας ειδικών, υποκειμενικότητα
Fuzzy Logic / MCDM (AHP, VIKOR, FTOPSIS)	Ιεράρχηση υπό αβεβαιότητα, ποσοτικοποίηση ποιοτικής κρίσης	Κυρίως εφαρμοσμένη σε OHS ranking, όχι EPC-wide συστήματα
Δυναμικό Risk Register & KPI Monitoring	Συνεχής παρακολούθηση, σύνδεση με στάδια ελέγχου έργου	Απαιτεί οργανωτική ωριμότητα και συστηματική επικαιροποίηση

Πίνακας 6: Σύγκριση κύριων μεθοδολογιών αναγνώρισης και αξιολόγησης κατασκευαστικού κινδύνου

2.6 Τεχνικοί Κίνδυνοι στις Διεπαφές Αεριοστροβίλου–HRSG–Ατμοστροβίλου και στο Commissioning

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζουν οι τεχνικοί κίνδυνοι που εντοπίζονται στις διεπαφές μεταξύ αεριοστροβίλου (Gas Turbine – GT), λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG) και ατμοστροβίλου (Steam Turbine – ST), ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια εκκίνησης (startup) και θέσης σε λειτουργία. Το βασικό εύρημα είναι ότι τα HRSG λειτουργούν ως το κύριο «σημείο συμφόρησης» (bottleneck) της δυναμικής απόκρισης του κύκλου, καθώς η μεγάλη μεταλλική τους μάζα επιβάλλει σημαντικά αργότερη θερμική απόκριση σε σχέση με τον αεριοστροβίλο, της τάξης των 10 έως 20 λεπτών (Rúa & Nord, 2020).

Η ασυμμετρία αυτή μεταξύ της ταχείας απόκρισης του GT και της αργής θερμικής απόκρισης του HRSG/ST αυξάνει τη θερμική καταπόνηση (thermal stress), τα φαινόμενα ερπυσμού (creep) και την κόπωση χαμηλού αριθμού κύκλων (low-cycle fatigue) στα κρίσιμα εξαρτήματα (Benato, Bracco, Stoppato & Mirandola, 2016· Rúa & Nord, 2020). Συγκριτικές μελέτες μεταξύ λεβήτων τύπου drum και once-through κατά την εκκίνηση επιβεβαιώνουν ότι η διαχείριση της θερμικής μετάβασης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχεδιασμού και λειτουργίας (Mertens et al., 2015), ενώ αριθμητικές και πειραματικές μελέτες σε πραγματικά δεδομένα εκκίνησης HRSG επιβεβαιώνουν τη σημασία της σωστής προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς (Alobaid, Karner, Belz κ.ά., 2014· Sabia κ.ά., 2019).

Σε επίπεδο λειτουργικού σχεδιασμού, τα μοντέλα κατανομής φορτίου (unit commitment) για μονάδες CCGT ενσωματώνουν πλέον, ως πρώτη αρχή σχεδιασμού, το κόστος κόπωσης λόγω

κυκλικής λειτουργίας (cycling costs due to fatigue damage), αναγνωρίζοντας ότι οι συχνές εκκινήσεις και παύσεις επιβαρύνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού (Wogrin, Galbally & Ramos, 2016). Αντίστοιχα ζητήματα δυναμικής ευελιξίας εξετάζονται και σε υβριδικά σχήματα ενσωμάτωσης αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα με μονάδες CCGT (Kruk-Gotzman, Ziolkowski, Iliev κ.ά., 2023).

Η φάση θέσης σε λειτουργία (commissioning) και ιδιαίτερα οι δοκιμές απόδοσης (performance testing) αποκτούν πρόσθετη πολυπλοκότητα όταν η κατασκευή πραγματοποιείται σταδιακά, δηλαδή με προσωρινή λειτουργία των αεριοστροβίλων σε απλό κύκλο (simple-cycle) πριν από την ολοκλήρωση και ενεργοποίηση του ατμοστροβιλικού κύκλου.

Η ενδιάμεση αυτή λειτουργία προκαλεί φθορά (degradation) στην ισχύ εξόδου, στον ειδικό βαθμό κατανάλωσης καυσίμου, στην παροχή αέρα και στη θερμοκρασία καυσαερίων πριν ολοκληρωθεί ο ατμοστροβιλικός κύκλος, με αποτέλεσμα οι τυπικές δοκιμές αποδοχής να μην επαρκούν χωρίς εξειδικευμένη ανάλυση ανά έργο (project-specific analysis) και σταδιακό πρόγραμμα δοκιμών (Nanjappa & Gross, 2012· Jin, Terrence, Sullivan & Friedman, 2010). Αποτυχίες σε αυτές τις δοκιμές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές καθυστερήσεις και δαπανηρές επαναλήψεις (retesting), όπως καταγράφεται και σε ιστορική εμπειρία αποδοχής μονάδων combined-cycle (McClintock, Grace, Gwin & Burcham, 2003).

Τέλος, παλαιότερη αλλά εξακολουθητικά χρήσιμη εμπειρία από την κατασκευή και λειτουργία μονάδων συνδυασμένου κύκλου (Zachary, Bauerschmidt & Loy, 2006· Smith, 2002) επιβεβαιώνει ότι οι πλέον απαιτητικές τεχνικές αστοχίες συγκεντρώνονται συστηματικά στις διεπαφές GT–HRSG–ST, γεγονός που καθιστά την περιοχή αυτή προτεραιότητα για κάθε πλαίσιο διαχείρισης κατασκευαστικού κινδύνου σε σταθμούς φυσικού αερίου.



Σχήμα 6: Διεπαφή αεριοστροβίλου (GT) – HRSG – ατμοστροβίλου (ST) και ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης.

2.7 Governance, Έλεγχος Σταδίων (Stage-Gate) και Ψηφιακή Παρακολούθηση

Πέρα από την τεχνική διάσταση, σημαντικό τμήμα της βιβλιογραφίας εστιάζει στη διακυβέρνηση (governance) της διαχείρισης κινδύνου σε έργα LNG και φυσικού αερίου. Καταγράφονται επίσημα μητρώα κινδύνων και προγράμματα διαχείρισης κινδύνου από την πλευρά του κυρίου του έργου, καθώς και σαφείς διαδικασίες συντονισμού των σχεδίων διαχείρισης κινδύνου των εργολάβων ήδη από το στάδιο υποβολής προσφορών EPC (LNG Project Management, 2014). Παράλληλα, συστήματα ελέγχου κινδύνου βάσει σταδίων (phased ή stage-gate risk control) παρουσιάζονται ως μηχανισμοί συστηματικής παρακολούθησης κινδύνων σε πολυεργολαβικά περιβάλλοντα με έντονες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ φάσεων (Jang, Han & Park, 2015).

Στο επίπεδο διαχείρισης εργολάβων, αναφέρονται πρακτικές όπως πρότυπα πρόσβασης στο εργοτάξιο, εκπαίδευση ασφαλείας, συμφωνίες ασφαλείας, γνωστοποίηση συνθηκών ασφαλείας, επανεξέταση σχεδίων κατασκευής, εποπτεία λειτουργικής ασφάλειας, επιθεωρήσεις, μηχανισμοί επικοινωνίας και τακτική αξιολόγηση επιδόσεων ασφαλείας (Abdul Majid, Mohd Shariff & Rusli, 2015). Αντίστοιχες πρακτικές εντοπίζονται και σε σύνθετα υπεράκτια έργα, όπου η οργανωμένη προετοιμασία εκτέλεσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα (Aird, 2019), καθώς και σε προγράμματα ανάπτυξης τεχνικής ικανότητας εθνικού επιπέδου σε πυρηνικά και ενεργειακά προγράμματα (Sharma, 2012).

Σε επίπεδο ελέγχου έργου, μελέτες στη βιομηχανία πετρελαίου και πετροχημικών αναδεικνύουν παράγοντες που διευκολύνουν αλλά και εμποδίζουν την επιτυχή εφαρμογή

συστημάτων ελέγχου έργου (project control systems), υπογραμμίζοντας τη σημασία της οργανωτικής ωριμότητας και της δέσμευσης της διοίκησης (Jawad, Ledwith & Panahifar, 2018). Επίσης, αναπτύσσονται και εξειδικευμένα μοντέλα μεταφοράς τεχνολογικού κινδύνου, όπως μοντέλα τύπου «δασικής πυρκαγιάς» (forest-fire model) για την εξάπλωση κινδύνου μεταξύ διασυνδεδεμένων συστημάτων (Wu & Liu, 2021).

Μια σαφής τάση που αναδεικνύεται στη πρόσφατη βιβλιογραφία είναι η μετάβαση προς ψηφιακά εργαλεία παρακολούθησης. Συστήματα μέτρησης εργατικού δυναμικού με τεχνολογία πραγματικού χρόνου έχουν εφαρμοστεί σε εργοτάξια κατασκευής φραγμάτων (Jiang, Lin, Qiang & Fan, 2015), ενώ λύσεις βασισμένες σε BIM (Building Information Modeling) για βιώσιμη διαχείριση ασφάλειας εφαρμόζονται πλέον και σε έργα downstream πετρελαίου και φυσικού αερίου (Waqar, Nisar & Qadir, 2025), με το BIM να αναγνωρίζεται γενικότερα ως εργαλείο υποστήριξης πολλαπλών γνωστικών περιοχών διαχείρισης έργου.

Παράλληλα, η έννοια των «έξυπνων εργοταξίων» (smart construction sites) αναδεικνύεται ως πολλά υποσχόμενη προσέγγιση βελτίωσης της επίδοσης HSE μέσω πραγματικού χρόνου παρακολούθησης (Xu, Nie, Li κ.ά., 2022).

Σε επίπεδο στοχευμένων μέτρων ασφαλείας, για τον κίνδυνο πυρκαγιάς/έκρηξης προτείνεται στρατηγική fireproofing βασισμένη στον κίνδυνο, με ορισμό σεναρίων αναφοράς πυρκαγιάς και αξιοποίηση P&IDs, στοιχείων διάταξης και υφιστάμενων φραγμών προστασίας (Tugnoli, Cozzani, Di Padova & Tallone, 2012).

Για τις εργασίες θερμού σημείου (hot work), πρόσφατη ποσοτική ανάλυση κινδύνου με προσαρμοστικά bow-tie διαγράμματα και δίκτυα Petri επιβεβαιώνει ότι, παρά την ευρεία εφαρμογή προγραμμάτων άδειας εργασίας, τα ατυχήματα δεν έχουν εξαλειφθεί, ιδίως όταν εργασίες συγκόλλησης/κοπής αναφλέγουν εύφλεκτες ατμόσφαιρες (Li, Sun, Zhang & Zhang, 2024). Αντίστοιχα, ανάλυση βασικής αιτίας (root cause analysis) σε 160 αστικά ατυχήματα φυσικού αερίου στην Κίνα οδήγησε στην ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης ασφάλειας διεργασιών ειδικά προσαρμοσμένου σε υποδομές αστικού αερίου (Zhang, Liang, Xu κ.ά., 2023).

Σε ευρύτερο πλαίσιο, μελέτες πολυκριτηριακής αξιολόγησης βιωσιμότητας εναλλακτικών λύσεων ενεργειακής τροφοδοσίας υπεράκτιων εγκαταστάσεων (Noshchenko, Hagspiel & Deshpande, 2025) συμπληρώνουν το μεθοδολογικό οπλοστάσιο που είναι διαθέσιμο για την αξιολόγηση κινδύνου σε ενεργειακές υποδομές. Ωστόσο, οι εξωτερικοί κίνδυνοι φυσικής

προέλευσης που πυροδοτούν τεχνολογικά ατυχήματα (Natech), αν και τεκμηριώνονται επαρκώς σε γενικό επίπεδο (Antonioni, Spadoni & Cozzani, 2007· Krausmann, Cozzani, Salzano & Renni, 2011· Steinberg & Cruz, 2004), δεν φαίνεται να είναι ισχυρά ενσωματωμένοι στα κυρίαρχα σχέδια διαχείρισης κατασκευαστικού κινδύνου για σταθμούς φυσικού αερίου, γεγονός που συνιστά σαφές ερευνητικό κενό.

Εργαλείο Governance	Ενδεικτική Πηγή	Συνδεδεμένο Όφελος
Formal Risk Register / Owner Program	LNG Project Management, 2014	Συστηματική καταγραφή και παρακολούθηση κινδύνων από την ανάθεση
Stage-Gate Risk Control	Jang, Han & Park, 2015	Έγκαιρος εντοπισμός αποκλίσεων ανά φάση σχεδιασμού/εκτέλεσης
Contractor PSM / Supervision	Abdul Majid et al., 2015	Λιγότερα συμβάντα, καλύτερη τήρηση προτύπων ασφαλείας
Project Control Systems	Jawad, Ledwith & Panahifar, 2018	Έλεγχος απόκλισης προγραμματισμένου–πραγματικού
BIM-enabled Safety Tracking	Waqar, Nisar & Qadir, 2025	Πρώιμη αναγνώριση κινδύνων, μείωση ατυχημάτων
Real-time / Smart Site Monitoring	Xu et al., 2022	Βελτίωση επίδοσης HSE μέσω δεδομένων πραγματικού χρόνου

Πίνακας 7: Εργαλεία governance και συνδεδεμένα οφέλη σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία

2.8 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε τη σημαντική θέση των ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών φυσικού αερίου στο σύγχρονο ενεργειακό σύστημα, καθώς και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την κατασκευή και λειτουργία τους. Οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine – CCGT) αποτελούν σήμερα την κυρίαρχη τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο, λόγω της υψηλής ενεργειακής τους απόδοσης, της λειτουργικής ευελιξίας και της δυνατότητας υποστήριξης της αυξανόμενης διεξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα (IEA, 2023).

