



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ
ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
«ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΣΟΥΝΔΟΥΛΟΥΝΑΚΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ
ΠΟΛΥΖΟΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ
ΜΑΙΟΣ, 2026

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα. Στόχος είναι η εννοιολογική αποσαφήνιση του κινδύνου και η παρουσίαση των βασικών μεθόδων ανάλυσης. Επιπροσθέτως, αποσκοπείται η μελέτη και ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την επιτυχή υλοποίηση των έργων. Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι βασισμένη στην αφηγηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών επιστημονικών άρθρων, μονογραφιών και προτύπων. Στο πλαίσιο αυτής, ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται, τόσο σε παραδοσιακές όσο και σε σύγχρονες προσεγγίσεις επί του πεδίου της διαχείρισης των κινδύνων. Μέσω της παρούσας ανασκόπησης της βιβλιογραφίας επιβεβαιώνεται η πολυδιάστατη φύση της επικινδυνότητας. Επίσης, αναδεικνύεται η ιδιαίτερη σπουδαιότητα της έγκαιρης αναγνώρισης και αξιολόγησης των κινδύνων. Συν τοις άλλοις, επιβεβαιώνεται ο ρόλος που διαδραματίζει αφενός η οργανωσιακή κουλτούρα και αφετέρου η τεχνολογική καινοτομία. Εκ των βασικών συμπερασμάτων, αποδεικνύεται ότι η αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο υλοποίησης των τεχνικών έργων. Μάλιστα, η ενσωμάτωση των ψηφιακών εργαλείων και των σύγχρονων μοντέλων ανάλυσης των κινδύνων αποτελούν στοιχεία, τα οποία δύνανται να ενισχύσουν σε σημαντικό βαθμό την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα των τεχνικών έργων.

Λέξεις-κλειδιά: Τεχνικά έργα, Ανάλυση επικινδυνότητας, Διαχείριση κινδύνου, Ασφάλεια εργοταξίων.

ABSTRACT

This dissertation deals with the analysis of risk in technical projects. The aim is to conceptually clarify risk and present the basic analysis methods. In addition, it aims to study and analyze the factors that influence the successful implementation of projects. This thesis is based on a narrative bibliographic review of international scientific articles, monographs and standards. In this context, particular emphasis is given to both traditional and modern approaches in the field of risk management. Through this review of the literature, the multidimensional nature of risk is confirmed. It also highlights the particular importance of timely identification and assessment of risks. In addition, the role played by organizational culture on the one hand and technological innovation on the other is confirmed. The main conclusions show that effective risk management is a determining factor for the quality, cost and time of implementation of technical projects. In fact, the integration of digital tools and modern risk analysis models are elements that can significantly enhance the resilience and sustainability of technical projects.

Keywords: Technical projects, Risk analysis, Risk management, Construction site safety.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το χρονικό διάστημα μεταξύ του Σεπτεμβρίου 2025 έως το Μάιο 2026 στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου Ηρακλείου Κρήτης, με τίτλο “Διαχείριση Τεχνικών Έργων”. Με την ολοκλήρωσή της, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν για την πραγματοποίησή της με το παρόν κείμενο.

Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον επιβλέποντα καθηγητή μου Πολύζο Δημοσθένη, για την υποστήριξη και καθοδήγηση του καθ’ όλη την διάρκεια της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην σύζυγο και την οικογένεια μου για την στήριξη, την συμπαράσταση και την κατανόηση τους για όλο το διάστημα των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT.....	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	viii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Σκοπός και στόχοι	1
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα	1
1.3 Μεθοδολογία.....	2
1.4 Σπουδαιότητα μελέτης και συμβολή στη γνώση	3
1.5 Περιγραφή δομής	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ.....	6
2.1 Εννοιολογικό πλαίσιο της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα	6
2.2 Ο κύκλος ζωής του τεχνικού έργου και τα στάδια διαχείρισης των κινδύνων	9
2.3 Αντίληψη και αποδοχή κινδύνου	12
2.4 Εργαλεία πρόληψης και ασφάλειας εργοταξίων (safety management systems)	14
2.5 Εμπλοκή ενδιαφερομένων και επικοινωνία κινδύνου.....	16
2.6 Ο ρόλος του project manager και της οργανωσιακής κουλτούρας.....	18
2.7 Η σχέση της επικινδυνότητας με την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο στα τεχνικά έργα	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ.....	26
3.1 Ποιοτικές και ποσοτικές μέθοδοι ανάλυσης κινδύνου.....	26
3.2 Χρησιμοποιούμενες τεχνικές	28
3.2.1 Η τεχνική FMEA (Failure Mode and Effects Analysis).....	28
3.2.2 Η τεχνική FTA (Fault Tree Analysis).....	29

3.2.3 Η Τεχνική HAZOP (Hazard and Operability Study).....	31
3.2.4 Η ποσοτική τεχνική ανάλυσης μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων.....	33
3.2.5 Η τεχνική SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats).....	35
3.3 Μοντέλα αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων στα τεχνικά έργα	37
3.3.1 Η τεχνική αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων Risk Matrix ως ημιποσοτικό μοντέλο αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων.....	38
3.3.2 Η μέθοδος αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων AHP (Analytic Hierarchy Process) ως πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων ..	39
3.3.3 Η μέθοδος αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων που χρησιμοποιεί Bayesian Networks ως ποσοτικό πιθανοκρατικό μοντέλο αξιολόγησης κινδύνων	41
3.4 Καινοτόμες μέθοδοι	43
3.4.1 Η ανάλυση κινδύνου μέσω BIM (BIM-based Risk Analysis) ως ψηφιακή ολοκληρωμένη προσέγγιση	43
3.4.2 Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) ως ποσοτική και προγνωστική μέθοδος διαχείρισης κινδύνου	45
3.4.3 Η ενσωμάτωση GIS στη διαχείριση κινδύνου ως χωρική αναλυτική προσέγγιση.....	46
3.5 Συνολική συγκριτική αποτίμηση των μεθόδων ανάλυσης και αξιολόγησης της επικινδυνότητας.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ	54
4.1 Ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες.....	54
4.2 Τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι.....	56
4.3 Οικονομικοί και συμβατικοί κίνδυνοι.....	58
4.4 Περιβαλλοντικοί και γεωτεχνικοί κίνδυνοι.....	59
4.5 Νομικοί και διοικητικοί κίνδυνοι.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ	65
5.1 Ψηφιοποίηση και τεχνητή νοημοσύνη στη διαχείριση κινδύνων τεχνικών έργων	65
5.2 Ενοποίηση διαχείρισης κινδύνου με τα πλαίσια βιωσιμότητας (sustainability) και ανθεκτικότητας (resilience).....	67
5.3 Προληπτική συντήρηση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	69
5.4 Κίνδυνοι σε έργα πράσινης μετάβασης και ενεργειακών υποδομών.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	77
6.1 Συμπεράσματα	77
6.2 Κενά στη βιβλιογραφία	80
6.3 Προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο διαχείρισης κινδύνου για τεχνικά έργα	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΚΑΙ

Συντομογραφία	Πλήρης όρος (Αγγλικά)	Ελληνική απόδοση
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis	Ανάλυση Τρόπων Αστοχίας και Επιπτώσεων
RPN	Risk Priority Number	Δείκτης Προτεραιότητας Κινδύνου
FTA	Fault Tree Analysis	Ανάλυση Δένδρου Σφαλμάτων
HAZOP	Hazard and Operability Study	Μελέτη Επικινδυνότητας και Λειτουργικότητας
BIM	Building Information Modeling	Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου
4D BIM	4-Dimensional BIM	BIM με διάσταση χρόνου
5D BIM	5-Dimensional BIM	BIM με διάσταση κόστους
ML	Machine Learning	Μηχανική Μάθηση
GIS	Geographic Information Systems	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
AHP	Analytic Hierarchy Process	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats	Δυνάμεις, Αδυναμίες, Ευκαιρίες, Απειλές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και αποτύπωση της έννοιας της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα, καθώς επίσης και των μεθόδων και εργαλείων ανάλυσης και διαχείρισής της. Ο εν λόγω σκοπός επιτυγχάνεται μέσω κριτικής ανασκόπησης της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας.

Οι επιμέρους στόχοι της παρούσας μελέτης είναι οι κάτωθι:

- Η εννοιολογική αποσαφήνιση της έννοιας της επικινδυνότητας και του κινδύνου στα τεχνικά έργα.
- Η παρουσίαση του κύκλου ζωής των τεχνικών έργων και η σύνδεσή του με τη διαχείριση των κινδύνων.
- Η καταγραφή και ανάλυση των βασικών μεθόδων και εργαλείων ανάλυσης επικινδυνότητας που έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία.
- Η διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την εμφάνιση και εξέλιξη των κινδύνων στα τεχνικά έργα.
- Η μελέτη των σύγχρονων τάσεων και καινοτόμων προσεγγίσεων στη διαχείριση κινδύνου.
- Η επισήμανση των κενών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και η διατύπωση προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

1.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση τους ανωτέρω τιθέμενους στόχους, η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Πώς ορίζεται και πώς προσεγγίζεται εννοιολογικά η επικινδυνότητα στα τεχνικά έργα;
2. Ποια είναι η σχέση του κύκλου ζωής ενός τεχνικού έργου με τη διαδικασία αναγνώρισης, ανάλυσης και διαχείρισης των κινδύνων;

3. Ποιες μέθοδοι και τεχνικές ανάλυσης επικινδυνότητας έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία;
4. Ποιοι παράγοντες συμβάλλουν στην αύξηση ή μείωση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα;
5. Ποιες σύγχρονες τάσεις και τεχνολογικές εξελίξεις διαμορφώνουν το πεδίο της διαχείρισης κινδύνων στα τεχνικά έργα;
6. Ποια κενά εντοπίζονται στη βιβλιογραφία και ποιες κατευθύνσεις προτείνονται για μελλοντική έρευνα;

1.3 Μεθοδολογία

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στην αφηγηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, σχετικά με την ανάλυση και διαχείριση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα. Η επιλογή της αφηγηματικής ανασκόπησης κρίθηκε η πλέον κατάλληλη, λόγω του ότι το αντικείμενο της παρούσας μελέτης χαρακτηρίζεται από εννοιολογική πολυπλοκότητα και διεπιστημονικό χαρακτήρα. Επί του εν λόγω πεδίου, μάλιστα, υπάρχει ποικιλία θεωρητικών και μεθοδολογικών προσεγγίσεων, οι οποίες δεν περιορίζονται σε ένα αυστηρά ομοιογενές ερευνητικό πλαίσιο (Grant & Booth, 2009).

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε σε διεθνείς επιστημονικές βάσεις δεδομένων. Αυτές συμπεριλαμβάνουν το Scopus, το Web of Science και το Google Scholar. Στο πλαίσιο της αναζήτησης χρησιμοποιήθηκαν οι λέξεις - κλειδιά, οι οποίες σχετίζονται με την ανάλυση του κινδύνου, τη διαχείριση έργων, την επικινδυνότητα στα τεχνικά έργα και τις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές στο πεδίο αυτό. Επίσης, στην παρούσα μελέτη συμπεριλήφθηκαν επιστημονικά άρθρα από περιοδικά που εφαρμόζουν το σύστημα κριτών (peer-reviewed) και διεθνή πρότυπα, τα οποία θεωρούνται θεμελιώδη για την κατανόηση του αντικειμένου (ISO 31000, 2018).

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας επικεντρώθηκε, τόσο στις κλασικές θεωρητικές προσεγγίσεις, όσο και στις σύγχρονες εξελίξεις. Έμφαση αποδόθηκε στη συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης επικινδυνότητας και στην κριτική αποτίμηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους. Παράλληλα, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη σύνδεση της επικινδυνότητας με οργανωτικούς, τεχνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Συν τοις άλλοις, δόθηκε έμφαση και στη διερεύνηση

του ρόλου της ψηφιοποίησης και της τεχνητής νοημοσύνης στη σύγχρονη διαχείριση κινδύνων (Aven, 2016; Hopkin, 2018).