Ωστόσο, η τεχνολογική πολυπλοκότητα των εγκαταστάσεων αυτών δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις κατά τη φάση της κατασκευής και της θέσης σε λειτουργία, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή οργανωμένων διαδικασιών διαχείρισης κινδύνων.

Πέραν αυτού, η βιβλιογραφία κατέδειξε ότι η διαχείριση κινδύνων αποτελεί θεμελιώδη συνιστώσα της επιτυχούς υλοποίησης μεγάλων τεχνικών και ενεργειακών έργων. Τα διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα ISO 31000:2018 και PMBOK® Guide παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αναγνώριση, ανάλυση, αξιολόγηση και αντιμετώπιση των κινδύνων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός έργου (ISO, 2018· PMI, 2021). Η συστηματική εφαρμογή

των αρχών αυτών συμβάλλει στη μείωση της αβεβαιότητας και στη βελτίωση της λήψης αποφάσεων, ιδιαίτερα σε έργα υψηλής πολυπλοκότητας και μεγάλου επενδυτικού κόστους.

Επιπλέον, από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι ο κατασκευαστικός κίνδυνος σε σταθμούς φυσικού αερίου είναι πολυδιάστατος και δεν περιορίζεται στην εργοταξιακή ασφάλεια, αλλά εκτείνεται σε πέντε αλληλένδετες κατηγορίες: κινδύνους διακυβέρνησης/σύμβασης, αδειοδοτικούς/κανονιστικούς κινδύνους, κινδύνους προμηθειών, κινδύνους πεδίου (field safety) και τεχνικούς κινδύνους διεπαφών/commissioning (Sánchez-Colmenarejo et al., 2021· Shotts, Adduci & Keller, 2012· Wogrin, Galbally & Ramos, 2016· Jang, Han & Park, 2015).

Οι πλέον απαιτητικές τεχνικές αστοχίες συγκεντρώνονται στη διεπαφή GT–HRSG–ST, όπου η ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης προκαλεί θερμική καταπόνηση και κόπωση (Rúa & Nord, 2020· Benato et al., 2016), ενώ η αδειοδότηση λειτουργεί επανειλημμένα ως construction-critical παράγοντας καθυστέρησης, ιδίως λόγω περιβαλλοντικών αδειών εκπομπών (Shotts, Adduci & Keller, 2012· Shotts, Perry & McGlynn, 2014).

Οι κλασικές μέθοδοι αναγνώρισης κινδύνων (HAZID/HAZOP) και οι πρακτικές expert elicitation παραμένουν χρήσιμες αλλά αποδίδουν ισχυρότερα σε process/mechanical κινδύνους παρά σε civil/electrical/commissioning διεπαφές (Tanabe et al., 2017· Shirali et al., 2014), γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη συμπλήρωσής τους με ποσοτικές/ήμι-ποσοτικές τεχνικές ιεράρχησης (fuzzy/MCDM) και δυναμικά συστήματα παρακολούθησης μέσω KPI και μητρώων κινδύνου (Jang, Han & Park, 2015· Xu et al., 2022).

Τα πλέον τεκμηριωμένα μέτρα μετριασμού που αναδεικνύονται συστηματικά είναι το πρώιμο fatal-flaw permitting analysis, τα επίσημα μητρώα κινδύνων, ο έλεγχος τύπου stage-gate, ο αυστηρός έλεγχος εργολάβων, το permit-to-work και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (Shotts et al., 2012· LNG Project Management, 2014· Jang, Han & Park, 2015· Abdul Majid et al., 2015).

Παρότι η διεθνής βιβλιογραφία παρέχει σημαντική γνώση σχετικά με τη διαχείριση κινδύνων σε ενεργειακά έργα, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει ένα ενιαίο, πλήρως ενοποιημένο πλαίσιο που να καλύπτει ταυτόχρονα civil, mechanical, electrical και commissioning κινδύνους σε έργα CCGT/EPC (Sánchez-Colmenarejo et al., 2021· Shirali et al., 2014· Perez & Madewell, 2013), ενώ οι εξωτερικοί/Natech κίνδυνοι παραμένουν ασθενώς ενσωματωμένοι στα

mainstream σχέδια διαχείρισης κινδύνου κατασκευής (Antonioni et al., 2007· Krausmann et al., 2011).

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού, εστιάζοντας στην ανάπτυξη ενός υβριδικού, ενοποιημένου πλαισίου που συνδυάζει Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS), HAZID/HAZOP, expert elicitation, ποιοτική αξιολόγηση μέσω Risk Matrix, δυναμικό Μητρώο Κινδύνων και stage-gate governance, όπως αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Συνοψίζοντας, η βιβλιογραφική ανασκόπηση επιβεβαιώνει ότι η επιτυχής ολοκλήρωση έργων κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών φυσικού αερίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του έργου, από την αδειοδότηση έως το commissioning. Η ανάγκη για συστηματική προσέγγιση, συνεχόμενη παρακολούθηση και έγκαιρη λήψη διορθωτικών μέτρων αναδεικνύεται ως βασική προϋπόθεση για τη διασφάλιση της ασφάλειας, της ποιότητας, της τήρησης του χρονοδιαγράμματος και του ελέγχου του κόστους. Τα συμπεράσματα αυτά αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

3. Μεθοδολογία Διαχείρισης Κινδύνων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που αναπτύσσεται και εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία για την αναγνώριση, ανάλυση, αξιολόγηση και αντιμετώπιση των κινδύνων κατά τη φάση κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών φυσικού αερίου. Η μεθοδολογία βασίζεται στη σύνθεση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του Κεφαλαίου 2 και διαμορφώνει ένα υβριδικό, πρακτικά εφαρμόσιμο πλαίσιο, το οποίο συνδυάζει δομημένες τεχνικές αναγνώρισης κινδύνων, ποιοτική και ημι-ποσοτική αξιολόγηση, ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων και μηχανισμού governance.

Η παρούσα εργασία αποτελεί βιβλιογραφική και μεθοδολογική μελέτη με ενδεικτική εφαρμογή σε υποθετικό έργο, και όχι εμπειρική μελέτη περίπτωσης πραγματικού έργου ή πρωτογενή έρευνα με συλλογή δεδομένων από επαγγελματίες.

3.1 Ερευνητική Προσέγγιση και Σχεδιασμός Μεθοδολογίας

Η παρούσα έρευνα ακολουθεί μία ποιοτική, περιγραφική και εφαρμοσμένη ερευνητική προσέγγιση, η οποία στηρίζεται σε δύο άξονες: αφενός στη συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με τη διαχείριση κινδύνων σε ενεργειακά κατασκευαστικά έργα, και αφετέρου στην ανάπτυξη και εφαρμογή ενός δομημένου πλαισίου αξιολόγησης κινδύνων σε ενδεικτική, αντιπροσωπευτική μελέτη περίπτωσης σταθμού συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (Κεφάλαιο 4).

Η μελέτη περίπτωσης δεν αφορά συγκεκριμένο, πραγματικό έργο με εμπιστευτικά δεδομένα, αλλά έναν αντιπροσωπευτικό, ρεαλιστικό σχεδιασμό έργου CCGT, κατασκευασμένο ώστε να αντικατοπτρίζει τα τυπικά τεχνικά και οργανωτικά χαρακτηριστικά τέτοιων έργων, όπως αυτά προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία και την τεχνική εμπειρία του κλάδου.

Η επιλογή αυτής της προσέγγισης δικαιολογείται από τον σκοπό της εργασίας, ο οποίος δεν είναι η στατιστική γενίκευση ευρημάτων αλλά η ανάπτυξη ενός εφαρμόσιμου, μεταφέρσιμου εργαλείου διαχείρισης κινδύνου που μπορεί να προσαρμοστεί σε πραγματικά έργα από μηχανικούς και διαχειριστές έργων. Η λογική αυτή είναι συνεπής με το μεθοδολογικό κενό που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου σημειώνεται η απουσία ενός πλήρως ενοποιημένου πλαισίου που να γεφυρώνει τεχνικό κίνδυνο, εργοταξιακή ασφάλεια και έλεγχο έργου (βλ. ενότητα 2.8).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διαρθρώνεται σε οκτώ διαδοχικά αλλά και αλληλεπιδρώντα στάδια: (1) ορισμό πεδίου και στόχων ανάλυσης κινδύνου, (2) ανάπτυξη Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure – RBS), (3) αναγνώριση κινδύνων μέσω HAZID/HAZOP, επισκόπησης τεχνικών εγγράφων και expert elicitation, (4) ποιοτική αξιολόγηση μέσω πίνακα επικινδυνότητας (Risk Matrix) με προαιρετική ενίσχυση μέσω fuzzy/MCDM τεχνικών, (5) ανάπτυξη και τεκμηρίωση Μητρώου Κινδύνων (Risk Register), (6) σχεδιασμό στρατηγικών αντιμετώπισης και μετριασμού, (7) ενσωμάτωση σε μηχανισμό ελέγχου σταδίων (stage-gate governance), και (8) συνεχή παρακολούθηση μέσω δεικτών απόδοσης (KPIs). Το σχήμα που ακολουθεί συνοψίζει το προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο.



Υβριδικό Μοντέλο Αναγνώρισης και Αξιολόγησης Κατασκευαστικού Κινδύνου

Σχήμα 7: Υβριδικό μεθοδολογικό πλαίσιο αναγνώρισης, αξιολόγησης και παρακολούθησης κατασκευαστικού κινδύνου.

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι το προτεινόμενο πλαίσιο δεν υποκαθιστά αλλά συμπληρώνει τα διεθνή πρότυπα ISO 31000:2018 και PMBOK® Guide, λειτουργώντας ως εξειδικευμένη προσαρμογή τους στις ιδιαιτερότητες της κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου, με έμφαση στη γεφύρωση project-management και τεχνικού κινδύνου, όπως αυτή προκύπτει ως ανάγκη από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (ISO, 2018· PMI, 2021).

3.2 Ανάπτυξη Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure)

Το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας αφορά την ανάπτυξη μιας Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure – RBS), η οποία οργανώνει ιεραρχικά τις πηγές κινδύνου σε πέντε βασικές κατηγορίες, όπως αυτές προκύπτουν από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας (βλ. ενότητα 2.8): (1) κινδύνους διακυβέρνησης/σύμβασης έργου, (2) αδειοδοτικούς/κανονιστικούς κινδύνους, (3) κινδύνους προμηθειών, (4) κινδύνους ασφάλειας πεδίου (field safety) και (5) τεχνικούς κινδύνους διεπαφών και commissioning.



Σχήμα 8: Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS) για την κατασκευή σταθμών φυσικού αερίου.

Κατηγορία RBS	Περιγραφή	Ενδεικτικά Στοιχεία
1. Project / Governance	Κίνδυνοι που σχετίζονται με τη διακυβέρνηση, τη σύμβαση και τον συντονισμό του έργου	Ασθενής εποπτεία εργολάβων, ανεπαρκή project controls, ασαφείς όροι σύμβασης
2. Permitting / Regulatory	Κίνδυνοι αδειοδότησης και κανονιστικής συμμόρφωσης	Air permits, περιβαλλοντικές εγκρίσεις, συντονισμός με αρχές
3. Procurement / Supply	Κίνδυνοι εφοδιαστικής αλυσίδας και προμηθειών	Ελλείψεις υλικών, καθυστερήσεις παράδοσης, ποιοτικά προβλήματα προμηθευτή
4. Field Safety	Κίνδυνοι υγείας και ασφάλειας στο εργοτάξιο	Πυρκαγιά/έκρηξη, θραύση ατμοσωλήνων, εργασία σε περιορισμένους χώρους
5. Technical Interface / Commissioning	Τεχνικοί κίνδυνοι στις διεπαφές εξοπλισμού και στη θέση σε λειτουργία	Ασυμμετρία GT-HRSG-ST, θερμική καταπόνηση, sequencing εκκίνησης

Πίνακας 8: Περιγραφή των πέντε κατηγοριών της Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (RBS)

Η χρήση της RBS εξυπηρετεί δύο βασικούς στόχους: πρώτον, διασφαλίζει ότι η διαδικασία αναγνώρισης κινδύνων που ακολουθεί δεν περιορίζεται μόνο σε τεχνικούς ή μόνο σε διοικητικούς κινδύνους, αλλά καλύπτει συστηματικά όλο το φάσμα του κατασκευαστικού κινδύνου· δεύτερον, παρέχει ένα κοινό ταξινομικό σχήμα που διευκολύνει τη σύγκριση, την ομαδοποίηση και την ιεράρχηση κινδύνων στο Μητρώο Κινδύνων που αναπτύσσεται στην ενότητα 3.5.

3.3 Αναγνώριση Κινδύνων: HAZID/HAZOP, Επισκόπηση Εγγράφων και Expert Elicitation

Η αναγνώριση κινδύνων αποτελεί το κρίσιμοτερο στάδιο της διαδικασίας, καθώς κίνδυνοι που δεν αναγνωρίζονται δεν μπορούν να αξιολογηθούν ούτε να αντιμετωπιστούν. Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδυάζει τρεις συμπληρωματικές τεχνικές αναγνώρισης, ακολουθώντας το

πρότυπο που αναδεικνύεται ως πλέον αποτελεσματικό στη διεθνή βιβλιογραφία (Dunjó et al., 2010· Perez & Madewell, 2013· Shirali et al., 2014).

3.3.1 HAZID / HAZOP Workshops

Οργανώνονται δομημένες συνεδρίες HAZID (Hazard Identification) και HAZOP (Hazard and Operability Study) με τη συμμετοχή διεπιστημονικής ομάδας που περιλαμβάνει μηχανικούς κατασκευής, μηχανικούς HSE, project managers, εκπροσώπους commissioning και, όπου είναι εφικτό, εκπροσώπους βασικών προμηθευτών εξοπλισμού (π.χ. HRSG, αεριοστροβίλου). Η ανάλυση οργανώνεται ανά κόμβο (node) του έργου —π.χ. χώρος αεριοστροβίλου, χώρος HRSG, δίκτυο σωληνώσεων υψηλής πίεσης— και εφαρμόζονται συστηματικές λέξεις-οδηγοί (guide words) όπως «Καθόλου», «Περισσότερο», «Λιγότερο», «Αντίστροφα» και «Εκτός Από» για τον εντοπισμό αποκλίσεων από τις συνθήκες σχεδιασμού.

Guide Word	Ερμηνεία	Ενδεικτική Εφαρμογή σε Κατασκευή CCGT
Καθόλου / No	Πλήρης απουσία λειτουργίας ή παροχής	Απουσία παροχής ψυκτικού νερού κατά τη δοκιμή HRSG
Περισσότερο / More	Υπέρβαση παραμέτρου σχεδιασμού	Υπερβολική πίεση κατά την υδραυλική δοκιμή σωληνώσεων
Λιγότερο / Less	Ανεπαρκής τιμή παραμέτρου	Ανεπαρκής παροχή αερίου κατά την εκκίνηση αεριοστροβίλου
Αντίστροφα / Reverse	Αντίστροφη ροή ή λειτουργία	Αντίστροφη ροή καυσαερίων στο σύστημα εξαγωγής
Εκτός Από / Other Than	Απόκλιση διαφορετικής φύσης	Λανθασμένη σειρά εργασιών κατά το pre-commissioning

Πίνακας 9: Ενδεικτική εφαρμογή λέξεων-οδηγών HAZOP σε φάση κατασκευής CCGT

3.3.2 Επισκόπηση Τεχνικών Εγγράφων (Document Review)

Παράλληλα με τα εργαστήρια HAZID/HAZOP, πραγματοποιείται συστηματική επισκόπηση τεχνικών εγγράφων του έργου, όπως P&IDs, σχέδια διάταξης (layout drawings), προδιαγραφές εξοπλισμού, σχέδια σύμβασης και προγράμματα κατασκευής, με χρήση checklists και τεχνικών «cold-eyes review» (Perez & Madewell, 2013). Η επισκόπηση αυτή στοχεύει στον εντοπισμό κινδύνων που δεν προκύπτουν εύκολα μέσω συζήτησης, όπως ασάφειες σε συμβατικούς όρους, ελλείψεις σε προδιαγραφές interface μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών προμηθευτών, ή μη ρεαλιστικές παραδοχές χρονοδιαγράμματος.

3.3.3 Expert Elicitation και Brainstorming

Η τρίτη τεχνική αφορά δομημένες συνεντεύξεις και συνεδρίες brainstorming με έμπειρους μηχανικούς και στελέχη έργου, με στόχο την ανάδειξη κινδύνων που προκύπτουν από την πρακτική εμπειρία πεδίου και δεν καταγράφονται πάντα σε τυπικά έγγραφα, όπως ζητήματα

συντονισμού μεταξύ εργολάβων ή επαναλαμβανόμενα προβλήματα ποιότητας συγκεκριμένων προμηθευτών (Shirali et al., 2014· Gul, 2018). Για τη μείωση της υποκειμενικότητας, προτείνεται η συμμετοχή τουλάχιστον πέντε έως επτά ειδικών με διαφορετική εξειδίκευση (μηχανική, HSE, προμήθειες, νομικά/συμβάσεις), καθώς και η καταγραφή του βαθμού συμφωνίας μεταξύ τους για κάθε αναγνωρισμένο κίνδυνο.

Το αποτέλεσμα του σταδίου αναγνώρισης είναι ένας αρχικός κατάλογος κινδύνων (risk log), ταξινομημένος σύμφωνα με τις πέντε κατηγορίες της RBS, ο οποίος τροφοδοτεί το επόμενο στάδιο της ποιοτικής και ποσοτικής αξιολόγησης.

3.4 Ποιοτική και Ημι-ποσοτική Αξιολόγηση: Risk Matrix και Fuzzy/MCDM Ιεράρχηση

Μετά την αναγνώριση, κάθε κίνδυνος αξιολογείται ως προς δύο διαστάσεις: την πιθανότητα εμφάνισής του (likelihood) και τη σοβαρότητα των συνεπειών του (severity/impact), σύμφωνα με την καθιερωμένη προσέγγιση του πίνακα επικινδυνότητας (Risk Matrix), όπως προτείνεται από τα πρότυπα ISO 31000 και IEC 31010 (ISO, 2018· IEC, 2019).

Βαθμίδα	Περιγραφή Πιθανότητας	Ενδεικτική Συχνότητα
1 – Απίθανη	Ελάχιστη πιθανότητα εμφάνισης	Λιγότερο από 1 φορά ανά έργο
2 – Σπάνια	Χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης	1 φορά ανά έργο
3 – Πιθανή	Μέτρια πιθανότητα εμφάνισης	1–2 φορές ανά φάση έργου
4 – Συχνή	Υψηλή πιθανότητα εμφάνισης	Επανελημμένα εντός φάσης
5 – Σχεδόν Βέβαιη	Αναμενόμενη εμφάνιση υπό κανονικές συνθήκες	Σχεδόν σε κάθε αντίστοιχη δραστηριότητα

Πίνακας 10: Κλίμακα πιθανότητας εμφάνισης κινδύνου

Βαθμίδα	Περιγραφή Σοβαρότητας	Ενδεικτικές Συνέπειες
1 – Αμελητέα	Ελάχιστη επίπτωση	Χωρίς επίδραση σε χρόνο, κόστος ή ασφάλεια
2 – Μικρή	Περιορισμένη επίπτωση	Μικρή καθυστέρηση, χωρίς τραυματισμό
3 – Μέτρια	Αισθητή επίπτωση	Καθυστέρηση εβδομάδων, ελαφρύς τραυματισμός
4 – Σοβαρή	Σημαντική επίπτωση	Καθυστέρηση μηνών, σοβαρός τραυματισμός
5 – Καταστροφική	Κρίσιμη επίπτωση	Απώλεια ζωής, ολική διακοπή έργου, μεγάλη υπέρβαση κόστους

Πίνακας 11: Κλίμακα σοβαρότητας συνεπειών κινδύνου

Ο δείκτης κινδύνου (Risk Score) υπολογίζεται ως το γινόμενο Πιθανότητας $\times$ Σοβαρότητας, με τιμές από 1 έως 25, και κατατάσσεται σε τέσσερα επίπεδα προτεραιότητας: χαμηλός (1–4), μεσαίος (5–9), υψηλός (10–15) και κρίσιμος (16–25) κίνδυνος. Η κατάταξη αυτή καθορίζει την προτεραιότητα διαχείρισης, τη συχνότητα επανεξέτασης και το επίπεδο διοίκησης που πρέπει να ενημερώνεται για κάθε κίνδυνο.

Πίνακας Αξιολόγησης Κινδύνου (Risk Matrix)
Βαθμολογία Κινδύνου = Πιθανότητα $\times$ Σοβαρότητα

5	5	10	15	20	25
4	4	8	12	16	20
3	3	6	9	12	15
2	2	4	6	8	10
1	1	2	3	4	5
	1	2	3	4	5

Σοβαρότητα Συνεπειών (1=Αμελητέα ... 5=Καταστροφική)

Σχήμα 9: Πίνακας αξιολόγησης κινδύνου (Risk Matrix) 5 $\times$ 5 με βαθμολογηση Πιθανότητα $\times$ Σοβαρότητα.

Σε περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ανεπαρκή ή η κρίση των ειδικών δίσταται σημαντικά, προτείνεται η συμπληρωματική χρήση τεχνικών fuzzy logic και πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (MCDM), όπως AHP ή VIKOR, για την ιεράρχηση κινδύνων με παρόμοιο δείκτη κινδύνου (İlibahar et al., 2018· Karaşan et al., 2018· Gul, 2018).

Η χρήση fuzzy αριθμών αντί για διακριτές βαθμολογίες επιτρέπει την καλύτερη αποτύπωση της αβεβαιότητας που συνοδεύει την υποκειμενική κρίση των ειδικών, ιδίως για κινδύνους χαμηλής συχνότητας αλλά υψηλής αβεβαιότητας εκτίμησης, όπως πολλοί από τους τεχνικούς κινδύνους διεπαφών που αναλύθηκαν στην ενότητα 2.6. Η εφαρμογή αυτών των τεχνικών στην παρούσα εργασία περιορίζεται σε επεξηγηματικό επίπεδο και δεν αποτελεί πλήρη ποσοτική μοντελοποίηση, καθώς κάτι τέτοιο θα ξεπερνούσε το πεδίο μιας διπλωματικής εργασίας.

3.5 Ανάπτυξη και Δομή Μητρώου Κινδύνων (Risk Register)

Το Μητρώο Κινδύνων (Risk Register) αποτελεί το κεντρικό εργαλείο τεκμηρίωσης και παρακολούθησης της παρούσας μεθοδολογίας, συγκεντρώνοντας σε ενιαία δομή όλα τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων. Ακολουθεί τις κατευθύνσεις του ISO 31000 και τις πρακτικές που καταγράφονται σε έργα LNG/φυσικού αερίου (LNG Project Management, 2014· Jang, Han & Park, 2015), προσαρμοσμένες στις ανάγκες κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου.

Πεδίο Μητρώου	Περιγραφή
ID Κινδύνου	Μοναδικός κωδικός αναγνώρισης (π.χ. R-01)
Κατηγορία RBS	Μία από τις πέντε κατηγορίες της Δομής Ανάλυσης Κινδύνου
Περιγραφή Κινδύνου	Συνοπτική περιγραφή γεγονότος και αιτίας
Πιθανότητα (1–5)	Βαθμολόγηση σύμφωνα με την κλίμακα πιθανότητας
Σοβαρότητα (1–5)	Βαθμολόγηση σύμφωνα με την κλίμακα σοβαρότητας
Δείκτης Κινδύνου	Γινόμενο Πιθανότητας × Σοβαρότητας και επίπεδο προτεραιότητας
Υφιστάμενοι Έλεγχοι	Μέτρα που ήδη εφαρμόζονται
Πρόσθετα Μέτρα Μετριασμού	Προτεινόμενες πρόσθετες ενέργειες
Υπεύθυνος (Risk Owner)	Ρόλος/θέση υπεύθυνη για την παρακολούθηση
Υπολειπόμενος Κίνδυνος	Εκτίμηση κινδύνου μετά την εφαρμογή μέτρων
Κατάσταση & Ημερομηνία Επανεξέτασης	Παρακολούθηση προόδου και επόμενη επανεξέταση

Πίνακας 12: Δομή πεδίων του προτεινόμενου Μητρώου Κινδύνων (Risk Register)

Το Μητρώο Κινδύνων δεν αποτελεί στατικό έγγραφο, αλλά «ζωντανό» εργαλείο που επικαιροποιείται σε κάθε στάδιο ελέγχου (stage-gate) του έργου, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.7, ώστε να αντικατοπτρίζει την εξέλιξη της κατασκευής και τυχόν νέους κινδύνους που προκύπτουν.

3.6 Στρατηγικές Αντιμετώπισης και Μετριασμού Κινδύνων

Για κάθε αναγνωρισμένο κίνδυνο, η μεθοδολογία προβλέπει την επιλογή μίας από τις τέσσερις βασικές στρατηγικές αντιμετώπισης αρνητικών κινδύνων που περιγράφει το PMBOK® Guide: αποφυγή (avoid), μεταφορά (transfer), μετριασμό (mitigate) ή αποδοχή (accept) του κινδύνου (PMI, 2021). Οι στρατηγικές αυτές είναι συμβατές με τις επιλογές αντιμετώπισης κινδύνου του ISO 31000, το οποίο περιγράφει αναλυτικότερα φάσμα επιλογών, όπως την αποφυγή της δραστηριότητας, την απομάκρυνση της πηγής κινδύνου, τη μεταβολή της πιθανότητας ή των συνεπειών, τον επιμερισμό και τη διατήρηση του κινδύνου (ISO, 2018). Η επιλογή εξαρτάται

από τον δείκτη κινδύνου, το κόστος εφαρμογής των μέτρων και τη διαθεσιμότητα εναλλακτικών λύσεων.