1.4 Σπουδαιότητα μελέτης και συμβολή στη γνώση

Η ανάλυση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα αποτελεί ένα πεδίο έρευνας βαρύνουσας σημασίας και αυξημένου ενδιαφέροντος. Ο λόγος έγκειται στο ότι τα τεχνικά έργα χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας και σημαντικές οικονομικές επενδύσεις. Πέραν αυτών συνοδεύονται από αυξημένες απαιτήσεις σε επίπεδο ασφάλειας, ποιότητας και βιωσιμότητας (Aven & Renn, 2009; Flyvbjerg, 2014; Reason, 1997).

Μάλιστα, η αποτυχία της αναγνώρισης και ορθής διαχείρισης των κινδύνων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές καθυστερήσεις, αλλά και σε υπερβάσεις του κόστους. Πρόκειται για μία δυσμενή εξέλιξη, η οποία μπορεί να επιφέρει ως επιπρόσθετη απότοκο την εμφάνιση τεχνικών αστοχιών και στη χειρότερη περίπτωση, ανθρωπίνων απωλειών (Cui et al., 2022).

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στην υφιστάμενη γνώση μέσω της ολοκληρωμένης και επικαιροποιημένης αποτύπωσης των θεωρητικών προσεγγίσεων και των μεθοδολογικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση κινδύνων τεχνικών έργων. Μέσω της αφηγηματικής σύνθεσης της βιβλιογραφίας, σκοπός είναι να κατανοηθεί η εξέλιξη του εν λόγω πεδίου.

Πρόκειται για μία εξέλιξη, η οποία αφορά τη μετάβαση του συγκεκριμένου πεδίου από παραδοσιακές και γραμμικές προσεγγίσεις προς πιο ολοκληρωμένα και δυναμικά μοντέλα ανάλυσης. Τα νέα εξελιγμένα μοντέλα, μάλιστα, λαμβάνουν υπόψιν στοιχεία, όπως είναι επί παραδείγματι η αβεβαιότητα, η διασύνδεση των κινδύνων και η σημασία του ανθρώπινου παράγοντα (Adepoju et al., 2025; Judijanto et al., 2024).

Συν τοις άλλοις, η παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκει να προάγει τη σημασία της ενσωμάτωσης των σύγχρονων τεχνολογιών στη διαδικασία ανάλυσης επικινδυνότητας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το Building Information Modeling και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης. Έτσι, αναμένεται να συμβάλλει στη μετάβαση προς πιο προληπτικές πρακτικές διαχείρισης έργων, οι οποίες είναι βασισμένες σε απτά δεδομένα (data driven) (Venter et al., 2021).

Τέλος, η επισήμανση των κενών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία δημιουργεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες. Πρόκειται για ερευνητικές κατευθύνσεις οι οποίες μπορούν να κατευθυνθούν ιδίως στα πεδία που αφορούν τη βιωσιμότητα, την ανθεκτικότητα και τα έργα «πράσινης» μετάβασης.

1.5 Περιγραφή δομής

Το παρόν πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσίασε τον σκοπό, τους επιμέρους στόχους και τα ερευνητικά ερωτήματα. Στη συνέχεια, έγινε αναφορά στην ακολουθούμενη μεθοδολογία και τεκμηριώθηκε η σημασία και συμβολή της παρούσας μελέτης στην ήδη υφιστάμενη γνώση.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό και εννοιολογικό πλαίσιο της ανάλυσης της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα. Στο κεφάλαιο αυτό, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις βασικές έννοιες και στην διαχείριση των κινδύνων κατά τον κύκλο ζωής ενός έργου. Επίσης, αναλύονται τα εργαλεία πρόληψης και ασφάλειας των εργοταξίων (safety management systems), όπως επίσης και η εμπλοκή των ενδιαφερόμενων μερών στο πλαίσιο της επικοινωνίας του εκάστοτε κινδύνου. Κλείνοντας, αναφέρεται ο ρόλος που διαδραματίζει ο project manager και η οργανωσιακή κουλτούρα στη διαχείριση του κινδύνου, όπως επίσης και η σχέση που υφίσταται μεταξύ της επικινδυνότητας με την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο στα τεχνικά έργα.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στις μεθόδους και τα εργαλεία ανάλυσης της επικινδυνότητας. Αρχικά, επισημαίνονται οι ποιοτικές και ποσοτικές μέθοδοι ανάλυσης του κινδύνου. Κατόπιν, περιγράφονται αναλυτικότερα οι αναγνωρισμένες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων των FMEA, FTA, HAZOP, Monte Carlo Simulation και SWOT. Στη συνέχεια, αναλύονται τα μοντέλα αξιολόγησης και ιεράρχησης των κινδύνων, όπως Risk Matrix, AHP και Bayesian Networks. Κατόπιν, γίνεται εμβάθυνση στις καινοτόμες μεθόδους BIM-based Risk Analysis, Machine Learning και GIS Integration.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες της επικινδυνότητας στην περίπτωση των τεχνικών έργων. Αναλυτικότερα, μελετώνται οι ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες, οι τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι, οι οικονομικοί και συμβατικοί κίνδυνοι, οι περιβαλλοντικοί και γεωτεχνικοί κίνδυνοι και τέλος, οι κίνδυνοι νομικής και διοικητικής φύσεως.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονες τάσεις και προοπτικές στην διαχείριση του κινδύνου στα τεχνικά έργα. Αναλυτικότερα, στην παρούσα ανάλυση συμπεριλαμβάνεται η ψηφιοποίηση και η τεχνητή νοημοσύνη στο πλαίσιο της διαχείρισης των κινδύνων των τεχνικών έργων, όπως επίσης και η ενοποίηση της διαχείρισης του κινδύνου με τα πλαίσια βιωσιμότητας (sustainability) και ανθεκτικότητας (resilience). Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στην προληπτική συντήρηση και ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως επίσης και στους κινδύνους στην περίπτωση των έργων πράσινης μετάβασης και ενεργειακών υποδομών.

Τέλος, το έκτο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης. Επ' αυτού, επιπροσθέτως, αναφέρονται οι περιορισμοί και διατυπώνονται οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Επί του παρόντος κεφαλαίου αναλύεται το θεωρητικό και εννοιολογικό πλαίσιο της ανάλυσης της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα και γίνεται εμβάθυνση στις βασικές έννοιες και στην διαχείριση των κινδύνων κατά τον κύκλο ζωής ενός έργου. Εν συνεχεία, αναλύονται τα εργαλεία πρόληψης και ασφάλειας των εργοταξίων και η εμπλοκή των ενδιαφερόμενων μερών στο πλαίσιο της επικοινωνίας του εκάστοτε κινδύνου. Τέλος, επισημαίνεται ο ρόλος που διαδραματίζει ο project manager και η οργανωσιακή κουλτούρα στη διαχείριση του κινδύνου, αλλά και η σχέση που υφίσταται μεταξύ της επικινδυνότητας με την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο στα τεχνικά έργα.

2.1 Εννοιολογικό πλαίσιο της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα

Η έννοια της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα αποτελεί θεμελιώδη πυλώνα της σύγχρονης επιστήμης της διαχείρισης έργων, αλλά και του πεδίου της μηχανικής. Στο σημείο αυτό, πρέπει να καταστεί κατανοητό ότι η επικινδυνότητα δεν ταυτίζεται απλώς με την πιθανότητα της επέλευσης ενός δυσμενούς γεγονότος. Πέραν αυτού, πρόκειται για μία σύνθετη και πολυδιάστατη έννοια. Η έννοια της επικινδυνότητας περιλαμβάνει την αβεβαιότητα, αλλά και τις πιθανές συνέπειες, όπως επίσης και το ευρύτερο οργανωσιακό και κοινωνικό πλαίσιο εντός του οποίου εκδηλώνεται (Aven, 2016).

Ειδικότερα δε, στην περίπτωση των τεχνικών έργων, όπως αναφέρει ο Genc (2023), συνυπάρχουν υψηλά επίπεδα τεχνολογικής πολυπλοκότητας και μεγάλα χρηματοοικονομικά μεγέθη. Επίσης, στα τεχνικά έργα υπάρχουν πολλαπλοί εμπλεκόμενοι φορείς. Δεδομένων των συνθηκών αυτών, η κατανόηση του εννοιολογικού πλαισίου της επικινδυνότητας καθίσταται ακόμα πιο καθοριστικής σημασίας.

Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 31000 (International Organization for Standardization-ISO, 2018), ο κίνδυνος ορίζεται ως «*η επίδραση της αβεβαιότητας στους στόχους*». Ο ορισμός αυτός μετατοπίζει το επίκεντρο από την παραδοσιακή αντίληψη του κινδύνου ως ενός αμιγώς αρνητικού φαινομένου, προς μια

πιο ολιστική προσέγγιση. Στο πλαίσιο της ολιστικής αυτής προσέγγισης, ο κίνδυνος μπορεί να έχει τόσο αρνητικές όσο και θετικές επιπτώσεις.

Στο πλαίσιο των τεχνικών έργων, η επικινδυνότητα αφορά κυρίως γεγονότα που δύνανται να επηρεάσουν δυσμενώς την ποιότητα, αλλά και το κόστος, τον χρόνο ολοκλήρωσης και την ασφάλεια. Όμως, την ίδια στιγμή, δεν αποκλείεται η πιθανότητα της εμφάνισης θετικών αποκλίσεων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου είδους αποκλίσεων είναι η ταχύτερη υλοποίηση ή ακόμα και η εξοικονόμηση πόρων (Soytu et al., 2021).

Οι Aven & Renn (2009) προβαίνουν σε μία διάκριση μεταξύ του αντικειμενικού και του υποκειμενικού κινδύνου, η οποία είναι αξιοσημείωτη. Πιο αναλυτικά, ο αντικειμενικός κίνδυνος σχετίζεται με μετρήσιμες πιθανότητες και στατιστικά δεδομένα. Από την άλλη πλευρά, ο υποκειμενικός κίνδυνος αφορά την αντίληψη και αξιολόγηση της αβεβαιότητας από τα εμπλεκόμενα άτομα ή οργανισμούς (Aven & Renn, 2009).

Στα τεχνικά έργα, λαμβάνονται συχνά αποφάσεις υπό συνθήκες ελλιπούς πληροφόρησης. Δεδομένου τούτου, η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο λόγος έγκειται στο ότι η αντίληψη του κινδύνου από τον project manager, τους μηχανικούς ή τους χρηματοδότες είναι δυνατόν να επηρεάσει ουσιαστικά τη στρατηγική διαχείρισής του (Aven & Renn, 2009).

Επιπροσθέτως, η έννοια της επικινδυνότητας συνδέεται άρρηκτα με την αβεβαιότητα. Πιο συγκεκριμένα, η αβεβαιότητα μπορεί να είναι μετρήσιμη, αν οι πιθανότητες είναι εκ των προτέρων γνωστές. Εναλλακτικά, μπορεί να είναι μη μετρήσιμη, υπό περιπτώσεις ριζικής αβεβαιότητας. Στα μεγάλα τεχνικά έργα, και δη σε έργα υποδομών ή σε μεγάλου βεληνεκούς έργα (megaprojects), η ριζική αβεβαιότητα αποτελεί σύνηθες φαινόμενο (Flyvbjerg, 2014).

Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης χρονικής διάρκειας, της τεχνολογικής καινοτομίας και της δυναμικής μεταβολής του εξωτερικού περιβάλλοντος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, λοιπόν, η επικινδυνότητα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί αποκλειστικά και μόνο μέσω στατιστικών μοντέλων. Πέραν αυτών, απαιτεί συνδυασμό ποιοτικών και ποσοτικών προσεγγίσεων (Flyvbjerg, 2014).