Από τη σύνθεση της βιβλιογραφίας (ενότητες 2.7 και 2.8) προκύπτουν τα πλέον τεκμηριωμένα μέτρα μετριασμού ανά κατηγορία κινδύνου, τα οποία υιοθετούνται ως βάση για τη μελέτη περίπτωσης του Κεφαλαίου 4.

Κατηγορία RBS	Προτεινόμενα Μέτρα Μετριασμού
Project / Governance	Formal risk register, stage-gate governance, αυστηρή διαχείριση συμβάσεων, τακτικά audits εργολάβων
Permitting / Regulatory	Πρώιμο fatal-flaw permitting analysis, συνεχής συντονισμός με αδειοδοτούσες αρχές
Procurement / Supply	Έγκαιρη παραγγελία long-lead εξοπλισμού, διπλός προμηθευτής όπου είναι εφικτό, ποιοτικός έλεγχος προμηθευτή
Field Safety	Permit-to-work, job hazard analysis, hot-work isolation, τακτικές επιθεωρήσεις πεδίου
Technical Interface / Commissioning	Project-specific performance testing, σταδιακό πρόγραμμα δοκιμών, στενή παρακολούθηση θερμικής καταπόνησης

Πίνακας 13: Προτεινόμενα μέτρα μετριασμού ανά κατηγορία κινδύνου (RBS)

3.7 Governance, Έλεγχος Σταδίων (Stage-Gate) και Παρακολούθηση KPI

Η ενσωμάτωση της διαχείρισης κινδύνου στη διακυβέρνηση του έργου πραγματοποιείται μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου σταδίων (stage-gate), ο οποίος προβλέπει συστηματική επανεξέταση του Μητρώου Κινδύνων σε πέντε κρίσιμα σημεία του έργου: κατά την ολοκλήρωση της μελέτης σκοπιμότητας (Gate 0), κατά την ολοκλήρωση σχεδιασμού και αδειοδότησης (Gate 1), κατά την έναρξη προμηθειών και κινητοποίησης εργοταξίου (Gate 2), κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής εκτέλεσης (Gate 3), και κατά το commissioning και την παράδοση του έργου (Gate 4), σύμφωνα με την προσέγγιση stage-gate risk control που προτείνεται στη βιβλιογραφία (Jang, Han & Park, 2015).



Σχήμα 10: Μηχανισμός ελέγχου σταδίων (stage-gate) με επανεξέταση Μητρώου Κινδύνων σε κάθε πύλη.

Σε κάθε πύλη ελέγχου, πραγματοποιείται επανεξέταση της κατάστασης κάθε κινδύνου, αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων μέτρων και, όπου απαιτείται,

αναθεώρηση της βαθμολόγησης πιθανότητας/σοβαρότητας. Παράλληλα, η πρόοδος παρακολουθείται μέσω συγκεκριμένων δεικτών απόδοσης (KPIs), οι οποίοι επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων πριν αυτές μετατραπούν σε σοβαρά προβλήματα (Xu et al., 2022· Waqar, Nisar & Qadir, 2025).

Δείκτης (KPI)	Περιγραφή	Συχνότητα Παρακολούθησης
Schedule Variance (SV)	Απόκλιση πραγματικής από προγραμματισμένη πρόοδο έργου	Εβδομαδιαία
Cost Variance (CV)	Απόκλιση πραγματικού από προϋπολογισμένο κόστος	Μηνιαία
TRIR (Total Recordable Incident Rate)	Δείκτης καταγεγραμμένων συμβάντων ασφαλείας	Μηνιαία
Ανοιχτές Διορθωτικές Ενέργειες	Αριθμός εκκρεμών ενεργειών από επιθεωρήσεις/audits	Εβδομαδιαία
% Rework	Ποσοστό εργασιών που απαιτούν επανάληψη λόγω ποιοτικών αποκλίσεων	Μηνιαία
Αριθμός Ενεργών Κρίσιμων Κινδύνων	Πλήθος κινδύνων με Risk Score ≥ 16 στο Μητρώο	Ανά πύλη ελέγχου

Πίνακας 14: Ενδεικτικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) για την παρακολούθηση κατασκευαστικού κινδύνου

3.8 Περιορισμοί της Μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, παρότι βασίζεται σε ευρέως τεκμηριωμένες πρακτικές, παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Πρώτον, η βιβλιογραφία στην οποία στηρίζεται καλύπτει ισχυρότερα κινδύνους διεργασίας και μηχανολογικού εξοπλισμού (process/mechanical) παρά κινδύνους πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και διεπαφών κατασκευής-commissioning (Tanabe et al., 2017· Perez & Madewell, 2013), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μερική υποεκτίμηση κινδύνων εκτός του στενού πεδίου process safety.

Δεύτερον, δεν υπάρχουν επαρκή δημοσιευμένα ποσοτικά benchmarks —όπως τυπικά ποσοστά καθυστέρησης χρονοδιαγράμματος, επίπεδα απόθεματος ασφαλείας (contingency) ή εύρη υπέρβασης κόστους— ειδικά προσαρμοσμένα σε έργα κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα πλήρους ποσοτικής επαλήθευσης της βαθμολόγησης κινδύνων (Habibi & Kermanshachi, 2018· Derakhshanfar et al., 2019).

Τρίτον, οι τεχνικές fuzzy/MCDM που αναφέρονται στη βιβλιογραφία εφαρμόζονται κυρίως σε πλαίσιο ιεράρχησης κινδύνων υγείας και ασφάλειας εργοταξίου και όχι ως πλήρως ενοποιημένα συστήματα διαχείρισης κινδύνου σε επίπεδο ολόκληρου έργου EPC, γεγονός που

περιορίζει την άμεση μεταφορά τους στο παρόν πλαίσιο χωρίς περαιτέρω προσαρμογή (Gul, 2018· Karaşan et al., 2018).

Τέταρτον, το προτεινόμενο πλαίσιο δεν ενσωματώνει σε βάθος εξωτερικούς κινδύνους φυσικής προέλευσης που μπορούν να πυροδοτήσουν τεχνολογικά ατυχήματα (Natech), όπως σεισμούς ή ακραία καιρικά φαινόμενα, καθώς η σχετική βιβλιογραφία παραμένει αποσπασματική ως προς την ενσωμάτωσή τους σε σχέδια κατασκευαστικού κινδύνου σταθμών φυσικού αερίου (Antonioni et al., 2007· Krausmann et al., 2011· Steinberg & Cruz, 2004). Τέλος, η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε ενδεικτική και όχι σε πραγματική μελέτη περίπτωσης (Κεφάλαιο 4) περιορίζει τη δυνατότητα άμεσης επαλήθευσης των αποτελεσμάτων έναντι πραγματικών δεδομένων έργου, ζήτημα που συζητείται περαιτέρω στους περιορισμούς της έρευνας (ενότητα 5.4).

4. Μελέτη Περίπτωσης

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3 σε μία ενδεικτική, αντιπροσωπευτική μελέτη περίπτωσης κατασκευής σταθμού ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1, το έργο που περιγράφεται δεν αποτελεί πραγματικό, υπαρκτό έργο με εμπιστευτικά δεδομένα, αλλά έναν ρεαλιστικό συνδυασμό τυπικών τεχνικών, οργανωτικών και χρονικών χαρακτηριστικών, όπως αυτά προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία και την τεχνική πρακτική του κλάδου (Sánchez-Colmenarejo et al., 2021, 2022· Zohrehvandi & Tenera, 2019). Σκοπός της μελέτης περίπτωσης είναι να παρουσιάσει και να διερευνήσει ενδεικτικά την εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου, αναδεικνύοντας τους πλέον κρίσιμους κινδύνους που αναμένεται να αντιμετωπίσει ένα τέτοιο έργο.

4.1 Περιγραφή του Ενδεικτικού Έργου

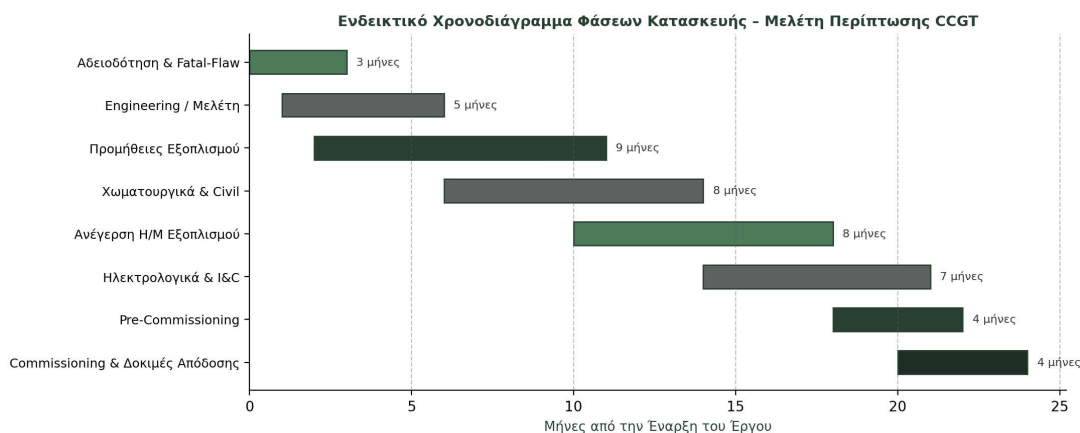
Το ενδεικτικό έργο αφορά την κατασκευή σταθμού ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου (CCGT) διάταξης 2×1 (δύο αεριοστρόβιλοι και ένας ατμοστρόβιλος), ονομαστικής ισχύος περίπου 450 MW, ο οποίος κατασκευάζεται με σύμβαση τύπου EPC (Engineering, Procurement, Construction) σε βιομηχανική παράκτια περιοχή, με πρόσβαση σε δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου και ηλεκτρικό υποσταθμό διασύνδεσης. Η προγραμματισμένη συνολική διάρκεια κατασκευής ανέρχεται σε 24 μήνες, από την υπογραφή της σύμβασης EPC έως την εμπορική λειτουργία (Commercial Operation Date – COD).

Χαρακτηριστικό Έργου	Τιμή / Περιγραφή
Τύπος Μονάδας	Combined Cycle Gas Turbine (CCGT), διάταξη 2×1
Ονομαστική Ισχύς	≈450 MW
Τύπος Σύμβασης	EPC (Engineering, Procurement, Construction)
Θέση Εγκατάστασης	Παράκτια βιομηχανική περιοχή, πρόσβαση σε δίκτυο φυσικού αερίου
Διάρκεια Κατασκευής	24 μήνες (από υπογραφή σύμβασης έως COD)
Βασικός Εξοπλισμός	2 αεριοστρόβιλοι, 2 HRSG, 1 ατμοστρόβιλος, ηλεκτρικός υποσταθμός
Βασικοί Εμπλεκόμενοι	Κύριος του έργου, EPC ανάδοχος, προμηθευτές κύριου εξοπλισμού, υπεργολάβοι

Πίνακας 15: Βασικά χαρακτηριστικά του ενδεικτικού έργου μελέτης περίπτωσης

Το ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα του έργου, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, περιλαμβάνει τις φάσεις της αδειοδότησης, της μελέτης (engineering), των προμηθειών κρίσιμου εξοπλισμού, των χωματουργικών και έργων πολιτικού μηχανικού, της ανέγερσης

ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, των ηλεκτρολογικών και συστημάτων ελέγχου (I&C), του pre-commissioning και, τέλος, του commissioning και των δοκιμών απόδοσης.



Σχήμα 11: Ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα φάσεων κατασκευής της μελέτης περίπτωσης CCGT.

Παρατηρείται ότι οι προμήθειες κρίσιμου εξοπλισμού (ιδίως HRSG και αεριοστροβίλων, στοιχεία με μακρύ χρόνο παράδοσης – long lead items) και η ανέγερση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού αποτελούν τις μεγαλύτερης διάρκειας δραστηριότητες, ενώ το commissioning και οι δοκιμές απόδοσης, αν και σχετικά σύντομης διάρκειας, συγκεντρώνουν δυσανάλογα υψηλό κίνδυνο, όπως αναλύεται στις επόμενες ενότητες.

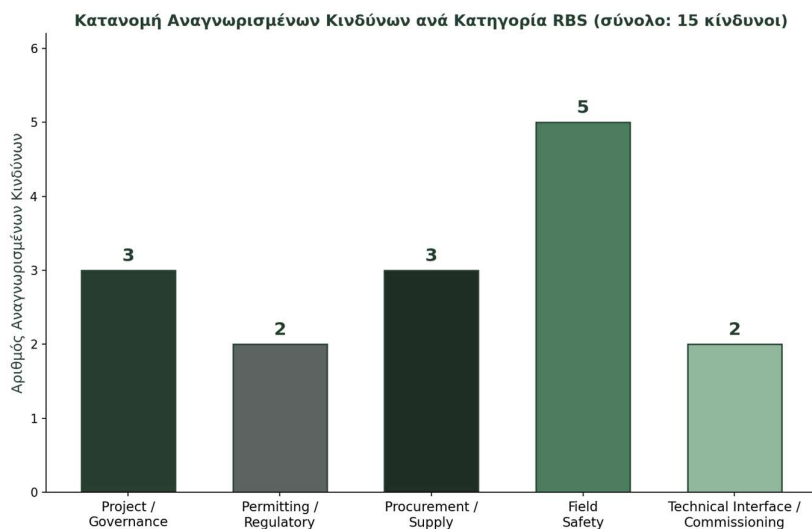
4.2 Εφαρμογή της Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (RBS) στο Έργο

Η Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS) που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.2 εφαρμόζεται στο ενδεικτικό έργο, προσαρμοσμένη στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του: τη διάταξη 2×1, την παράκτια τοποθεσία, τη σύμβαση τύπου EPC και τη διάρκεια κατασκευής 24 μηνών.

Για κάθε μία από τις πέντε κατηγορίες της RBS εντοπίζονται οι βασικές πηγές κινδύνου που αναμένεται να είναι ενεργές στο συγκεκριμένο πλαίσιο, οι οποίες αποτελούν και τη βάση για τα εργαστήρια αναγνώρισης κινδύνων της ενότητας 4.3: στην κατηγορία Project/Governance, ο συντονισμός μεταξύ του EPC αναδόχου και των υπεργολάβων Η/Μ και πολιτικού μηχανικού· στην κατηγορία Permitting/Regulatory, η έγκριση περιβαλλοντικών όρων λόγω της παράκτιας θέσης· στην κατηγορία Procurement/Supply, ο κίνδυνος καθυστέρησης στα long-lead items· στην κατηγορία Field Safety, οι εργασίες υψηλής πίεσης και τα ύψη κατά την ανέγερση HRSG· και στην κατηγορία Technical Interface/Commissioning, η ασυμμετρία απόκρισης GT–HRSG–ST κατά τις πρώτες δοκιμές συγχρονισμού.

4.3 Αναγνώριση Κινδύνων μέσω HAZID/HAZOP και Expert Elicitation

Στο πλαίσιο της ενδεικτικής εφαρμογής διαμορφώθηκε προσομοίωση μιας δομημένης διαδικασίας HAZID/HAZOP και expert elicitation, με βάση τις αρχές και τις ενδεικτικές ερωτήσεις που παρουσιάζονται στην ενότητα 3.3. Οι δεκαπέντε (15) κίνδυνοι που προέκυψαν αποτελούν συνθετική επιλογή, βασισμένη στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, στα χαρακτηριστικά του υποθετικού έργου και στην τεχνική πρακτική του κλάδου, και δεν αποτελούν ευρήματα πραγματικού workshop ή πραγματικής ομάδας εμπειρογνομόνων.



Σχήμα 12: Κατανομή αναγνωρισμένων κινδύνων ανά κατηγορία RBS – μελέτη περίπτωσης.

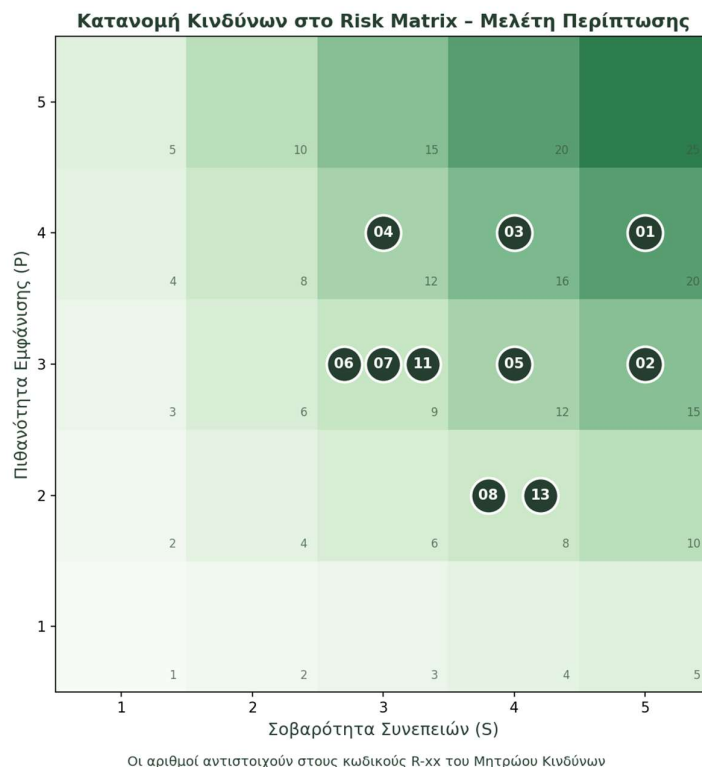
Όπως προκύπτει από την κατανομή, οι κίνδυνοι ασφάλειας εργοταξίου (Field Safety) συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο πλήθος αναγνωρισμένων κινδύνων (5), ακολουθούμενοι από τους κινδύνους προμηθειών (Procurement/Supply) και διακυβέρνησης (Project/Governance) με τρεις κινδύνους έκαστη, ενώ οι τεχνικοί κίνδυνοι διεπαφών/commissioning και οι αδειοδοτικοί κίνδυνοι είναι λιγότεροι σε πλήθος (δύο έκαστη). Ωστόσο, όπως αναλύεται στην ενότητα 4.4, το πλήθος των κινδύνων ανά κατηγορία δεν ταυτίζεται με τη βαρύτητά τους: ο κρίσιμότερος κίνδυνος του έργου (R-01) ανήκει στην κατηγορία Technical Interface και ο δεύτερος σε βαθμολογία (R-03) στην κατηγορία Permitting. Το εύρημα αυτό είναι συνεπές με τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης (ενότητες 2.6 και 2.8), όπου η διεπαφή GT–HRSG–ST και η φάση commissioning αναδεικνύονται συστηματικά ως οι πλέον απαιτητικές περιοχές τεχνικού κινδύνου σε έργα CCGT, ενώ η αδειοδότηση λειτουργεί ως construction-critical παράγοντας.

4.4 Ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων και Αξιολόγηση με Risk Matrix

Οι δεκαπέντε αναγνωρισμένοι κίνδυνοι καταγράφηκαν στο Μητρώο Κινδύνων του έργου, σύμφωνα με τη δομή πεδίων που περιγράφηκε στην ενότητα 3.5, και αξιολογήθηκαν ποιοτικά ως προς την πιθανότητα εμφάνισης και τη σοβαρότητα των συνεπειών τους, με χρήση της κλίμακας 1–5 του Risk Matrix (ενότητα 3.4). Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει συνοπτική εκδοχή του Μητρώου Κινδύνων, με τους δέκα κινδύνους με την υψηλότερη βαθμολογία (Risk Score)· το πλήρες Μητρώο Κινδύνων παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

ID	Κίνδυνος	Κατηγορία RBS	P	S	Score	Επίπεδο
R-01	Ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης GT–HRSG–ST κατά το startup	Technical Interface	4	5	20	Κρίσιμος
R-03	Καθυστερήση έκδοσης περιβαλλοντικής άδειας (air permit)	Permitting	4	4	16	Κρίσιμος
R-02	Πυρκαγιά / έκρηξη λόγω διαρροής αερίου	Field Safety	3	5	15	Υψηλός
R-04	Καθυστερημένη παράδοση HRSG (long-lead item)	Procurement	4	3	12	Υψηλός
R-05	Ατύχημα κατά εργασίες θερμού σημείου (hot work)	Field Safety	3	4	12	Υψηλός
R-06	Ανεπαρκής συντονισμός EPC αναδόχου–υπεργολάβων	Governance	3	3	9	Μεσαίος
R-07	Υπέρβαση κόστους λόγω διακύμανσης τιμών υλικών	Governance	3	3	9	Μεσαίος
R-11	Καθυστερήση παράδοσης αεριοστροβίλου	Procurement	3	3	9	Μεσαίος
R-08	Ατύχημα σε περιορισμένο χώρο (confined space)	Field Safety	2	4	8	Μεσαίος
R-13	Απόκλιση από περιβαλλοντικούς όρους εκπομπών κατά τις δοκιμές	Permitting	2	4	8	Μεσαίος

Πίνακας 16: Συνοπτικό Μητρώο Κινδύνων – οι δέκα κίνδυνοι με την υψηλότερη βαθμολογία στη μελέτη περίπτωσης (*P* = Πιθανότητα, *S* = Σοβαρότητα)



Σχήμα 13: Κατανομή κρίσιμων κινδύνων στο Risk Matrix – μελέτη περίπτωσης.

Η απεικόνιση των κινδύνων στο Risk Matrix αναδεικνύει με σαφήνεια τη συγκέντρωση των πλέον σοβαρών κινδύνων (R-01, R-03, R-02) στο άνω δεξιό τμήμα του πίνακα, δηλαδή σε συνδυασμούς υψηλής πιθανότητας και υψηλής σοβαρότητας, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάγκη άμεσης προτεραιοποίησής τους στο σχέδιο διαχείρισης κινδύνου του έργου.

4.5 Κρίσιμοι Τεχνικοί Κίνδυνοι στις Διεπαφές GT–HRSG–ST

Ο κίνδυνος R-01 (ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης GT–HRSG–ST) αναδεικνύεται ως ο κρισιμότερος κίνδυνος του έργου, με δείκτη κινδύνου 20 στην κλίμακα 1–25. Η αιτία του κινδύνου έγκειται στη θεμελιώδη διαφορά ταχύτητας απόκρισης μεταξύ του αεριοστροβίλου, ο οποίος μπορεί να μεταβάλει την ισχύ του μέσα σε λίγα λεπτά, και του λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG), του οποίου η μεγάλη μεταλλική μάζα επιβάλλει θερμική απόκριση της τάξης των 10 έως 20 λεπτών (Rúa & Nord, 2020), όπως αναλύθηκε διεξοδικά στην ενότητα 2.6.

Στο πλαίσιο του ενδεικτικού έργου, ο κίνδυνος αυτός εκδηλώνεται κυρίως κατά τις πρώτες δοκιμές συγχρονισμού και τις δοκιμές απόδοσης (performance tests), όπου ταχείες μεταβολές φορτίου στον αεριοστροβίλο, αν δεν συντονιστούν κατάλληλα με τη θερμική απόκριση του

HRSG και του ατμοστροβίλου, μπορούν να προκαλέσουν αυξημένη θερμική καταπόνηση, φαινόμενα ερπυσμού (creep) και κόπωση χαμηλού αριθμού κύκλων (low-cycle fatigue) σε κρίσιμα εξαρτήματα, με πιθανή συνέπεια τη μείωση του ωφέλιμου χρόνου ζωής του εξοπλισμού ή, σε ακραία σενάρια, τοπική αστοχία υλικού (Benato et al., 2016· Wogrin, Galbally & Ramos, 2016).

Τα προτεινόμενα μέτρα μετριασμού για τον κίνδυνο R-01 περιλαμβάνουν: (α) ανάπτυξη εξειδικευμένου, ανά έργο, προγράμματος σταδιακών δοκιμών (project-specific phased testing) αντί για τυποποιημένες διαδικασίες αποδοχής (Nanjappa & Gross, 2012· Jin et al., 2010), (β) στενή παρακολούθηση θερμικής καταπόνησης μέσω αισθητήρων κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, (γ) σαφή διαδικαστικά όρια ρυθμού μεταβολής φορτίου (ramp-rate limits) εγκεκριμένα από τον κατασκευαστή του HRSG, και (δ) συμμετοχή εξειδικευμένων μηχανικών commissioning με εμπειρία σε αντίστοιχες διατάξεις GT–HRSG–ST κατά τη φάση των δοκιμών.

Είναι ενδεικτικό ότι, ενώ ο κίνδυνος αυτός εντοπίζεται στην κατηγορία Technical Interface της RBS, η αποτελεσματική διαχείρισή του απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ τεχνικών ομάδων commissioning και ομάδων διαχείρισης έργου (project controls), επιβεβαιώνοντας το εύρημα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης ότι ο τεχνικός κίνδυνος και ο κίνδυνος διακυβέρνησης δεν μπορούν να αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα (βλ. ενότητα 2.8).

4.6 Αδειοδοτικοί και Προμηθευτικοί Κίνδυνοι

Ο κίνδυνος R-03 (καθυστέρηση έκδοσης περιβαλλοντικής άδειας) αναδεικνύεται επίσης ως κρίσιμος, με δείκτη κινδύνου 16. Λόγω της παράκτιας θέσης του ενδεικτικού έργου, η αδειοδότηση περιλαμβάνει αυξημένες απαιτήσεις σχετικά με τις επιπτώσεις στην ποιότητα αέρα, τις απαιτήσεις ελέγχου εκπομπών και το ύψος της καπνοδόχου, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.8 και επιβεβαιώνεται από τη σχετική βιβλιογραφία (Shotts, Adduci & Keller, 2012· Shotts, Perry & McGlynn, 2014).

Τυχόν καθυστέρηση στην έκδοση της άδειας θα μετατοπίσει άμεσα την έναρξη ή την ολοκλήρωση κρίσιμων κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, δεδομένου ότι η αδειοδότηση βρίσκεται στην κρίσιμη διαδρομή (critical path) του χρονοδιαγράμματος του έργου (βλ. Σχήμα 11).