Παράλληλα, η επικινδυνότητα στα τεχνικά έργα είναι δυνατόν να αναλυθεί ως συνάρτηση δύο βασικών παραμέτρων. Η μία παράμετρος είναι η πιθανότητα της εμφάνισης ενός συμβάντος και η άλλη παράμετρος είναι η σοβαρότητας των συνεπειών του. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τη βάση πολλών εργαλείων αξιολόγησης κινδύνου. Μάλιστα, επιτρέπει τη συστηματική κατηγοριοποίηση και ιεράρχηση των κινδύνων. Ωστόσο, όπως επισημαίνει ο Aven (2016), η απλή ποσοτικοποίηση της πιθανότητας και της συνέπειας δεν επαρκεί, όταν δεν λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες, όπως η ευαλωτότητα του συστήματος και η δυνατότητα ανάκαμψης.

Συν τοις άλλοις, η έννοια της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα συνδέεται και με τη θεωρία των οργανωσιακών ατυχημάτων. Επί του σημείου τούτου, ο Reason (1997) υποστήριξε ότι τα ατυχήματα που συμβαίνουν σε πολύπλοκα συστήματα δεν αποτελούν αποκλειστικά και μόνο απόρροια μεμονωμένων λαθών. Αντ' αυτού, προκύπτουν από έναν συνδυασμό λανθανουσών οργανωσιακών αδυναμιών και ενεργών σφαλμάτων. Η εν λόγω προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα εργοτάξια και τα μεγάλα έργα υποδομών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η επικινδυνότητα διαμορφώνεται από αλληλεπιδράσεις μεταξύ ανθρώπινων, τεχνικών και οργανωτικών παραγόντων.

Επιπλέον, σημαντική είναι η διάκριση που υφίσταται μεταξύ του κινδύνου (risk) και της απειλής (hazard). Πιο αναλυτικά, η απειλή αναφέρεται σε μία δυνητική πηγή βλάβης. Από την άλλη πλευρά, ο κίνδυνος εκφράζει τον συνδυασμό της πιθανότητας έκθεσης στην απειλή και της σοβαρότητας των συνεπειών της. Επί παραδείγματι, στο πλαίσιο των τεχνικών έργων, η εργασία σε ύψος αποτελεί απειλή. Αντιθέτως, ο κίνδυνος σχετίζεται με την πιθανότητα πτώσης, αλλά και με τη σοβαρότητα του τραυματισμού. Πρόκειται για μία εννοιολογική διάκριση, η οποία είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων πρόληψης και ελέγχου.

Επιπλέον, ο Hopkin (2018) προσεγγίζει την επικινδυνότητα ως δυναμική έννοια. Μέσω της εν λόγω προσέγγισης, δεν πρόκειται για ένα στατικό χαρακτηριστικό ενός έργου. Αντιθέτως, πρόκειται για ένα φαινόμενο που εξελίσσεται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου. Οι κίνδυνοι μεταβάλλονται ανάλογα με το στάδιο σχεδιασμού, κατασκευής ή λειτουργίας. Επίσης μεταβάλλονται και ανάλογα και με τις μεταβολές του οικονομικού, κοινωνικού και κανονιστικού περιβάλλοντος (Hopkin, 2018). Η

συγκεκριμένη δυναμική διάσταση καθιστά αναγκαία τη συνεχή παρακολούθηση και επανεκτίμηση της επικινδυνότητας.

Τέλος, η επικινδυνότητα στα τεχνικά έργα δεν περιορίζεται μόνο σε τεχνικές αστοχίες ή ατυχήματα. Πέραν αυτών, εσωκλείει και χρηματοοικονομικούς, νομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς κινδύνους. Πρόκειται για ένα σύνολο κινδύνων, οι οποίοι ενδέχεται να επηρεάσουν την αποδοχή και βιωσιμότητα του έργου. Η πολυδιάστατη φύση της επικινδυνότητας επιβεβαιώνεται από τη μελέτη των Aven & Renn (2009), η οποία αναδεικνύει τη σημασία της ολοκληρωμένης διακυβέρνησης κινδύνου (risk governance) στα σύνθετα έργα.

2.2 Ο κύκλος ζωής του τεχνικού έργου και τα στάδια διαχείρισης των κινδύνων

Ο κύκλος ζωής ενός τεχνικού έργου είναι το πλαίσιο, εντός του οποίου εκδηλώνονται, εξελίσσονται και διαχειρίζονται οι κίνδυνοι. Η έννοια του κύκλου ζωής αναφέρεται στη διαδοχή των διακριτών φάσεων που ξεκινούν από τη σύλληψη και τον αρχικό σχεδιασμό του έργου και καταλήγουν στην ολοκλήρωση, παράδοση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, στη φάση λειτουργίας και συντήρησης. Το να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι κίνδυνοι μεταβάλλονται κατά μήκος των ανωτέρω αναφερόμενων φάσεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μετέπειτα αποτελεσματική διαχείρισή τους (Project Management Institute-PMI, 2021).

Κατά γενική αποδοχή, ο κύκλος ζωής ενός τεχνικού έργου περιλαμβάνει τα στάδια της έναρξης (initiation), του σχεδιασμού (planning), της εκτέλεσης (execution), της παρακολούθησης και ελέγχου (monitoring and controlling) και της ολοκλήρωσης (closing). Στα έργα υποδομών και στα κατασκευαστικά έργα, διακρίνεται επιπροσθέτως και η φάση της λειτουργίας και συντήρησης. Αυτό συμβαίνει ιδίως όταν εξετάζεται το έργο υπό το πρίσμα της βιωσιμότητας και της ανθεκτικότητας (ISO, 2018). Μάλιστα, άξιο αναφοράς είναι ότι έκαστο στάδιο συνοδεύεται από διαφορετικούς τύπους και επίπεδα επικινδυνότητας.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τη φάση της έναρξης, η επικινδυνότητα σχετίζεται κυρίως με τη σκοπιμότητα του έργου. Επίσης, σχετίζεται και με την επάρκεια των αρχικών μελετών και την ορθότητα των στρατηγικών αποφάσεων. Σε αυτό το στάδιο, η αβεβαιότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι δεν έχουν ακόμη

οριστικοποιηθεί τεχνικές λύσεις, προϋπολογισμοί ή χρονοδιαγράμματα. Σύμφωνα με τον Flyvbjerg (2014), πολλά μεγάλα έργα παρουσιάζουν συστηματικές υπερβάσεις κόστους και χρόνου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται σε εσφαλμένες αρχικές εκτιμήσεις, αλλά και στην υποτίμηση των κινδύνων, κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων. Επομένως, η πρόωμη αναγνώριση και αξιολόγηση κινδύνων καθίσταται κρίσιμη για τη βιωσιμότητα του έργου.

Εν συνεχεία, στη τη φάση του σχεδιασμού, οι κίνδυνοι καθίστανται πιο συγκεκριμένοι. Συνδέονται με τεχνικές επιλογές, προδιαγραφές, κανονιστικές απαιτήσεις και συμβατικούς όρους. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η αναγνώριση των κινδύνων (risk identification), η ανάλυση (risk analysis) και ο σχεδιασμός των αποκρίσεων (risk response planning) (PMI, 2021). Η ποιότητα των μελετών και η διατομεακή συνεργασία μεταξύ μηχανικών, οικονομικών συμβούλων και νομικών επηρεάζουν άμεσα το επίπεδο της επικινδυνότητας, το οποίο εν συνεχεία, μεταφέρεται στα εκάστοτε μετέπειτα στάδια.

Στη φάση της εκτέλεσης, η επικινδυνότητα αποκτά περισσότερο επιχειρησιακό χαρακτήρα. Πιο αναλυτικά, στο στάδιο αυτό, οι κίνδυνοι αφορούν την εργοταξιακή ασφάλεια, τεχνικές αστοχίες, καθυστερήσεις προμηθειών, ελλείψεις υλικών και ανθρώπινα σφάλματα. Στο σημείο αυτό, η θεωρία των οργανωσιακών ατυχημάτων του Reason (1997) αναφέρει ότι τα ατυχήματα σε πολύπλοκα συστήματα προκύπτουν από τη σύμπτωση ενεργών σφαλμάτων και λανθανουσών οργανωσιακών αδυναμιών. Επί παραδείγματι, στα εργοτάξια, η ελλιπής επίβλεψη, η ανεπαρκής εκπαίδευση ή η πίεση χρόνου αποτελούν παράγοντες που δύνανται να ενισχύσουν την πιθανότητα της εμφάνισης σοβαρών περιστατικών.

Κατόπιν, η φάση της παρακολούθησης και του ελέγχου λειτουργεί παράλληλα με την εκτέλεση. Μάλιστα, η φάση αυτή διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη δυναμική διαχείριση της επικινδυνότητας. Στο σημείο αυτό, βασικά στοιχεία της αποτελεσματικής διαχείρισης είναι η συνεχής επανεκτίμηση των κινδύνων, η παρακολούθηση των δεικτών απόδοσης και η προσαρμογή των σχεδίων αντιμετώπισης (Hopkin, 2018). Η εν λόγω προσέγγιση αντανάκλα τη δυναμική φύση του κινδύνου και ο λόγος είναι ότι οι συνθήκες του έργου μεταβάλλονται συνεχώς.

Κατά τη φάση της ολοκλήρωσης, οι κίνδυνοι σχετίζονται με τη διαδικασία παράδοσης. Επίσης, είναι συνυφασμένοι και με τη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές και τη

μεταβίβαση των επιμέρους ευθυνών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, ενδέχεται να ανακύψουν νομικοί ή συμβατικοί κίνδυνοι. Αυτό είναι ακόμα πιο πιθανό, όταν υπάρχουν διαφωνίες σχετικά με την ποιότητα ή το εύρος των εργασιών. Επιπλέον, στα έργα υποδομών, η φάση της λειτουργίας και συντήρησης εισάγει νέους κινδύνους. Οι νέοι αυτοί κίνδυνοι σχετίζονται με τη φθορά, την περιβαλλοντική επίδραση και την ανθεκτικότητα του έργου στις φυσικές καταστροφές (Aven & Renn, 2009).

Στις συνηθέστερες περιπτώσεις, η διαχείριση των κινδύνων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου ακολουθεί μία δομημένη διαδικασία. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με το ISO 31000 (ISO, 2018), η διαδικασία περιλαμβάνει την καθιέρωση του πλαισίου (establishing the context), την αναγνώριση, ανάλυση και αξιολόγηση των κινδύνων, την επιλογή και εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης, καθώς και την επικοινωνία και παρακολούθηση. Η εν λόγω προσέγγιση δεν είναι γραμμική, αλλά κυκλική και επαναληπτική. Έτσι, επιτρέπει την κατάλληλη και έγκαιρη προσαρμογή σε νέες πληροφορίες και στις εκάστοτε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Επίσης, σημαντικό είναι το γεγονός του ότι η επικινδυνότητα τείνει να είναι υψηλότερη στα πρώτα στάδια του έργου. Στα στάδια αυτά η αβεβαιότητα είναι μεγάλη, αλλά η δυνατότητα παρέμβασης και τροποποίησης είναι επίσης υψηλή. Αντιθέτως, όσο το έργο προχωρά, η αβεβαιότητα μειώνεται. Όμως, σε αυτήν την περίπτωση, το κόστος αλλαγών αυξάνεται σημαντικά. Η σχέση αυτή αποδεικνύει τη σημασία της έγκαιρης διαχείρισης κινδύνων και της ενσωμάτωσής της ήδη από τη φάση του αρχικού σχεδιασμού (PMI, 2021).

Άρα, εκ των ανωτέρω συνάγεται ότι ο κύκλος ζωής του τεχνικού έργου και τα στάδια διαχείρισης κινδύνων αποτελούν αλληλένδετες έννοιες. Αναλυτικότερα, η επικινδυνότητα δεν είναι στατική, αλλά ούτε περιορίζεται σε μία συγκεκριμένη φάση. Αντ' αυτού, εξελίσσεται παράλληλα με το έργο. Η αποτελεσματική διαχείρισή της προϋποθέτει συστηματική προσέγγιση, διεπιστημονική συνεργασία και συνεχή ανατροφοδότηση. Μόνο μέσω μίας ολοκληρωμένης και δυναμικής θεώρησης του κύκλου ζωής καθίσταται δυνατή η ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων, καθώς επίσης και η διασφάλιση της επιτυχούς ολοκλήρωσης των τεχνικών έργων.

2.3 Αντίληψη και αποδοχή κινδύνου

Η έννοια της αντίληψης του κινδύνου (risk perception) αποτελεί μία αξιοπρόσεκτη διάσταση της ανάλυσης της επικινδυνότητας. Η σημασία της είναι ακόμα μεγαλύτερη στα τεχνικά έργα, όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται συχνά υπό συνθήκες αβεβαιότητας, πίεσης χρόνου και υψηλής πολυπλοκότητας. Η αντίληψη του κινδύνου δεν ταυτίζεται με τον αντικειμενικό κίνδυνο, όπως αυτός αποτυπώνεται μέσω στατιστικών μοντέλων ή ποσοτικών εκτιμήσεων. Αντιθέτως, αφορά τον τρόπο με τον οποίο τα άτομα και οι οργανισμοί ερμηνεύουν και ανταποκρίνονται σε δυνητικές απειλές (Aven & Renn, 2009). Στο πλαίσιο των τεχνικών έργων, η διαφοροποίηση που υφίσταται μεταξύ της αντικειμενικής αξιολόγησης και της υποκειμενικής αντίληψης μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Ο Slovic (1987) υποστήριξε ότι οι άνθρωποι τείνουν να αξιολογούν τον κίνδυνο όχι μόνο βάσει πιθανότητας και συνεπειών, αλλά και βάσει παραγόντων, όπως η οικειότητα, ο βαθμός ελέγχου και η εθελοντικότητα της έκθεσης. Παραδείγματος χάριν, στα εργοτάξια οι εργαζόμενοι που έχουν εξοικειωθεί με επικίνδυνες διαδικασίες ενδέχεται να υποτιμούν τον πραγματικό κίνδυνο, θεωρώντας τον «συνηθισμένο» ή «διαχειρίσιμο». Η εν λόγω γνωστική εξοικείωση είναι πιθανόν να επιφέρει ως απότοκο τη μείωση της εγρήγορσης και την ταυτόχρονη αύξηση της πιθανότητας της πρόκλησης ατυχημάτων.

Επίσης, η αντίληψη του κινδύνου διαφοροποιείται και μεταξύ των διαφορετικών ομάδων ενδιαφερόμενων μερών. Για παράδειγμα, ο project manager, ο επενδυτής, ο τεχνικός επιβλέπων και ο εργαζόμενος στο εργοτάξιο ενδέχεται να αξιολογούν διαφορετικά τον ίδιο κίνδυνο. Πιο αναλυτικά, ένας οικονομικός κίνδυνος, όπως είναι η υπέρβαση του προϋπολογισμού, μπορεί να θεωρείται κρίσιμος για τον χρηματοδότη, ενώ ένας κίνδυνος ασφάλειας να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα για τον τεχνικό διευθυντή. Έτσι, διαμορφώνεται μία διαφοροποίηση, η οποία αναδεικνύει τη σημασία της επικοινωνίας κινδύνου και της δημιουργίας κοινού πλαισίου κατανόησης (Aven, 2016).

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η οργανωσιακή κουλτούρα. Σύμφωνα με τον Reason (1997), οι οργανισμοί που προάγουν μία οργανωσιακή κουλτούρα ασφάλειας (safety culture) ενθαρρύνουν τη διαφάνεια και την αναφορά συμβάντων, καθώς επίσης και τη συνεχή μάθηση εκ των σφαλμάτων που έχουν ήδη γίνει. Σε τέτοια περιβάλλοντα,

η αντίληψη του κινδύνου τείνει να είναι πιο ρεαλιστική. Την ίδια στιγμή, καταλήγει να είναι λιγότερο επηρεασμένη από υπερβολική αυτοπεποίθηση ή από τον φόβο της απόδοσης ευθυνών. Αντιθέτως, στους οργανισμούς όπου κυριαρχεί κουλτούρα επίρριψης ευθυνών ή πίεσης για ταχεία ολοκλήρωση έργων, οι κίνδυνοι ενδέχεται να υποβαθμίζονται ή να ακόμα και να αποκρύπτονται.

Η αποδοχή του κινδύνου (risk acceptance) αποτελεί το επόμενο στάδιο μετά την αντίληψη και την αξιολόγησή του. Πιο αναλυτικά, στο πλαίσιο της διαχείρισης κινδύνων, η αποδοχή είναι μία συνειδητή απόφαση για το να μην εφαρμοστούν περαιτέρω μέτρα μείωσης, όταν ο κίνδυνος θεωρείται εντός αποδεκτών ορίων (ISO, 2018). Στα τεχνικά έργα, η αποδοχή του κινδύνου μπορεί να βασίζεται σε μία ανάλυση κόστους-οφέλους, επί της οποίας το κόστος αντιμετώπισης υπερβαίνει το δυνητικό όφελος που προκύπτει από τη μείωση της πιθανότητας ή της σοβαρότητας του συμβάντος.

Ωστόσο, η έννοια των «αποδεκτών επιπέδων κινδύνου» είναι σχετική και εξαρτάται από κανονιστικά πλαίσια, κοινωνικές προσδοκίες και ηθικές παραμέτρους. Στα έργα υψηλού κοινωνικού αντίκτυπου, όπως επί παραδείγματι στις γέφυρες, στις σήραγγες ή στις ενεργειακές υποδομές, τα όρια αποδοχής κινδύνου είναι ιδιαίτερα αυστηρά. Η κοινωνία ενδέχεται να μην αποδέχεται ούτε μικρές πιθανότητες καταστροφικών συνεπειών, ακόμη και αν αυτές είναι στατιστικά σπάνιες (Aven & Renn, 2009).

Η εν λόγω διάσταση συνδέεται με την έννοια της κοινωνικής άδειας λειτουργίας (social license to operate). Η έννοια αυτή οποία επηρεάζει και τη βιωσιμότητα ενός έργου (Aven & Renn, 2009).

Επίσης, η αποδοχή του κινδύνου σχετίζεται με τη στρατηγική που ακολουθείται από την πλευρά ενός οργανισμού. Ορισμένοι οργανισμοί εμφανίζουν μεγαλύτερη ανοχή στην αβεβαιότητα, και δη, όταν επιδιώκουν καινοτομία ή ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις, ενδέχεται να αναλαμβάνονται υψηλότερα επίπεδα κινδύνου με προσδοκία μεγαλύτερων αποδόσεων. Ωστόσο, η υπερβολική ανοχή είναι πιθανόν να οδηγήσει σε συστηματική υποεκτίμηση κινδύνων. Επίσης, μπορεί να προκαλέσει σε σοβαρές αποτυχίες στα έργα, όπως έχει επισημανθεί σε αναλύσεις έργων μεγάλου βεληνεκούς, στη μελέτη του Flyvbjerg (2014).

Επιπλέον, η αντίληψη και αποδοχή κινδύνου επηρεάζονται από τη διαθεσιμότητα της πληροφορίας και από τα επίπεδα της διαφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση

σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων και συστημάτων παρακολούθησης μπορεί να ενισχύσει την αντικειμενικότητα της αξιολόγησης. Παράλληλα, μπορεί να μειώσει τις γνωστικές στρεβλώσεις. Παρά ταύτα, ακόμη και τα πλέον προηγμένα τεχνολογικά μέσα δεν εξαλείφουν τον ρόλο της ανθρώπινης κρίσης. Σε κάθε περίπτωση, η ανθρώπινη κρίση παραμένει κομβικής σημασίας στη λήψη αποφάσεων (Hopkin, 2018).

2.4 Εργαλεία πρόληψης και ασφάλειας εργοταξίων (safety management systems)

Όπως ήδη αναφέρθηκε από την ανάλυση που προηγήθηκε στο παρόν κεφάλαιο, τα εργοτάξια χαρακτηρίζονται από υψηλή πολυπλοκότητα. Πέραν της πολυπλοκότητας, χαρακτηρίζονται από ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών εργασιών, από τη χρήση βαρέως εξοπλισμού και από τη συνεχή αλληλεπίδραση ανθρώπινων και τεχνικών παραγόντων. Ως εκ τούτου, η πρόληψη των ατυχημάτων και η συστηματική διαχείριση της ασφάλειας δεν είναι δυνατόν να βασίζεται σε αποσπασματικά μέτρα. Αντιθέτως, απαιτεί την υιοθέτηση ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης ασφάλειας (Safety Management Systems, SMS).

Τα συστήματα διαχείρισης ασφάλειας αποτελούν δομημένα πλαίσια πολιτικών, διαδικασιών και πρακτικών. Σκοπός τους είναι η συστηματική αναγνώριση, αξιολόγηση και έλεγχος των κινδύνων, που σχετίζονται με την εργοταξιακή δραστηριότητα. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με το ISO 45001, το οποίο αποτελεί διεθνές πρότυπο για τη διαχείριση της υγείας και ασφάλειας στην εργασία, η ασφάλεια δεν εκλαμβάνεται ως μία διακριτή τεχνική απαίτηση. Παρουσιάζεται ως αναπόσπαστο στοιχείο της στρατηγικής και της οργανωσιακής κουλτούρας (International Organization for Standardization-ISO, 2018). Η ενσωμάτωση της ασφάλειας στη διοικητική δομή του έργου συμβάλλει στη μείωση των ατυχημάτων, αλλά και στη βελτίωση της εν γένει απόδοσης.

Κεντρικό στοιχείο των εν λόγω συστημάτων αποτελεί η εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου (risk assessment). Στο πλαίσιο αυτό, εντοπίζονται οι επικίνδυνες δραστηριότητες, όπως είναι η εργασία σε μεγάλο ύψος, η χρήση γερανών και η πραγματοποίηση εκσκαφών. Επίσης, αξιολογείται η πιθανότητα και η σοβαρότητα πιθανών συμβάντων και καθορίζονται τα κατάλληλα προληπτικά μέτρα. Η διαδικασία

αυτή απαιτεί συνεχή αναθεώρηση, ιδίως όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες του έργου ή σε περίπτωση κατά την οποία εισάγονται και εφαρμόζονται νέες τεχνικές (Hopkin, 2018).

Ένα επιπλέον βασικό εργαλείο πρόληψης είναι η ανάλυση ασφάλειας εργασίας (Job Safety Analysis, JSA). Μέσω αυτής κάθε δραστηριότητα αναλύεται σε επιμέρους βήματα και εντοπίζονται οι σχετικοί κίνδυνοι. Κατόπιν, προσδιορίζονται τα μέτρα ελέγχου που πρόκειται να εφαρμοστούν. Η συγκεκριμένη προσέγγιση συμβάλλει στην ενίσχυση της προληπτικής κουλτούρας. Ο λόγος έγκειται στο ότι αποδίδει έμφαση στη λεπτομερή κατανόηση των κινδύνων, πριν από την έναρξη της εργασίας.