Το προτεινόμενο μέτρο μετριασμού είναι η διεξαγωγή μελέτης σκοπιμότητας αδειοδότησης (feasibility-stage licensing study) και ανάλυσης «fatal-flaw» σε πολύ πρώιμο στάδιο, πριν από την οριστικοποίηση του σχεδιασμού, με σαφή καταγραφή όλων των απαιτούμενων περιβαλλοντικών αδειών/εγκρίσεων και έγκαιρο συντονισμό με τις αρμόδιες αρχές (Shotts, Adduci & Keller, 2012· Petermann & Deitz, 2006), ώστε ο σχεδιασμός να εναρμονίζεται εκ των προτέρων με τους αναμενόμενους όρους αδειοδότησης.

Ο κίνδυνος R-04 (καθυστερημένη παράδοση HRSG) αντιπροσωπεύει τυπικό παράδειγμα κινδύνου προμηθειών long-lead εξοπλισμού. Δεδομένου ότι ο χρόνος κατασκευής και παράδοσης ενός HRSG είναι ιδιαίτερα μεγάλος και, στο ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα, καλύπτει ουσιαστικά ολόκληρο το εννεάμηνο παράθυρο προμηθειών (Σχήμα 11), οποιαδήποτε καθυστέρηση στην παραγγελία ή στην κατασκευή του στο εργοστάσιο του προμηθευτή μεταφέρεται άμεσα στο χρονοδιάγραμμα ανέγερσης και commissioning.

Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι οι καθυστερημένες παραδόσεις (late deliveries) αποτελούν έναν από τους πλέον συχνά αναφερόμενους παράγοντες καθυστέρησης σε έργα φυσικού αερίου και combined-cycle (Derakhshanfar et al., 2019· Habibi & Kermanshachi, 2018). Προτεινόμενα μέτρα περιλαμβάνουν την πρώιμη παραγγελία (early procurement commitment) πριν την οριστικοποίηση όλων των μελετών, τακτική παρακολούθηση προόδου κατασκευής στο εργοστάσιο του προμηθευτή (expediting) και ενσωμάτωση ποινικών ρητρών (liquidated damages) στη σύμβαση προμήθειας.

4.7 Προτεινόμενα Μέτρα Μετριασμού και Σχέδιο Δράσης

Με βάση την ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων, διαμορφώνεται ένα συνοπτικό σχέδιο δράσης για τους πέντε κρισιμότερους κινδύνους του έργου, το οποίο αντιστοιχίζει κάθε κίνδυνο με συγκεκριμένη ενέργεια, υπεύθυνο ρόλο, ενδεικτικό χρονικό ορίζοντα υλοποίησης και σχετικό δείκτη παρακολούθησης (KPI), σύμφωνα με το πλαίσιο governance της ενότητας 3.7.

ID	Ενέργεια Μετριασμού	Υπεύθυνος	Χρονικός Ορίζοντας	Σχετικό KPI
R-01	Ανάπτυξη project-specific προγράμματος σταδιακών δοκιμών & ramp-rate limits	Επικεφαλής Commissioning	Πριν την έναρξη δοκιμών (Gate 3→4)	Αριθμός κρίσιμων κινδύνων
R-02	Risk-based fireproofing & επικαιροποίηση σεναρίων αναφοράς πυρκαγιάς	Υπεύθυνος HSE	Πριν την έναρξη H/M ανέγερσης	TRIR

ID	Ενέργεια Μετριασμού	Υπεύθυνος	Χρονικός Ορίζοντας	Σχετικό KPI
R-03	Fatal-flaw licensing study & συνεχής συντονισμός με αρχές	Project Manager / Νομικός Σύμβουλος	Μελέτη σκοπιμότητας (Gate 0)	Schedule Variance
R-04	Πρώιμη παραγγελία HRSG & τακτικό expediting προμηθευτή	Υπεύθυνος Προμηθειών	Στάδιο προμηθειών (Gate 2)	Schedule Variance
R-05	Ενίσχυση permit-to-work & hot-work isolation	Υπεύθυνος HSE	Καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής	Ανοιχτές Διορθωτικές Ενέργειες

Πίνακας 17: Ενδεικτικό σχέδιο δράσης για τους πέντε κρίσιμότερους κινδύνους της μελέτης περίπτωσης

4.8 Συζήτηση Αποτελεσμάτων Μελέτης Περίπτωσης

Η εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου στο ενδεικτικό έργο επιβεβαιώνει, σε πρακτικό επίπεδο, τα κύρια ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του Κεφαλαίου 2. Πρώτον, ο πλέον κρίσιμος κίνδυνος του έργου εντοπίστηκε στη διεπαφή GT–HRSG–ST, επιβεβαιώνοντας το εύρημα ότι οι σοβαρότεροι τεχνικοί κίνδυνοι συγκεντρώνονται σε αυτό το σημείο κατά το startup και το commissioning (Rúa & Nord, 2020· Wogrin et al., 2016). Δεύτερον, η αδειοδότηση αναδείχθηκε εκ νέου ως construction-critical παράγοντας, ιδιαίτερα λόγω της παράκτιας θέσης του έργου, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα των Shotts et al. (2012, 2014).

Τρίτον, η κατανομή των αναγνωρισμένων κινδύνων ανά κατηγορία RBS (Σχήμα 12) επιβεβαιώνει ότι ο κατασκευαστικός κίνδυνος σε έργα CCGT είναι πράγματι πολυδιάστατος, εκτεινόμενος πέρα από την παραδοσιακή εργοταξιακή ασφάλεια σε τεχνικά, αδειοδοτικά, προμηθευτικά και οργανωτικά ζητήματα, όπως υποστηρίζεται στη σύνθεση της βιβλιογραφίας (ενότητα 2.8). Παράλληλα, η ταυτόχρονη παρουσία υψηλόβαθμων κινδύνων σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες RBS (Technical Interface, Field Safety, Permitting) καταδεικνύει ότι κανένα μεμονωμένο εργαλείο διαχείρισης κινδύνου —είτε αμιγώς τεχνικό είτε αμιγώς διοικητικό— δεν θα ήταν επαρκές αυτόνομα, δικαιολογώντας την επιλογή του υβριδικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3.

Πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί με σαφήνεια ότι τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης περίπτωσης προέρχονται από ενδεικτική, όχι πραγματική, εφαρμογή του πλαισίου, και ως εκ τούτου δεν αποτελούν εμπειρικά επαληθευμένα δεδομένα ενός συγκεκριμένου έργου. Η αξία της μελέτης έγκειται στην ενδεικτική διερεύνηση της πρακτικής εφαρμοσιμότητας της μεθοδολογίας και στην ανάδειξη ρεαλιστικών, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένων

προτεραιοτήτων κινδύνου, και όχι στην παραγωγή στατιστικά γενικεύσιμων αποτελεσμάτων.

Το ζήτημα αυτό συζητείται περαιτέρω στους περιορισμούς της έρευνας στο Κεφάλαιο 5.

Συνολικά, η μελέτη περίπτωσης καταδεικνύει ότι η συστηματική εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου —από την ανάπτυξη της RBS, μέσω της δομημένης αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων, έως το συγκεκριμένο σχέδιο δράσης και την ενσωμάτωσή του σε μηχανισμό stage-gate— μπορεί να παράσχει σε μηχανικούς και διαχειριστές έργων ένα πρακτικό, βιβλιογραφικά θεμελιωμένο εργαλείο για την έγκαιρη αναγνώριση και διαχείριση των κρισιμότερων κινδύνων κατά την κατασκευή σταθμών ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου.

4.9 Διδάγματα (Lessons Learned)

Πέρα από τη συστηματική καταγραφή κινδύνων, η εφαρμογή του πλαισίου στο ενδεικτικό έργο αναδεικνύει ορισμένα πρακτικά διδάγματα, χρήσιμα για ομάδες έργου που θα κληθούν να προσαρμόσουν αντίστοιχη μεθοδολογία σε πραγματικές συνθήκες:

- Η έγκαιρη —και όχι εκ των υστέρων— ενασχόληση με τη διεπαφή GT–HRSG–ST αποδεικνύεται καθοριστική: η ενσωμάτωση απαιτήσεων ramp-rate στις προδιαγραφές προμήθειας, ήδη από το Gate 1, αποφεύγει δαπανηρές τροποποιήσεις κατά το commissioning.
- Οι κίνδυνοι αδειοδότησης δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως διοικητική διεκπεραίωση αλλά ως τεχνικός κίνδυνος με δικό του χρονοδιάγραμμα, δεδομένου ότι η καθυστέρησή τους μπορεί να ανατρέψει το σύνολο του προγράμματος κατασκευής.
- Η κατανομή των κινδύνων σε πολλαπλές κατηγορίες RBS επιβεβαιώνει ότι η ευθύνη διαχείρισης κινδύνου δεν μπορεί να ανατεθεί αποκλειστικά σε μία λειτουργία (π.χ. μόνο HSE ή μόνο μηχανικός έργου): απαιτείται συντονισμένη εποπτεία σε επίπεδο project management.
- Η χρήση κοινού Μητρώου Κινδύνων για τεχνικούς, αδειοδοτικούς και συμβατικούς κινδύνους διευκολύνει τη σύγκριση της σχετικής βαρύτητάς τους — κάτι δυσχερές όταν κάθε κατηγορία κινδύνου παρακολουθείται σε ξεχωριστό εργαλείο.
- Η επανεξέταση του Μητρώου σε κάθε πύλη stage-gate, και όχι μόνο στην αρχή του έργου, αναμένεται να αναδεικνύει κινδύνους (π.χ. R-09 συχνές τροποποιήσεις σύμβασης) που δεν είναι εμφανείς κατά την αρχική αναγνώριση.

Τα διδάγματα αυτά, παρότι προκύπτουν από ενδεικτική και όχι πραγματική εφαρμογή, συνάδουν με ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας για ανάλογα έργα (Shotts et al., 2012· Jang, Han & Park, 2015) και μπορούν να αποτελέσουν σημείο εκκίνησης για ομάδες έργου που σχεδιάζουν αντίστοιχο σύστημα διαχείρισης κινδύνου.

5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τη μεθοδολογική ανάπτυξη και τη μελέτη περίπτωσης, αναδεικνύεται η πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας, διατυπώνονται πρακτικές προτάσεις για τη βιομηχανία, αναγνωρίζονται οι περιορισμοί της έρευνας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική διερεύνηση του θέματος.

5.1 Σύνοψη Ευρημάτων

Η παρούσα εργασία εξέτασε την αξιολόγηση και διαχείριση κινδύνων κατά τη φάση κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών με καύσιμο το φυσικό αέριο, με έμφαση στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (CCGT). Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (Κεφάλαιο 2) προέκυψε ότι ο κατασκευαστικός κίνδυνος σε τέτοια έργα είναι πολυδιάστατος, εκτεινόμενος πέρα από την εργοταξιακή ασφάλεια σε ζητήματα διακυβέρνησης, αδειοδότησης, προμηθειών και τεχνικών διεπαφών εξοπλισμού, με τους πλέον απαιτητικούς τεχνικούς κινδύνους να συγκεντρώνονται στη διεπαφή αεριοστροβίλου–HRSG–ατμοστροβίλου κατά το startup και το commissioning (Rúa & Nord, 2020· Wogrin et al., 2016· Sánchez-Colmenarejo et al., 2022).

Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι καθιερωμένες τεχνικές αναγνώρισης κινδύνων (HAZID/HAZOP) και οι πρακτικές expert elicitation, αν και απαραίτητες, αποδίδουν ισχυρότερα σε κινδύνους διεργασίας και μηχανολογικού εξοπλισμού παρά σε κινδύνους πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και commissioning διεπαφών, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συμπλήρωσή τους με ποιοτικές/ημι-ποσοτικές τεχνικές αξιολόγησης (Risk Matrix, fuzzy/MCDM) και με μηχανισμούς δυναμικής παρακολούθησης μέσω Μητρώων Κινδύνων και δεικτών KPI (Tanabe et al., 2017· Jang, Han & Park, 2015).

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μεθοδολογικό πλαίσιο οκτώ σταδίων, το οποίο συνδυάζει Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS), δομημένη αναγνώριση κινδύνων, ποιοτική αξιολόγηση μέσω Risk Matrix, ανάπτυξη Μητρώου Κινδύνων, στρατηγικές μετριασμού και ενσωμάτωση σε μηχανισμό ελέγχου σταδίων (stage-gate governance) με παρακολούθηση KPI. Το πλαίσιο αυτό εφαρμόστηκε στο Κεφάλαιο 4 σε ενδεικτική μελέτη περίπτωσης σταθμού CCGT ισχύος περίπου 450 MW, όπου αναδείχθηκαν ως κρισιμότεροι κίνδυνοι η ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης GT–HRSG–ST, η καθυστέρηση περιβαλλοντικής αδειοδότησης και ο κίνδυνος πυρκαγιάς/έκρηξης, επιβεβαιώνοντας σε πρακτικό επίπεδο τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

5.2 Πρωτοτυπία και Συνεισφορά της Εργασίας

Η κύρια συνεισφορά της παρούσας εργασίας δεν βασίζεται στην παραγωγή νέων πρωτογενών δεδομένων, αλλά στη συστηματική σύνθεση και προσαρμογή καθιερωμένων εργαλείων διαχείρισης κινδύνων στο ειδικό πλαίσιο της κατασκευής σταθμών ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου. Η συνεισφορά αυτή έγκειται κυρίως στην ενοποιημένη παρουσίαση των RBS, HAZID/HAZOP, expert elicitation, Risk Matrix, Risk Register και stage-gate governance σε ένα συνεκτικό μεθοδολογικό πλαίσιο.

Πρώτον, η εργασία αναπτύσσει ένα υβριδικό, ενοποιημένο πλαίσιο διαχείρισης κατασκευαστικού κινδύνου που συνδυάζει, ενιαία δομή προσαρμοσμένη σε σταθμούς φυσικού αερίου, τη Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS), τις τεχνικές HAZID/HAZOP και expert elicitation, την ποιοτική αξιολόγηση μέσω Risk Matrix με δυνατότητα ενίσχυσης από fuzzy/MCDM τεχνικές, το δυναμικό Μητρώο Κινδύνων και τον μηχανισμό ελέγχου σταδίων (stage-gate governance). Όπως αναδείχθηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση (ενότητα 2.8), η υπάρχουσα διεθνής βιβλιογραφία δεν παρέχει ένα πλήρως ενοποιημένο πλαίσιο που να καλύπτει ταυτόχρονα civil, mechanical, electrical και commissioning κινδύνους σε έργα CCGT/EPC· η παρούσα εργασία αποτελεί μία τεκμηριωμένη, βιβλιογραφικά θεμελιωμένη απόπειρα κάλυψης αυτού ακριβώς του κενού, σε επίπεδο πλαισίου εφαρμόσιμου από μηχανικούς και διαχειριστές έργων.

Δεύτερον, η εργασία γεφυρώνει ρητά τον τεχνικό κίνδυνο (ιδίως στη διεπαφή GT–HRSG–ST) με τον κίνδυνο διακυβέρνησης και έργου (project governance), δύο περιοχές που στη διεθνή βιβλιογραφία εξετάζονται συνήθως ξεχωριστά —η πρώτη από τη μηχανολογική/θερμοδυναμική βιβλιογραφία (π.χ. Rúa & Nord, 2020· Wogrin et al., 2016) και η δεύτερη από τη βιβλιογραφία διοίκησης έργων (π.χ. Jang, Han & Park, 2015· Jawad, Ledwith & Panahifar, 2018). Η ενσωμάτωσή τους σε ένα κοινό Μητρώο Κινδύνων με κοινή κλίμακα βαθμολόγησης και κοινό μηχανισμό stage-gate αποτελεί πρακτική καινοτομία που ανταποκρίνεται άμεσα στην ανάγκη «γεφύρωσης τεχνικού κινδύνου, εργοταξιακής ασφάλειας και ελέγχου έργου» που επισημαίνεται ρητά ως ερευνητικό κενό στη βιβλιογραφία (ενότητα 2.8).

Τρίτον, η εργασία παρέχει μία πλήρως επεξεργασμένη, ενδεικτική εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου (Κεφάλαιο 4) σε ρεαλιστικό έργο CCGT διάταξης 2×1, η οποία λειτουργεί ως «οδηγός εφαρμογής» (worked example) από την ανάπτυξη της RBS έως το

τελικό σχέδιο δράσης με δείκτες KPI. Η προσέγγιση αυτή —παρότι δεν υποκαθιστά την επαλήθευση σε πραγματικό έργο— μεταφράζει τα αφηρημένα ευρήματα της βιβλιογραφίας σε συγκεκριμένα, αριθμημένα βήματα (Μητρώο Κινδύνων, Risk Matrix, σχέδιο δράσης) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως πρότυπο (template) από μηχανικούς έργου.

Τέταρτον, η εργασία παράγει έτοιμα προς χρήση εργαλεία (πεδία Μητρώου Κινδύνων, ενδεικτικός κατάλογος ελέγχου HAZID, σύνολο δεικτών KPI παρακολούθησης – Παραρτήματα Α και Β), τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αφετηρία προσαρμογής για πραγματικά έργα κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου, προσφέροντας πρακτική, άμεσα αξιοποιήσιμη αξία πέραν της ακαδημαϊκής συμβολής της εργασίας.

Συνολικά, η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται στη μετάβαση από μία αποσπασματική, ανά θεματική περιοχή, βιβλιογραφία σε ένα συνεκτικό, εφαρμόσιμο και ελέγξιμο πλαίσιο διαχείρισης κινδύνου, ειδικά σχεδιασμένο για την κατασκευαστική φάση σταθμών ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου.

5.3 Πρακτικές Προτάσεις για τη Βιομηχανία

Με βάση τα ευρήματα της εργασίας, διατυπώνονται οι ακόλουθες πρακτικές προτάσεις προς μηχανικούς έργου, διαχειριστές κατασκευής και στελέχη του ενεργειακού κλάδου που εμπλέκονται στην κατασκευή σταθμών φυσικού αερίου:

- Η αδειοδότηση να αντιμετωπίζεται ως construction-critical, όχι μόνο ως pre-construction, δραστηριότητα, με πρώιμη μελέτη σκοπιμότητας (fatal-flaw analysis) πριν την οριστικοποίηση του σχεδιασμού.
- Η φάση commissioning να σχεδιάζεται με εξειδικευμένο, ανά έργο, πρόγραμμα δοκιμών, ιδίως σε περιπτώσεις σταδιακής (phased) κατασκευής από simple-cycle σε combined-cycle λειτουργία.
- Το Μητρώο Κινδύνων να αποτελεί «ζωντανό» εργαλείο, επικαιροποιούμενο συστηματικά σε κάθε πύλη ελέγχου (stage-gate) και όχι στατικό έγγραφο συμμόρφωσης.
- Οι long-lead προμήθειες (ιδίως HRSG και αεριοστρόβιλοι) να παραγγέλλονται όσο το δυνατόν νωρίτερα, με τακτικό expediting και σαφείς συμβατικές ρήτρες.

- Να ενισχύεται η χρήση ψηφιακών εργαλείων παρακολούθησης (BIM-enabled tracking, real-time monitoring) για την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων ασφαλείας και προόδου.

5.4 Περιορισμοί της Έρευνας

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της. Καταρχάς, η διαθέσιμη διεθνής βιβλιογραφία καλύπτει ισχυρότερα κινδύνους διεργασίας και μηχανολογικού εξοπλισμού (process/mechanical hazards) παρά κινδύνους πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και της διεπαφής κατασκευής-commissioning, γεγονός που ενδέχεται να έχει επηρεάσει την έμφαση της ανάλυσης προς την πρώτη κατηγορία (Tanabe et al., 2017· Perez & Madewell, 2013).

Επιπλέον, δεν εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία επαρκή ποσοτικά benchmarks —όπως τυπικά ποσοστά καθυστέρησης χρονοδιαγράμματος, επίπεδα contingency ή εύρη υπέρβασης κόστους— ειδικά προσαρμοσμένα σε έργα κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου, γεγονός που περιόρισε τη δυνατότητα πλήρους ποσοτικής επικύρωσης της βαθμολόγησης κινδύνων στη μελέτη περίπτωσης (Habibi & Kermanshachi, 2018· Derakhshanfar et al., 2019).

Οι μέθοδοι fuzzy/MCDM που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 εμφανίζονται στη βιβλιογραφία κυρίως σε πλαίσιο ιεράρχησης κινδύνων υγείας και ασφάλειας εργοταξίου, και όχι ως πλήρως ενοποιημένα συστήματα διαχείρισης κινδύνου σε επίπεδο ολόκληρου έργου EPC, γεγονός που περιόρισε την πλήρη ποσοτική εφαρμογή τους στην παρούσα εργασία, η οποία περιορίστηκε σε επεξηγηματικό επίπεδο (Gul, 2018· Karaşan et al., 2018).

Σημαντικός περιορισμός αποτελεί επίσης το γεγονός ότι η μελέτη περίπτωσης του Κεφαλαίου 4 βασίζεται σε ενδεικτικό, όχι πραγματικό, έργο, ώστε να μην απαιτούνται εμπιστευτικά δεδομένα πραγματικού έργου. Ως αποτέλεσμα, η ποιοτική βαθμολόγηση πιθανότητας και σοβαρότητας βασίζεται σε ρεαλιστικές, βιβλιογραφικά τεκμηριωμένες παραδοχές και όχι σε πραγματικά ιστορικά δεδομένα συγκεκριμένου έργου, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα άμεσης στατιστικής γενίκευσης των αποτελεσμάτων.

Τέλος, οι εξωτερικοί κίνδυνοι φυσικής προέλευσης που μπορούν να πυροδοτήσουν τεχνολογικά ατυχήματα (Natech), όπως σεισμοί ή ακραία καιρικά φαινόμενα, δεν ενσωματώθηκαν σε βάθος στο προτεινόμενο πλαίσιο, καθώς η σχετική βιβλιογραφία

παραμένει αποσπασματική ως προς την ενσωμάτωσή τους σε σχέδια κατασκευαστικού κινδύνου σταθμών φυσικού αερίου (Antonioni et al., 2007· Krausmann et al., 2011· Steinberg & Cruz, 2004).

5.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Με βάση τους περιορισμούς που περιγράφηκαν, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, οι οποίες αντλούν επίσης από τα ερευνητικά κενά που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση:

- Ανάπτυξη και επικύρωση ενός πλήρως ενοποιημένου πλαισίου που να καλύπτει ταυτόχρονα civil, mechanical, electrical και commissioning κινδύνους σε πραγματικά έργα CCGT/EPC, με χρήση πρωτογενών δεδομένων από ολοκληρωμένα έργα.
- Συγκριτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας παραδοσιακών τεχνικών HAZID/HAZOP έναντι ψηφιακών εργαλείων παρακολούθησης πραγματικού χρόνου (real-time monitoring, BIM-enabled tracking) στη φάση κατασκευής.
- Ποσοτική διερεύνηση της σύνδεσης μεταξύ εργαλείων governance (π.χ. stage-gate control, audits) και μετρήσιμων αποτελεσμάτων έργου, όπως rework, TRIR, schedule variance και cost variance, με χρήση στατιστικών ή οικονομετρικών μεθόδων.
- Εξειδικευμένες μελέτες περίπτωσης εστιασμένες σε κινδύνους πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων (Balance of Plant – BoP) και αστοχιών pre-commissioning, περιοχές που παραμένουν υποεκπροσωπούμενες στην υπάρχουσα βιβλιογραφία.
- Ενσωμάτωση εξωτερικών κινδύνων φυσικής προέλευσης (Natech) σε Μητρώα Κινδύνων κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου, ιδιαίτερα για έργα σε περιοχές αυξημένου σεισμικού ή κλιματικού κινδύνου.
- Πλήρης ποσοτική εφαρμογή τεχνικών fuzzy/MCDM σε επίπεδο ολόκληρου έργου EPC, πέραν του στενού πλαισίου ιεράρχησης κινδύνων υγείας και ασφάλειας εργοταξίου.

Συμπερασματικά, η παρούσα διπλωματική εργασία κατέδειξε ότι η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων κατά την κατασκευή σταθμών ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου απαιτεί ένα ολοκληρωμένο, πολυδιάστατο πλαίσιο, το οποίο συνδυάζει τεχνικές διεπαφές εξοπλισμού, εργοταξιακή ασφάλεια, αδειοδότηση, προμήθειες και governance σε ενιαίο

σύστημα παρακολούθησης. Η ανάπτυξη και η ενδεικτική εφαρμογή ενός τέτοιου πλαισίου στην παρούσα εργασία αποσκοπεί να αποτελέσει χρήσιμο σημείο αναφοράς τόσο για την ακαδημαϊκή έρευνα όσο και για την πρακτική εφαρμογή στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου.