Συν τοις άλλοις, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στα προγράμματα εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης του απασχολούμενου ανθρώπινου δυναμικού. Πιο αναλυτικά, η θεωρία των οργανωσιακών ατυχημάτων του Reason (1997) αναφέρει ότι τα ατυχήματα σπάνια αποτελούν απότοκο ενός μόνο λάθους. Αντιθέτως, προκύπτουν από τη συνύπαρξη ενεργών σφαλμάτων και λανθανουσών αδυναμιών του συστήματος. Δεδομένου αυτού, η επαρκής εκπαίδευση, η σαφής κατανομή ρόλων και η ενθάρρυνση της αναφοράς «παρ' ολίγον» συμβάντων (near-miss reporting) ενισχύουν τη δυνατότητα που έχει ένας οργανισμός στον εντοπίζει, αλλά και να διορθώνει ενδεχόμενες αδυναμίες, πριν αυτές καταλήξουν να προκαλέσουν σοβαρά περιστατικά.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι διαδικασίες εσωτερικού ελέγχου και επιθεώρησης (safety audits and inspections). Πιο αναλυτικά, μέσω τακτικών επιθεωρήσεων διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές. Παράλληλα, εντοπίζονται ενδεχόμενες αποκλίσεις από τα καθορισμένα πρότυπα ασφαλείας. Η διαδικασία αυτή ενισχύει τη λογοδοσία και την ίδια στιγμή, συμβάλλει στη συνεχή βελτίωση του συστήματος διαχείρισης ασφάλειας (ISO, 2018).

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η ψηφιοποίηση έχει ενισχύσει σημαντικά τα εργαλεία πρόληψης. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση Building Information Modeling (BIM) επιτρέπει την προσομοίωση επικίνδυνων σεναρίων πριν από την έναρξη της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται ο εντοπισμός των συγκρούσεων και των επικίνδυνων διατάξεων που υπάρχουν στον χώρο (Venter et al., 2021).

Παράλληλα, όπως αναφέρουν οι Venter et al. (2021), η αξιοποίηση αισθητήρων και φορητών συσκευών (wearables) επιτρέπει την παρακολούθηση ιδιαίτερων συνθηκών.

Επί παραδείγματι, μέσω των συσκευών αυτών καθίσταται εφικτή η παρακολούθηση της θερμοκρασίας, των επιπέδων έκθεσης στον θόρυβο ή διαφόρων επικίνδυνων κινήσεων. Έτσι, ενισχύεται η διαχείριση του κινδύνου ακόμα και σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, η κουλτούρα ασφάλειας (safety culture) αποτελεί καθοριστικό παράγοντα αποτελεσματικότητας των συστημάτων πρόληψης. Ακόμη και το πιο εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσει αποτελεσματικά, χωρίς ενεργή δέσμευση της διοίκησης και συμμετοχή των εργαζομένων. Η ηγεσία του έργου, λοιπόν, οφείλει να προάγει περιβάλλον εμπιστοσύνης. Στο περιβάλλον αυτό, η αναφορά των κινδύνων δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένδειξη αδυναμίας, αλλά ως συμβολή στη συλλογική ασφάλεια (Aven, 2016).

Τέλος, η οικονομική διάσταση της ασφάλειας είναι επίσης σημαντική. Τα ατυχήματα δεν συνεπάγονται μόνο ανθρώπινο κόστος, αλλά έχουν και οικονομικές επιπτώσεις όπως καθυστερήσεις, αποζημιώσεις, αλλά και την απώλεια φήμης. Για τον λόγο αυτόν είναι σημαντική η επένδυση προς συστήματα πρόληψης, η οποία καταλήγει να είναι μακροπρόθεσμα οικονομικά συμφέρουσα, για τον λόγο του ότι μειώνει την πιθανότητα της πρόκλησης σοβαρών διαταραχών του έργου.

2.5 Εμπλοκή ενδιαφερομένων και επικοινωνία κινδύνου

Η διαχείριση κινδύνου στα τεχνικά έργα δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνική ή διοικητική διαδικασία. Πέραν αυτού, συνδέεται άμεσα με τη διαχείριση των ενδιαφερόμενων μερών (stakeholders), αλλά και με την αποτελεσματική επικοινωνία κινδύνου. Τα τεχνικά έργα, ιδίως τα μεγάλης κλίμακας έργα υποδομών, επηρεάζουν και επηρεάζονται από ένα ευρύ φάσμα φορέων. Οι φορείς αυτοί είναι οι δημόσιες αρχές, οι επενδυτές, οι τεχνικοί σύμβουλοι, το απασχολούμενο ανθρώπινο δυναμικό, οι τοπικές κοινωνίες και οι ρυθμιστικές αρχές. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά την εμπλοκή των ενδιαφερομένων κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας του έργου (Project Management Institute-PMI, 2021).

Η θεωρία των ενδιαφερομένων μερών υποστηρίζει ότι κάθε έργο οφείλει να λαμβάνει υπόψιν τις ανάγκες, τις προσδοκίες και τις αντιλήψεις όλων των εμπλεκόμενων ομάδων. Ειδικότερα δε, στο πλαίσιο της διαχείρισης κινδύνου, οι διαφορετικές ομάδες ενδέχεται να αξιολογούν τον ίδιο κίνδυνο με διαφορετικό τρόπο. Επί παραδείγματι, ένας περιβαλλοντικός κίνδυνος δύναται να θεωρείται δευτερεύων από τον τεχνικό

σχεδιαστή. Όμως μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικός από την τοπική κοινωνία. Η διάσταση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της συμμετοχικής διαδικασίας και της διαφανούς ενημέρωσης (Aven & Renn, 2009).

Κατόπιν, η επικοινωνία του κινδύνου (risk communication) αναφέρεται στη διαδικασία της ανταλλαγής πληροφοριών και απόψεων, σχετικά με κινδύνους μεταξύ ειδικών και μη ειδικών, οργανισμών και κοινωνίας. Δεν πρόκειται απλώς για μία μεταφορά τεχνικών δεδομένων. Αντιθέτως, πρόκειται για μία αμφίδρομη διαδικασία διαλόγου. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στην κατανόηση, στη διαμόρφωση εμπιστοσύνης και στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (Aven, 2016). Στα τεχνικά έργα, η έλλειψη της αποτελεσματικής επικοινωνίας μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις, αλλά και σε καθυστερήσεις ή ακόμα και σε μείωση των επιπέδων της κοινωνικής αποδοχής.

Όσον αφορά τη σημασία της επικοινωνίας κινδύνου, καθίσταται ιδιαίτερα εμφανής σε έργα που φέρουν έντονο κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου είδους έργων είναι τα φράγματα, οι αυτοκινητόδρομοι ή οι ενεργειακές εγκαταστάσεις. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις, η αντίληψη του κινδύνου από το κοινό ενδέχεται να διαφέρει σε σημαντικό βαθμό από την τεχνική αξιολόγηση. Σύμφωνα με τον Slovic (1987), οι πολίτες έχουν την τάση να δίνουν μεγαλύτερη έμφαση σε κινδύνους, που θεωρούν μη ελεγχόμενους, αόρατους ή δυνητικά καταστροφικούς. Άρα, αυτό συνεπάγεται το ότι η επιτυχής υλοποίηση ενός έργου δεν εξαρτάται μόνο από την αντικειμενική μείωση του κινδύνου. Εξαρτάται και από την αποτελεσματική διαχείριση της κοινωνικής διάστασης που αυτό έχει.

Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι η ενεργός συμμετοχή και εμπλοκή των ενδιαφερομένων ενσωματώνεται πλέον σε διεθνή πρότυπα διαχείρισης κινδύνου. Πιο αναλυτικά, το ISO 31000 (ISO, 2018) τονίζει ότι η επικοινωνία και διαβούλευση αποτελούν βασικό στοιχείο της διαδικασίας της διαχείρισης κινδύνου σε όλα τα στάδια. Η ενεργή συμμετοχή των εμπλεκόμενων συμβάλλει στην πληρέστερη αναγνώριση των κινδύνων και στην κατανόηση των επιπτώσεών τους. Επίσης, συντελεί στη διαμόρφωση ρεαλιστικών στρατηγικών αντιμετώπισης.

Συν τοις άλλοις, η ενεργός συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών ενισχύει τη διαφάνεια και τη λογοδοσία. Στα έργα που χρηματοδοτούνται από δημόσιους πόρους ή διεθνείς οργανισμούς, η διαφανής παρουσίαση κινδύνων και μέτρων αντιμετώπισης αποτελεί αναγκαία απαίτηση. Σε περίπτωση κατά την οποία απουσιάζει η διαφάνεια,

αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κρίση της εμπιστοσύνης, αλλά και σε ενδεχόμενες καθυστερήσεις λόγω κοινωνικών αντιδράσεων ή νομικών προσφυγών (Flyvbjerg, 2014).

Στο εσωτερικό του έργου, η επικοινωνία του κινδύνου μεταξύ των μελών της ομάδας έργου είναι εξίσου σημαντική. Στο σημείο αυτό, ομιλούμε για την σωστή κατανομή των ρόλων, την τακτική ενημέρωση για νέους ή μεταβαλλόμενους κινδύνους, αλλά και για την ενθάρρυνση της αναφοράς προβλημάτων. Πρόκειται για ένα σύνολο δράσεων, οι οποίες σωρευτικά συμβάλλουν στη δημιουργία κουλτούρας πρόληψης. Σε περίπτωση κατά την οποία εκλείπει η αποτελεσματική εσωτερική επικοινωνία, αυτό είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αποσπασματική κατανόηση της επικινδυνότητας, αλλά και σε ασυντόνιστες ενέργειες αντιμετώπισης των κινδύνων (Hopkin, 2018).

Επίσης, η ψηφιοποίηση έχει επηρεάσει τη διαχείριση ενδιαφερομένων και την επικοινωνία κινδύνου. Στην προκειμένη περίπτωση, αναφερόμαστε στη χρήση ψηφιακών πλατφορμών, dashboards και συστημάτων αναφοράς. Πρόκειται για δράσεις που εμπίπτουν στο πλαίσιο της ψηφιοποίησης, η οποία επιτρέπει την άμεση διάχυση πληροφοριών και τη διαφάνεια στην παρακολούθηση των κρίσιμων δεικτών. Παρά ταύτα, η τεχνολογία σε καμία περίπτωση δεν είναι σε θέση να υποκαταστήσει την ανάγκη που υπάρχει για ουσιαστικό διάλογο και ενεργή συμμετοχή των διαφορετικών εμπλεκόμενων μερών.

2.6 Ο ρόλος του project manager και της οργανωσιακής κουλτούρας

Ο ρόλος του project manager στη διαχείριση των κινδύνων των τεχνικών έργων είναι πολυδιάστατος. Πρόκειται για έναν ρόλο στρατηγικής σημασίας. Ο λόγος για τον οποίο ο ρόλος του project manager χαρακτηρίζεται έτσι είναι το ότι συνδέει τον τεχνικό σχεδιασμό με τη διοικητική λειτουργία και την οργανωσιακή συμπεριφορά.

Στο σημείο αυτό, υπενθυμίζεται ότι η διαχείριση κινδύνου δεν αποτελεί απλώς την εφαρμογή μεθοδολογικών εργαλείων, αλλά είναι μία διαδικασία που απαιτεί ηγεσία, κρίση και ικανότητα λήψης αποφάσεων, υπό συνθήκες που χαρακτηρίζονται από αυξημένα επίπεδα βεβαιότητας. Σύμφωνα με τους Turner & Müller (2005), το στυλ ηγεσίας του project manager επηρεάζει άμεσα την επιτυχία του έργου. Αυτό, μάλιστα, είναι ακόμα εντονότερο στην περίπτωση περιβαλλόντων που χαρακτηρίζονται από υψηλή περιπλοκότητά και αυξημένη μεταβλητότητα. Έτσι, η ικανότητα του

επικεφαλής να καλλιεργεί τη συνεργασία, την εμπιστοσύνη και την κοινή και αμοιβαία κατανόηση των κινδύνων καθίσταται κρίσιμος παράγοντας για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους.