Βιβλιογραφία

- Abdul Majid, N. D., Mohd Shariff, A., & Rusli, R. (2015). Process Safety Management (PSM) for managing contractors in process plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.014>
- Aird, P. (2019). Operating: Key aspects of deepwater planning and project implementation. In *Deepwater Drilling*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102282-5.00010-7>
- Al-Mhdawi, M. K. S., O'Connor, A., & Qazi, A. (2024). Structural equation modeling and fuzzy set theory: Advancing risk assessment in oil and gas construction projects. *Environmental Impact Assessment Review*. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107622>
- Alobaid, F., Karner, K., Belz, J., Heinze, C., & Epple, B. (2014). Numerical and experimental study of a heat recovery steam generator during start-up procedure. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.007>
- Antonioni, G., Spadoni, G., & Cozzani, V. (2007). A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.043>
- Benato, A., Bracco, S., Stoppato, A., & Mirandola, A. (2016). Dynamic simulation of combined cycle power plant cycling in the electricity market. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.050>
- Chen, Q.-Y., Liu, H.-C., Wang, J.-H., & Shi, H. (2022). New model for occupational health and safety risk assessment based on Fermatean fuzzy linguistic sets and CoCoSo approach. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109262>
- Derakhshanfar, H., Elmualim, A., Ochoa, J. J., & Gunawan, I. (2019). Causes of delays in Iranian gas and combined cycle power plant projects. *Proceedings of the 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate (CRIOCM 2017)*.
- Dunjó, J., Fthenakis, V., Vilchez, J. A., & Arnaldos, J. (2010). Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>
- European Commission. (2023). *EU energy system and natural gas market report*. European Commission.
- Flyvbjerg, B. (2014). What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project Management Journal*, 45(2), 6–19.
- Gul, M. (2018). A review of occupational health and safety risk assessment approaches based on multi-criteria decision-making methods and their fuzzy versions. *Human and Ecological Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1424531>

- Gul, M. (2020). Application of Pythagorean fuzzy AHP and VIKOR methods in occupational health and safety risk assessment. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1492251>
- Gul, M., & Ak, M. F. (2018). A comparative outline for quantifying risk ratings in occupational health and safety risk assessment. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.106>
- Gul, M., Guven, B., & Güneri, A. F. (2018). A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.014>
- Habibi, M., & Kermanshachi, S. (2018). Phase-based analysis of key cost and schedule performance causes and preventive strategies. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2017-0219>
- International Electrotechnical Commission. (2019). *IEC 31010: Risk management—Risk assessment techniques*. IEC.
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 risk management—Guidelines*. ISO.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- İlibahar, E., Kardeş, A., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.025>
- Jang, W., Han, S. H., & Park, H. (2015). A stage-gate integrated risk control system for LNG plant projects: Focusing on the design phase. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.12.018>
- Jawad, S., Ledwith, A., & Panahifar, F. (2018). Enablers and barriers to the successful implementation of project control systems in the petroleum and chemical industry. *International Journal of Engineering Business Management*. <https://doi.org/10.1177/1847979017751834>
- Jiang, H., Lin, P., Qiang, M., & Fan, Q. (2015). A labor consumption measurement system based on real-time tracking technology for dam construction site. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.004>
- Jin, H., Terrence, Sullivan, B., & Friedman, J. R. (2010). Performance testing of combined cycle power plant in phased construction. *Proceedings of ASME POWER2010*. <https://doi.org/10.1115/POWER2010-27118>

- Karaşan, A., İlibahar, E., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.031>
- Krausmann, E., Cozzani, V., Salzano, E., & Renni, E. (2011). Industrial accidents triggered by natural hazards: An emerging risk issue. *Natural Hazards and Earth System Science*. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-921-2011>
- Kruk-Gotzman, S., Ziółkowski, P., Iliev, I., & Badur, J. (2023). Techno-economic evaluation of combined cycle gas turbine and a diabatic compressed air energy storage integration concept. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126345>
- Li, W., Sun, Q., Zhang, J., & Zhang, L. (2024). Quantitative risk assessment of industrial hot work using Adaptive Bow Tie and Petri Nets. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109784>
- LNG Project Management. (2014). In *Handbook of Liquefied Natural Gas* (pp. 601–632). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404585-9.00011-8>
- McClintock, M., Grace, H. P., Gwin, E. C., & Burcham, I. R. (2003). Recent new combined cycle and gas turbine plant acceptance test experience. *Proceedings of the 2003 International Joint Power Generation Conference*. <https://doi.org/10.1115/ijpgc2003-40151>
- Mertens, N., Alobaid, F., Starkloff, R., Stroh, A., Epple, B., & Kim, H.-G. (2015). Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.065>
- Nanjappa, J., & Gross, M. (2012). Combined cycle phased testing philosophy – Revisited. *Proceedings of ICONE20-POWER2012*. <https://doi.org/10.1115/ICONE20-POWER2012-55511>
- Noshchenko, O., Hagspiel, V., & Deshpande, P. C. (2025). Assessing the sustainability of offshore platform power supply alternatives using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): A case study of Norway. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179053>
- Perez, J. T., & Madewell, A. (2013). Critical P&ID reviews using HAZOP/LOPA methodology – Overkill or underrated? *AIChE Spring Meeting and 9th Global Congress on Process Safety, Conference Proceedings*.
- Petermann, B., & Deitz, C. (2006). Fast track PSD permitting of the BPU nearman creek CTG. *Electric Utilities Environmental Conference (EUEC 2005)*.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- Rúa, J., & Nord, L. O. (2020). Optimal control of flexible natural gas combined cycles with stress monitoring: Linear vs nonlinear model predictive control. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114820>

- Sabia, G., Heinze, C., Alobaid, F., Rink, A., & Epple, B. (2019). ASPEN dynamics simulation for combined cycle power plant – Validation with hot start-up measurement. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115897>
- Sánchez-Colmenarejo, J. I., González-Gaya, C., & Morales-Camprubí, F. (2021). Risk analysis in power plants construction projects. *Proceedings of the International Congress on Project Management and Engineering*.
- Sánchez-Colmenarejo, J. I., Morales-Camprubí, F., González-Gaya, C., & Sanchez-Lite, A. (2022). Power plant construction projects risk assessment: A proposed method for temporary systems of commissioning. *Buildings*, 12(8), Article 1260. <https://doi.org/10.3390/buildings12081260>
- Sharma, S. K. (2012). National technical capability development in nuclear power programmes. In *Infrastructure and Methodologies for the Justification of Nuclear Power Programmes*. <https://doi.org/10.1533/9780857093776.1.189>
- Shirali, G. A., Askaripoor, T., Kazemi, E., & Marzban, M. (2014). Assessment and risks ranking in a combined cycle power plant using degree of Belief approach in fuzzy logic. *Iran Occupational Health*.
- Shotts, D. J., Adduci, C. M., & Keller, M. (2012). Air quality permitting factors in site selection for natural gas combined cycle power plants. *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition (AWMA)*.
- Shotts, D., Perry, J., & McGlynn, M. (2014). Challenges in licensing new gas-fired combustion turbine generation as an alternative to MATS compliance. *Power Plant Pollutant Control "MEGA" Symposium (MEGA 2014)*.
- Smith, D. J. (2002). Combined cycles: From conception to operation. *Power Engineering (Barrington, Illinois)*.
- Sovacool, B. K., & Ryu, H. (2025). Beyond economies of scale: Learning from construction cost overrun risks and time delays in global energy infrastructure projects. *Energy Research & Social Science*, 123, 104057. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104057>
- Steinberg, L. J., & Cruz, A. M. (2004). When natural and technological disasters collide: Lessons from the Turkey earthquake of August 17, 1999. *Natural Hazards Review*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2004\)5:3\(121\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2004)5:3(121))
- Tanabe, M., Turco, C., & Miyake, A. (2017). Management system for enhancing chances to take inherently safer design options in LNG plant projects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.07.030>
- Tugnoli, A., Cozzani, V., Di Padova, A., & Tallone, F. (2012). Mitigation of fire damage and escalation by fireproofing: A risk-based strategy. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.002>

- Waqar, A., Nisar, S., & Qadir, S. (2025). BIM-driven sustainable safety management solutions for downstream oil and gas (D-O&G) construction projects. *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101058>
- Wogrin, S., Galbally, D., & Ramos, A. (2016). CCGT unit commitment model with first-principle formulation of cycling costs due to fatigue damage. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.014>
- Wu, Z., & Liu, Y. (2021). A forest-fire model for technology risk transfer. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.3233/JIFS-189995>
- Xu, M., Nie, X., Li, H., & Mei, Z. (2022). Smart construction sites: A promising approach to improving on-site HSE management performance. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104007>
- Zachary, J., Bauerschmidt, J., & Loy, C. (2006). Experience of a lifetime. *PEI Power Engineering International*.
- Zhang, X.-L., Liang, F.-J., Xu, S.-R., & Shu, C.-M. (2023). Building urban gas process safety management (UG-PSM) system: Based on root cause analysis with 160 urban gas accidents in China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105101>
- Zhao, X. (2023). Construction risk management research: Intellectual structure and emerging themes. *International Journal of Construction Management*, 24(5), 540–550.
- Zohrehvandi, S., & Tenera, A. (2019). Risk assessment and management in combined cycle power plant projects. *International Journal of Project Management*.

Παράρτημα Α: Πλήρες Ενδεικτικό Μητρώο Κινδύνων (Risk Register) Μελέτης Περίπτωσης

Στο παρόν παράρτημα παρατίθεται το πλήρες Μητρώο Κινδύνων (15 κίνδυνοι) της ενδεικτικής μελέτης περίπτωσης που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, σύμφωνα με τη δομή πεδίων που ορίστηκε στην ενότητα 3.5. Η στήλη «P» αντιστοιχεί στην πιθανότητα εμφάνισης (1–5), η στήλη «S» στη σοβαρότητα συνεπειών (1–5) και η στήλη «Score» στο γινόμενο τους.

ID	Κίνδυνος	Κατηγορία RBS	P	S	Score	Επίπεδο
R-01	Ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης GT–HRSG–ST κατά το startup	Technical Interface	4	5	20	Κρίσιμος
R-02	Πυρκαγιά / έκρηξη λόγω διαρροής αερίου	Field Safety	3	5	15	Υψηλός
R-03	Καθυστερήση έκδοσης περιβαλλοντικής άδειας (air permit)	Permitting	4	4	16	Κρίσιμος
R-04	Καθυστερημένη παράδοση HRSG (long-lead item)	Procurement	4	3	12	Υψηλός
R-05	Ατύχημα κατά εργασίες θερμού σημείου (hot work)	Field Safety	3	4	12	Υψηλός
R-06	Ανεπαρκής συντονισμός EPC αναδόχου–υπεργολάβων	Governance	3	3	9	Μεσαίος
R-07	Υπέρβαση κόστους λόγω διακύμανσης τιμών υλικών	Governance	3	3	9	Μεσαίος
R-08	Ατύχημα σε περιορισμένο χώρο (confined space)	Field Safety	2	4	8	Μεσαίος
R-09	Συχνές τροποποιήσεις σύμβασης (change orders)	Governance	2	3	6	Μεσαίος
R-10	Θόρυβος / δονήσεις κατά δοκιμές αεριοστροβίλου	Field Safety	2	2	4	Χαμηλός
R-11	Καθυστερήση παράδοσης αεριοστροβίλου	Procurement	3	3	9	Μεσαίος
R-12	Σφάλμα ηλεκτρολογικής διασύνδεσης με υποσταθμό	Technical Interface	2	3	6	Μεσαίος
R-13	Απόκλιση από περιβαλλοντικούς όρους εκπομπών κατά τις δοκιμές	Permitting	2	4	8	Μεσαίος
R-14	Ελλιπής ποιότητα υλικών από υπεργολάβο πολιτικού μηχανικού	Procurement	2	2	4	Χαμηλός
R-15	Καθυστερήση λόγω κακών καιρικών συνθηκών στην παράκτια θέση	Field Safety	3	2	6	Μεσαίος

Πίνακας 18: Πλήρες ενδεικτικό Μητρώο Κινδύνων (Risk Register) της μελέτης περίπτωσης

Παράρτημα Β: Ενδεικτικός Κατάλογος Ελέγχου HAZID και Ερωτήσεων Expert Elicitation

Το παρόν παράρτημα παρέχει έναν ενδεικτικό κατάλογο ελέγχου (checklist) και βασικών ερωτήσεων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αφετηρία για την οργάνωση εργαστηρίων HAZID/HAZOP και συνεντεύξεων expert elicitation σε πραγματικά έργα κατασκευής σταθμών φυσικού αερίου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.3.

B.1 Ενδεικτικός Κατάλογος Ελέγχου HAZID ανά Κατηγορία RBS

- Project / Governance: Είναι σαφώς ορισμένοι οι ρόλοι και οι αρμοδιότητες μεταξύ EPC αναδόχου και υπεργολάβων; Υπάρχει επίσημο Μητρώο Κινδύνων επικαιροποιημένο; Προβλέπονται τακτικά audits εργολάβων;
- Permitting / Regulatory: Έχουν καταγραφεί όλες οι απαιτούμενες άδειες/εγκρίσεις; Έχει πραγματοποιηθεί fatal-flaw ανάλυση; Υπάρχει συνεχής συντονισμός με τις αρμόδιες αρχές;
- Procurement / Supply: Έχουν εντοπιστεί τα long-lead items; Υπάρχει σχέδιο εναλλακτικού προμηθευτή; Προβλέπεται τακτικό expediting;
- Field Safety: Εφαρμόζεται permit-to-work; Υπάρχει job hazard analysis για κάθε κρίσιμη εργασία; Είναι επαρκής η απομόνωση σε εργασίες θερμού σημείου;
- Technical Interface / Commissioning: Υπάρχει project-specific πρόγραμμα δοκιμών; Είναι καθορισμένα τα όρια ρυθμού μεταβολής φορτίου (ramp-rate limits); Συμμετέχουν εξειδικευμένοι μηχανικοί commissioning;

B.2 Ενδεικτικές Ερωτήσεις για Expert Elicitation

- Ποιοι κίνδυνοι έχουν εμφανιστεί επανειλημμένα σε αντίστοιχα έργα που έχετε συμμετάσχει;
- Ποιες φάσεις του έργου θεωρείτε ότι συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα ή πολυπλοκότητα;
- Υπάρχουν προμηθευτές ή υπεργολάβοι με ιστορικό επαναλαμβανόμενων καθυστερήσεων ή ποιοτικών προβλημάτων;
- Ποια μέτρα μετριασμού έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά σε προηγούμενα έργα;

- Ποιος είναι, κατά την εκτίμησή σας, ο βαθμός αβεβαιότητας (χαμηλός/μεσαίος/υψηλός) για κάθε κίνδυνο που αναγνωρίζεται;

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, 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.