Στα τεχνικά έργα, ο project manager λειτουργεί ως συντονιστής μεταξύ των διαφορετικών επαγγελματικών ομάδων. Για παράδειγμα, project manager καταλήγει να συντονίζει τους μηχανικούς, τους συμβούλους, τους νομικούς, αλλά και τους υπεύθυνους ασφαλείας μεταξύ τους. Δεδομένου του ρόλου του, λοιπόν, η αποτελεσματική ενσωμάτωση της διαχείρισης του κινδύνου στον συνολικό σχεδιασμό του έργου απαιτεί αφενός τεχνικές δεξιότητες και αφετέρου ανεπτυγμένες κοινωνικές και επικοινωνιακές ικανότητες. Το Project Management Institute (2021) επισημαίνει ότι η διαχείριση των κινδύνων αποτελεί βασικό γνωστικό πεδίο της διοίκησης έργων, το οποίο διατρέχει οριζόντια όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Ωστόσο, η επιτυχία της διαδικασίας αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του project manager να διασφαλίσει ότι οι αναγνωρισμένοι κίνδυνοι δεν παραμένουν σε θεωρητικά επίπεδα, αλλά μπορούν να μεταφραστούν σε συγκεκριμένες πρακτικές ενέργειες πρόληψης και ελέγχου.

Αξιοσημείωτο είναι το ότι η οργανωσιακή κουλτούρα αποτελεί τον ευρύτερο θεσμικό και αξιακό πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργεί ο project manager. Στο σημείο αυτό, ο Schein (2010) ορίζει την οργανωσιακή κουλτούρα ως το σύνολο κοινών παραδοχών, αξιών και προτύπων συμπεριφοράς που διαμορφώνουν τον τρόπο με τον οποίο τα μέλη ενός οργανισμού αντιλαμβάνονται και αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που προκύπτουν. Στο πεδίο της διαχείρισης του κινδύνου, η οργανωσιακή κουλτούρα που επικρατεί επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο αναγνωρίζονται οι απειλές, αναφέρονται τα σφάλματα και λαμβάνονται οι αποφάσεις, ακόμα και υπό πίεση. Στους οργανισμούς που έχουν ανεπτυγμένη κουλτούρα ασφάλειας, οι εργαζόμενοι ενθαρρύνονται να αναφέρουν τους κινδύνους και να συμμετέχουν ενεργά στη βελτίωση των διαδικασιών. Αντιθέτως, σε περιβάλλοντα όπου κυριαρχεί φόβος της επίρριψης ευθυνών, οι κίνδυνοι συχνά αποκρύπτονται ή υποβαθμίζονται, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

Η έννοια της κουλτούρας ασφάλειας έχει αναλυθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία και αναφέρθηκε προηγουμένως στο παρόν κεφάλαιο. Ο Guldenmund (2000) επισημαίνει ότι η κουλτούρα ασφάλειας δεν περιορίζεται σε τυπικούς κανονισμούς,

αλλά αντανακλά βαθύτερες αντιλήψεις σχετικά με την αξία της πρόληψης και της συμμόρφωσης. Παράλληλα, ο Zohar (2010) τονίζει ότι το «κλίμα ασφάλειας» εντός μία ομάδας, αποτελεί την κοινή αντίληψη για τη σημασία της ασφάλειας και επηρεάζει άμεσα τις συμπεριφορές των εργαζομένων και τη συχνότητα ατυχημάτων. Στα τεχνικά έργα, οι συνθήκες εργασίας μεταβάλλονται διαρκώς και για τον λόγο αυτόν, η διαμόρφωση θετικού κλίματος ασφάλειας συμβάλλει στη μείωση επικίνδυνων πρακτικών. Παράλληλα, συμβάλλει και στη βελτίωση της συμμόρφωσης των εμπλεκόμενων μερών με τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν.

Η συμβολή του project manager στην καλλιέργεια της κατάλληλης οργανωσιακής κουλτούρας είναι καθοριστικής σημασίας. Πιο αναλυτικά, η ηγεσία που βασίζεται στη διαφάνεια, στη συμμετοχικότητα και στη μάθηση από τα λάθη, ενισχύει την ικανότητα του οργανισμού να προσαρμόζεται σε απρόβλεπτες συνθήκες. Η έννοια της «ψυχολογικής ασφάλειας», όπως αναλύεται από την Edmondson (1999), αναφέρεται στο περιβάλλον επί του οποίου τα μέλη της ομάδας αισθάνονται ελεύθερα να εκφράζουν ανησυχίες ή να επισημαίνουν σφάλματα χωρίς να έχουν τον φόβο των αρνητικών συνεπειών. Μάλιστα, στα έργα υψηλής επικινδυνότητας, η ύπαρξη ψυχολογικής ασφάλειας ενισχύει την έγκαιρη αναγνώριση των προβλημάτων. Επίσης, μειώνει την πιθανότητα σοβαρών αποτυχιών.

Επιπλέον, η διαχείριση του κινδύνου επηρεάζεται από τον βαθμό ωριμότητας του οργανισμού σε θέματα διοίκησης των έργων. Οι οργανισμοί που χαρακτηρίζονται από ανεπτυγμένες δομές διακυβέρνησης και ακολουθούν σαφείς διαδικασίες ενώ έχουν μία οργανωσιακή κουλτούρα συνεχούς βελτίωσης, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα πρόληψης και διαχείρισης απρόβλεπτων γεγονότων. Η εν λόγω ωριμότητα δεν αφορά μόνο την ύπαρξη διαδικασιών. Πέραν αυτού, αφορά και τη συνεπή εφαρμογή τους, καθώς και τη δέσμευση της διοίκησης στην τήρηση υψηλών προτύπων (Teo et al., 2005).

Σε διεθνή ή πολυπολιτισμικά έργα, η οργανωσιακή κουλτούρα επηρεάζεται και από εθνικές πολιτισμικές διαφορές. Εδώ, ο Hofstede (2001) έχει δείξει ότι οι διαφορές στις αξίες, όπως είναι επί παραδείγματι η αποδοχή ιεραρχίας ή η ανοχή στην αβεβαιότητα, επηρεάζουν τη στάση απέναντι στον κίνδυνο. Η κατανόηση αυτών των διαφορών είναι σημαντική για τον project manager, διότι κατόπιν αυτής μπορεί να είναι σε θέση να

διαμορφώσει αποτελεσματικές στρατηγικές επικοινωνίας και διαχείρισης των κινδύνων.

2.7 Η σχέση της επικινδυνότητας με την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο στα τεχνικά έργα

Η επικινδυνότητα στα τεχνικά έργα συνδέεται άρρηκτα με τις τρεις βασικές διαστάσεις της απόδοσης ενός έργου. Αναλυτικότερα, πρόκειται για την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο ολοκλήρωσης. Οι τρεις αυτές μεταβλητές αναφέρονται ως «τριπλός περιορισμός» (triple constraint) της διοίκησης των έργων. Πρόκειται για το βασικό πλαίσιο αξιολόγησης της επιτυχίας ενός έργου (Project Management Institute-PMI, 2021).

Όπως αναφέρουν οι Hurtado-Martell & Ros (2025), η ύπαρξη και η μη αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων δύνανται να διαταράξουν την ισορροπία μεταξύ αυτών των διαστάσεων, οδηγώντας σε υπερβάσεις κόστους, καθυστερήσεις και υποβάθμιση της ποιότητας.

Η διάσταση του κόστους είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην εμφάνιση των κινδύνων. Πιο αναλυτικά, οι απρόβλεπτες τεχνικές δυσκολίες, οι καθυστερήσεις στις προμήθειες, οι μεταβολές στις τιμές πρώτων υλών και οι νομικές διαφορές είναι δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικές υπερβάσεις στον προϋπολογισμό. Ο Flyvbjerg (2014), ο οποίος στη μελέτη του συμπεριλαμβάνει έργα υποδομών μεγάλου βεληνεκούς, έδειξε ότι οι υπερβάσεις κόστους αποτελούν συστηματικό φαινόμενο και συνδέονται με ανεπαρκή αρχική εκτίμηση κινδύνων και υπεραισιόδοξες προβλέψεις. Η υποεκτίμηση της επικινδυνότητας, κατά τα πρώτα στάδια του έργου, μεταφέρεται σωρευτικά στις επόμενες φάσεις. Έτσι, αποτελεί έναν επιβαρυντικό παράγοντα για τον συνολικό οικονομικό σχεδιασμό του έργου.

Αντίστοιχα, ο χρόνος ολοκλήρωσης επηρεάζεται άμεσα από την εξέλιξη των κινδύνων. Επί παραδείγματι μπορεί να συμβούν τεχνικές αστοχίες, να υπάρχει ελλιπής συντονισμός, να διαμεσολαβήσουν περιβαλλοντικά γεγονότα ή διοικητικές καθυστερήσεις. Όλα αυτά μπορούν να επιμηκύνουν σε σημαντικό βαθμό το χρονοδιάγραμμα της υλοποίησης ενός έργου (Kerzner, 2017).

Ωστόσο, η καθυστέρηση, δεν αποτελεί μόνο ζήτημα χρονικής απόκλισης. Συχνά συνεπάγεται και πρόσθετο κόστος, όπως επί παραδείγματι ποινικές ρήτρες, αυξημένα λειτουργικά έξοδα και απώλεια ευκαιριών. Σύμφωνα με τον Kerzner (2017), η διαχείριση του χρόνου και του κινδύνου πρέπει να λειτουργούν συμπληρωματικά. Ο λόγος για τον οποίο αυτό είναι απαραίτητο είναι ότι κάθε μεταβολή στο χρονοδιάγραμμα ενδέχεται να δημιουργήσει νέο κύκλο αβεβαιότητας.

Επίσης, η ποιότητα του έργου αποτελεί μία αξιοσημείωτη μεταβλητή. Πιο αναλυτικά, η ποιότητα του έργου επηρεάζεται από τα επίπεδα της επικινδυνότητας. Για παράδειγμα, η πίεση για μείωση κόστους ή για την επιτάχυνση του χρονοδιαγράμματος μπορεί να οδηγήσει σε συμβιβασμούς ως προς τις τεχνικές προδιαγραφές και τα πρότυπα κατασκευής. Σε περιπτώσεις, επί των οποίων οι κίνδυνοι δεν έχουν προβλεφθεί επαρκώς, η αντιμετώπισή τους ενδέχεται να γίνει με προσωρινές ή ανεπαρκείς λύσεις. Αυτό, με τη σειρά του, δεν αφήνει ανεπηρέαστη τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα και λειτουργικότητα του έργου. Στο θέμα αυτό, οι Love et al. (2011) υποστηρίζουν ότι οι τεχνικές αστοχίες και τα κατασκευαστικά σφάλματα συνδέονται με ελλιπή διαχείριση κινδύνων, αλλά και με ανεπαρκή έλεγχο της ποιότητας.

Η αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ του κόστους, του χρόνου και της ποιότητας είναι δυναμική και συχνά συγκρουσιακή. Αυτό σημαίνει ότι η ενίσχυση μίας διάστασης ενδέχεται να επιφέρει επιβάρυνση σε μία άλλη. Για παράδειγμα, η αύξηση των επενδύσεων στα προληπτικά μέτρα ασφάλειας και ελέγχου ποιότητας είναι πιθανόν να αυξήσει το αρχικό κόστος. Τη ίδια στιγμή, όμως, είναι εξίσου πιθανόν να μειώσει τον κίνδυνο σοβαρών αστοχιών και μελλοντικών δαπανών. Αντιθέτως, η υπερβολική συρρίκνωση του χρονοδιαγράμματος μπορεί να εντείνει την πιθανότητα της πραγματοποίησης λαθών και να αυξήσει το εν γένει ρίσκο του έργου. Η διαχείριση κινδύνων λειτουργεί ως ένας μηχανισμός εξισορρόπησης των παραμέτρων αυτών.

Κατόπιν, η έννοια της αξίας (value) εισάγει μία ακόμη διάσταση στη συζήτηση. Στο πλαίσιο αυτό, η επιτυχία ενός έργου δεν αποτιμάται μόνο με βάση τη συμμόρφωση σε προκαθορισμένα όρια κόστους και χρόνου. Αποτιμάται και με βάση την ικανότητά του να παράγει μακροπρόθεσμη αξία και βιωσιμότητα. Ο Atkinson (1999) επισημαίνει ότι η παραδοσιακή προσέγγιση του «τριγώνου» της επιτυχίας είναι περιορισμένη, σε περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψιν και άλλοι παράγοντες. Για παράδειγμα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν η ικανοποίηση των ενδιαφερομένων μερών και η στρατηγική

συμβολή του έργου. Άρα, η διαχείριση των κινδύνων οφείλει να ενσωματώνει ευρύτερα αξιολογικά κριτήρια.

Η σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση έργων αναγνωρίζει ότι η επικινδυνότητα δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται αποσπασματικά σε σχέση με τις υπόλοιπες λειτουργίες. Αντ' αυτού, πρέπει αλλά να ενσωματώνεται σε όλες τις διαδικασίες σχεδιασμού και ελέγχου. Το ISO 31000 (International Organization for Standardization, 2018) τονίζει ότι η διαχείριση κινδύνου πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διακυβέρνησης και του στρατηγικού σχεδιασμού. Στο πλαίσιο αυτό, η παρακολούθηση των κινδύνων συνδέεται αρρήκτως με δείκτες κόστους, προόδου και ποιότητας. Έτσι, επιτρέπεται η έγκαιρη παρέμβαση.

Επιπλέον, η ψηφιοποίηση και η χρήση εργαλείων προσομοίωσης, όπως είναι επί παραδείγματι η ανάλυση Monte Carlo που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, επιτρέπουν την ποσοτική εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων κινδύνων, τόσο σε κόστος, όσο και σε χρόνο. Πιο αναλυτικά, μέσω σεναρίων και πιθανοκρατικών μοντέλων, οι διαχειριστές των έργων έχουν τη δυνατότητα να εκτιμήσουν εύρη αποκλίσεων και να σχεδιάσουν εναλλακτικές στρατηγικές. Η ενσωμάτωση τέτοιων εργαλείων ενισχύει τη λήψη αποφάσεων που βασίζονται σε συγκεκριμένα τεκμήρια. Μάλιστα, περιορίζει την επίδραση της αβεβαιότητας.

Επομένως, κριτικά αξιολογώντας την ανάλυση της παρούσας ενότητας, διαπιστώνεται ότι η επικινδυνότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει τις διαστάσεις ποιότητας, κόστους και χρόνου στα τεχνικά έργα. Η αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων, λοιπόν, δεν περιορίζεται στην αποφυγή αρνητικών συνεπειών. Πέραν αυτού, συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης και στη δημιουργία βιώσιμης αξίας. Το να υπάρξει μία ισορροπημένη αντιμετώπιση των τριών παραμέτρων, υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας, αποτελεί και την πλέον βασική προϋπόθεση για την επιτυχή ολοκλήρωση των σύνθετων τεχνικών έργων.

Για λόγους πληρέστερης κατανόησης, παρατίθεται ο κάτωθι πίνακας, στον οποίο συνοψίζονται οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν στο παρόν κεφάλαιο:

Πίνακας 1. Συνοπτική παρουσίαση θεωρητικών προσεγγίσεων της επικινδυνότητας

Πηγή	Κύρια θέση
Aven (2016)	Η επικινδυνότητα αποτελεί πολυδιάστατη έννοια που περιλαμβάνει την αβεβαιότητα, τις συνέπειες και το οργανωσιακό και κοινωνικό πλαίσιο. Η απλή ποσοτικοποίηση της πιθανότητας και της συνέπειας δεν επαρκεί, χωρίς να ακολουθείται ταυτόχρονα από τη συνεκτίμηση της ευαλωτότητας και της ικανότητας ανάκαμψης.
Genc (2023)	Τα τεχνικά έργα χαρακτηρίζονται από υψηλή τεχνολογική πολυπλοκότητα, μεγάλα χρηματοοικονομικά μεγέθη και πολλαπλούς εμπλεκόμενους φορείς.
International Organization for Standardization, ISO (2018)	Ο κίνδυνος ορίζεται ως «η επίδραση της αβεβαιότητας στους στόχους». Η διαχείριση του κινδύνου αποτελεί κυκλική και επαναληπτική διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει αναγνώριση, ανάλυση, αξιολόγηση και παρακολούθηση.
Soytu et al. (2021)	Η επικινδυνότητα στα τεχνικά έργα είναι δυνατόν να έχει και θετικές αποκλίσεις, όπως είναι η ταχύτερη υλοποίηση ή η εξοικονόμηση των πόρων.
Aven & Renn (2009)	Διακρίνεται ο αντικειμενικός από τον υποκειμενικό κίνδυνο. Η αντίληψη των εμπλεκόμενων επηρεάζει τη στρατηγική της διαχείρισης. Διαφαίνεται η σημασία της ολοκληρωμένης διακυβέρνησης του κινδύνου.
Flyvbjerg (2014)	Τα μεγάλα έργα εμφανίζουν συστηματικές υπερβάσεις κόστους και χρόνου και αυτό γίνεται λόγω της υποτίμησης των κινδύνων και της αβεβαιότητας.
Project Management Institute, PMI (2021)	Ο κύκλος ζωής του έργου περιλαμβάνει διακριτά στάδια, ενώ η διαχείριση του κινδύνου διατρέχει οριζόντια όλες τις φάσεις. Η επιτυχία αξιολογείται μέσω του «τριπλού περιορισμού» (κόστος, χρόνος, ποιότητα).
Reason (1997)	Τα ατυχήματα στα πολύπλοκα συστήματα προκύπτουν από έναν συνδυασμό ενεργών σφαλμάτων και λανθανουσών οργανωσιακών αδυναμιών. Η κουλτούρα ασφάλειας είναι καθοριστικής σημασίας.
Slovic (1987)	Η αντίληψη του κινδύνου επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο έλεγχος, η οικειότητα και ο εθελοντισμός της έκθεσης. Οι πολίτες αξιολογούν διαφορετικά τους μη ελεγχόμενους κινδύνους.

Hopkin (2018)	Η επικινδυνότητα είναι δυναμική και μεταβάλλεται σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου. Απαιτείται συνεχής επανεκτίμηση και προσαρμογή.
Love et al. (2011)	Οι τεχνικές αστοχίες και τα κατασκευαστικά σφάλματα συνδέονται με ελλιπή διαχείριση επί των κινδύνων και ανεπαρκή έλεγχο ποιότητας.
Kerzner (2017)	Η διαχείριση χρόνου και κινδύνου είναι αλληλένδετες, ενώ οι καθυστερήσεις δημιουργούν νέο κύκλο αβεβαιότητας και επιπλέον κόστος.
Atkinson (1999)	Η παραδοσιακή προσέγγιση του «τριγώνου» της επιτυχίας είναι περιορισμένη σε περίπτωση κατά την οποία δεν λαμβάνονται υπόψιν στρατηγικοί και κοινωνικοί παράγοντες.
Venter et al. (2021)	Η χρήση της BIM και των ψηφιακών τεχνολογιών επιτρέπει την προσομοίωση των επικίνδυνων σεναρίων και ενισχύει την πρόληψη σε πραγματικό χρόνο.
Turner & Müller (2005)	Το στυλ ηγεσίας του project manager επηρεάζει άμεσα την επιτυχία και τη διαχείριση των κινδύνων στα έργα.
Schein (2010)	Η οργανωσιακή κουλτούρα διαμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο αναγνωρίζονται και αντιμετωπίζονται οι κίνδυνοι.
Guldenmund (2000)	Η κουλτούρα ασφάλειας αντανακλά βαθύτερες αξίες σχετικά με την πρόληψη και τη συμμόρφωση.
Zohar (2010)	Το «κλίμα ασφάλειας» επηρεάζει τις συμπεριφορές και τη συχνότητα της πρόκλησης ατυχημάτων.
Edmondson (1999)	Η ψυχολογική ασφάλεια ενισχύει την έγκαιρη αναφορά των σφαλμάτων και μειώνει τον κίνδυνο σοβαρών αποτυχιών.
Teo et al. (2005)	Ο βαθμός της οργανωσιακής ωριμότητας επηρεάζει την ικανότητα της πρόληψης και της διαχείρισης των κινδύνων.
Hofstede (2001)	Οι πολιτισμικές διαφορές επηρεάζουν τη στάση απέναντι στην αβεβαιότητα και τον κίνδυνο.
Hurtado-Martell & Ros (2025)	Η ανεπαρκής διαχείριση των κινδύνων διαταράσσει την ισορροπία που επικρατεί μεταξύ του κόστους, του χρόνου και της ποιότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι και τα εργαλεία ανάλυσης της επικινδυνότητας, επισημαίνοντας τις ποιοτικές και ποσοτικές μεθόδους ανάλυσης του κινδύνου. Εν συνεχεία, ακολουθεί η περιγραφή των χρησιμοποιούμενων τεχνικών και των μοντέλων αξιολόγησης και ιεράρχησης των κινδύνων, αλλά και λοιπών καινοτόμων μεθόδων.

3.1 Ποιοτικές και ποσοτικές μέθοδοι ανάλυσης κινδύνου

Η ανάλυση κινδύνου στα τεχνικά έργα βασίζεται σε ένα ευρύ φάσμα μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται σε ποιοτικές και ποσοτικές προσεγγίσεις. Η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας εξαρτάται από τη φύση του έργου, αλλά και από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, το επίπεδο αβεβαιότητας και το στάδιο του κύκλου ζωής στο οποίο βρίσκεται το έργο. Σύμφωνα με το ISO 31000 (International Organization for Standardization, 2018), η ανάλυση κινδύνου αποσκοπεί στην κατανόηση της φύσης του κινδύνου, αλλά και στον προσδιορισμό του επιπέδου του, ώστε να υποστηριχθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Οι ποιοτικές μέθοδοι ανάλυσης κινδύνου βασίζονται κυρίως στην εμπειρία των ειδικών στελεχών. Παράλληλα, είναι βασισμένες και στη γνώση τους, αλλά και στη δομημένη συζήτηση των ειδικών με τους λοιπούς εμπλεκόμενους φορείς. Χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια ενός έργου, όταν τα διαθέσιμα ποσοτικά δεδομένα είναι περιορισμένα. Οι μέθοδοι, όπως είναι οι συνεντεύξεις εμπειρογνομόνων, τα workshops αναγνώρισης κινδύνων και οι πίνακες αξιολόγησης, βασίζονται σε κλίμακες πιθανότητας και σοβαρότητας. Οι κλίμακες αυτές αποδίδονται μέσω λεκτικών κατηγοριών, ήτοι χαμηλός, μέτριος, υψηλός κίνδυνος. Στο σημείο αυτό, διευκρινίζεται ότι οι ποιοτικές προσεγγίσεις είναι ευέλικτες και επιτρέπουν τη γρήγορη αποτύπωση του προφίλ επικινδυνότητας ενός έργου. Ωστόσο, ενδέχεται να επηρεάζονται από γνωστικές προκαταλήψεις και υποκειμενικότητα (Aven, 2016).

Αντιθέτως, οι ποσοτικές μέθοδοι επιδιώκουν την αριθμητική αποτίμηση της πιθανότητας και των συνεπειών που έχει ένας κίνδυνος. Η εν λόγω προσέγγιση απαιτεί αξιόπιστα στατιστικά δεδομένα. Επίσης, απαιτεί σαφή μοντελοποίηση των σχέσεων

που αναπτύσσονται μεταξύ των μεταβλητών. Η ποσοτική ανάλυση επιτρέπει τον υπολογισμό αναμενόμενων τιμών κόστους, πιθανοτήτων καθυστερήσεων και εύρους αποκλίσεων. Ιδιαίτερα σε έργα υψηλού προϋπολογισμού ή αυξημένης πολυπλοκότητας, η ποσοτική ανάλυση συμβάλλει στην εκτίμηση σεναρίων και στη λήψη στρατηγικής σημασίας αποφάσεων (Hillson, 2017).

Η μελέτη του Aven (2016) υποστηρίζει ότι οι ποιοτικές και ποσοτικές μέθοδοι δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ανταγωνιστικές, αλλά ως συμπληρωματικές. Οι ποιοτικές τεχνικές συμβάλλουν στον αρχικό εντοπισμό κινδύνων. Επίσης, συντελούν και στη διαμόρφωση ενός πλαισίου, ενώ οι ποσοτικές μέθοδοι επιτρέπουν την ακριβέστερη αποτίμηση και ιεράρχηση.

Επίσης, ο Aven (2016) επισημαίνει ότι η ενσωμάτωση πολλαπλών μεθόδων ενισχύει την αξιοπιστία της ανάλυσης. Παράλληλα, δύναται να μειώσει την πιθανότητα της πραγματοποίησης εσφαλμένων εκτιμήσεων.

Συν τοις άλλοις, η επιλογή μεθόδου επηρεάζεται από το επίπεδο αβεβαιότητας. Σε περιπτώσεις ριζικής αβεβαιότητας, επί των οποίων δεν υπάρχουν επαρκή ιστορικά δεδομένα, οι ποιοτικές προσεγγίσεις και η κρίση των εμπειρογνομόνων αποκτούν αυξημένη σημασία. Εν αντιθέσει, σε επαναλαμβανόμενα έργα ή σε επαναληπτικές διαδικασίες που υπάρχουν διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία, οι ποσοτικές μέθοδοι παρέχουν υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας. Σε κάθε περίπτωση, η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά ενός ώριμου συστήματος διαχείρισης κινδύνου (Hillson, 2017).

Επομένως, οι ποιοτικές και ποσοτικές μέθοδοι ανάλυσης κινδύνου αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για την κατανόηση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα. Η αποτελεσματική αξιοποίησή τους προϋποθέτει αφενός την κατάλληλη επιλογή, και αφετέρου έναν συνδυασμό και συνεχή αναθεώρηση. Έτσι, θα είναι δυνατόν να ανταποκρίνονται στη δυναμική φύση των έργων και των εξωτερικών συνθηκών.

3.2 Χρησιμοποιούμενες τεχνικές

3.2.1 Η τεχνική FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

Η Ανάλυση Τρόπων Αστοχίας και Επιπτώσεων (Failure Mode and Effects Analysis - FMEA) αποτελεί μία ποιοτική τεχνική αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων στα τεχνικά έργα και στα βιομηχανικά συστήματα. Πρόκειται για μία μέθοδο, η οποία αναπτύχθηκε αρχικά στη δεκαετία του 1940 για στρατιωτικές εφαρμογές στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αργότερα υιοθετήθηκε ευρέως από τη βιομηχανία αεροδιαστημικής, την αυτοκινητοβιομηχανία και τον κατασκευαστικό κλάδο (Stamatis, 2003). Σήμερα, η FMEA χρησιμοποιείται ως προληπτικό εργαλείο διαχείρισης κινδύνου. Η χρήση της είναι συνηθέστερη σε φάσεις σχεδιασμού και ανάπτυξης των έργων.

Πιο αναλυτικά, η βασική αρχή της FMEA συνίσταται στη συστηματική αναγνώριση πιθανών τρόπων αστοχίας (failure modes) ενός συστήματος ή διαδικασίας. Επίσης, αφορά και την ανάλυση των αιτίων που τους προκαλούν, όπως επίσης και την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους στη λειτουργία του έργου. Η διαδικασία περιλαμβάνει την καταγραφή κάθε επιμέρους στοιχείου ή δραστηριότητας. Επίσης, εμπεριέχει τον εντοπισμό πιθανών αστοχιών, την εκτίμηση των συνεπειών και τον προσδιορισμό υφιστάμενων ή απαιτούμενων μέτρων ελέγχου.

Κεντρικό στοιχείο της μεθόδου αποτελεί ο υπολογισμός του Δείκτη Προτεραιότητας Κινδύνου (Risk Priority Number, RPN). Ο εν λόγω δείκτης προκύπτει από το γινόμενο τριών παραμέτρων, ήτοι της σοβαρότητας της συνέπειας (Severity), της πιθανότητας εμφάνισης (Occurrence) και της δυνατότητας ανίχνευσης της αστοχίας πριν εκδηλωθεί (Detection). Η αριθμητική αποτίμηση αυτών των παραμέτρων επιτρέπει την ιεράρχηση των κινδύνων. Επίσης, καθιστά επιτρεπτό τον προσδιορισμό προτεραιοτήτων για ενδεχόμενες μετέπειτα διορθωτικές ενέργειες (Stamatis, 2003).

Στα τεχνικά έργα, η FMEA εφαρμόζεται κατά τη φάση σχεδιασμού για την πρόληψη τεχνικών αστοχιών, όπως επίσης και κατά τη φάση κατασκευής για την ανάλυση κρίσιμων διαδικασιών. Επί παραδείγματι, μπορεί να εφαρμόζεται σε εκσκαφές ή στην εγκατάσταση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η προληπτική της φύση την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε έργα υψηλής πολυπλοκότητας. Ο λόγος είναι ότι στα

έργα αυτά η έγκαιρη αναγνώριση των πιθανών αδυναμιών μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό το κόστος των μελλοντικών διορθώσεων.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της FMEA αποτελεί η δομημένη και εύληπτη μορφή της. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό της στοιχείο, το οποίο διευκολύνει τη συνεργασία διεπιστημονικών ομάδων. Μέσω των ομαδικών συνεδριών, οι ειδικοί που προέρχονται από διαφορετικά πεδία, έχουν τη δυνατότητα να συνεισφέρουν στην αναγνώριση κινδύνων, ενισχύοντας την πληρότητα της ανάλυσης. Συν τοις άλλοις, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ευέλικτη και μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά μεγέθη και τύπους έργων (Liu et al., 2012).

Ωστόσο, η FMEA παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Η αξιολόγηση των παραμέτρων σοβαρότητας, πιθανότητας και ανίχνευσης είναι βασισμένη σε κλίμακες που συχνά εμπεριέχουν υποκειμενικότητα. Η ακρίβεια του RPN εξαρτάται από την εμπειρία και την κρίση της ομάδας αξιολόγησης. Επιπλέον, η παραδοσιακή μορφή της μεθόδου αυτής δεν λαμβάνει υπόψιν της τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών αστοχιών, γεγονός που μπορεί να υποτιμήσει τη συστημική φύση της επικινδυνότητας (Aven, 2016).

Για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών, οι Liu et al. (2012) προτείνουν τροποποιημένες εκδοχές της FMEA, όπως είναι η Fuzzy FMEA. Οι εκδοχές αυτές χρησιμοποιούν ασαφή σύνολα (fuzzy sets) για τη μείωση της υποκειμενικότητας στην αξιολόγηση. Οι Liu et al. (2012), επίσης, υποστηρίζουν ότι η ενσωμάτωση μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία της ιεράρχησης κινδύνων, ιδίως σε σύνθετα έργα υποδομών.

3.2.2 Η τεχνική FTA (Fault Tree Analysis)

Η Ανάλυση Δένδρου Σφαλμάτων (Fault Tree Analysis, FTA) αποτελεί μία δομημένη, λογική και κυρίως αναλυτική τεχνική διερεύνησης των αιτίων που οδηγούν σε ένα ανεπιθύμητο γεγονός ή σε μία κρίσιμη αστοχία, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Η εν λόγω μέθοδος αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 για τις ανάγκες της αεροδιαστημικής βιομηχανίας. Από τότε χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα

υψηλής αξιοπιστίας, όπως επί παραδείγματι σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, χημικές βιομηχανίες και μεγάλα τεχνικά έργα υποδομών (Vesely et al., 2002).

Η FTA βασίζεται σε μία «top-down» προσέγγιση. Επ' αυτής της προσέγγισης, το ανεπιθύμητο συμβάν (top event) τοποθετείται στην κορυφή ενός λογικού διαγράμματος. Εν συνεχεία, αναλύονται ιεραρχικά τα υποκείμενα αίτια που μπορούν να οδηγήσουν σε αυτό. Τα αίτια αυτά συνδέονται μεταξύ τους μέσω λογικών πυλών (AND, OR). Οι πύλες αυτές αποτυπώνουν τις σχέσεις αλληλεξάρτησης μεταξύ επιμέρους σφαλμάτων. Η γραφική αναπαράσταση του δένδρου σφαλμάτων επιτρέπει την κατανόηση της δομής του συστήματος και των κρίσιμων διαδρομών αστοχίας.

Σε αντίθεση με την FMEA, η οποία εστιάζει στους πιθανούς τρόπους αστοχίας επιμέρους στοιχείων, η FTA εξετάζει τις σχέσεις μεταξύ των σφαλμάτων. Επίσης, επιδιώκει να προσδιορίσει τους συνδυασμούς γεγονότων που οδηγούν σε συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Πρόκειται για μία μέθοδο, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν απαιτείται ανάλυση σύνθετων τεχνικών συστημάτων, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων μπορούν να δημιουργήσουν μη προφανείς διαδρομές κινδύνου (Ericson, 2015).

Επίσης, η FTA μπορεί να εφαρμοστεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Στην ποιοτική της μορφή, χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό κρίσιμων αδυναμιών και για τη χαρτογράφηση πιθανών σεναρίων αστοχίας. Από την άλλη πλευρά, στην ποσοτική της εκδοχή, οι πιθανότητες των επιμέρους σφαλμάτων εισάγονται στο μοντέλο και υπολογίζεται η συνολική πιθανότητα του top event μέσω λογικών και πιθανοκρατικών υπολογισμών. Η ποσοτική FTA επιτρέπει την εκτίμηση της αξιοπιστίας και τη σύγκριση εναλλακτικών σχεδιαστικών επιλογών (Vesely et al., 2002).

Στα τεχνικά έργα, η FTA εφαρμόζεται σε κρίσιμες κατασκευές, όπως γέφυρες, σήραγγες ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Πρόκειται για περιπτώσεις κατασκευών, που η αστοχία ενός συστήματος μπορεί να ενέχει σοβαρές επιπτώσεις στην ασφάλεια και στη λειτουργικότητα. Η ανάλυση του δένδρου σφαλμάτων συμβάλλει στον εντοπισμό «κρίσιμων διαδρομών αστοχίας» (minimal cut sets). Πρόκειται για τους ελάχιστους συνδυασμούς γεγονότων που επαρκούν για την πρόκληση του ανεπιθύμητου συμβάντος. Ο εντοπισμός αυτών των διαδρομών καθιστά δυνατή τη στοχευμένη ενίσχυση των πλέον ευάλωτων σημείων του συστήματος.

Ένα βασικό πλεονεκτικό στοιχείο της FTA αποτελεί η σαφήνεια και η λογική της δομής, η οποία διευκολύνει την κατανόηση σύνθετων σχέσεων από τεχνικές ομάδες και διοικητικά στελέχη. Επιπλέον, η μέθοδος FTA επιτρέπει την ποσοτική σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων και την ιεράρχηση των επενδύσεων σε μέτρα πρόληψης. Ωστόσο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων. Πέραν αυτού, η ακρίβεια εξαρτάται και από την πληρότητα του μοντέλου. Επίσης, η παράλειψη κρίσιμων παραγόντων ή η εσφαλμένη εκτίμηση πιθανοτήτων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της συνολικής επικινδυνότητας (Aven, 2016).

Ένας επιπλέον περιορισμός αφορά τη δυσκολία της μοντελοποίησης δυναμικών ή χρονικά εξαρτώμενων συστημάτων, επί των οποίων οι συνθήκες μεταβάλλονται συνεχώς. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος έχουν αναπτυχθεί υβριδικές προσεγγίσεις. Οι προσεγγίσεις αυτές συνδυάζουν τη μέθοδο FTA με Bayesian Networks ή προσομοιώσεις Monte Carlo. Έτσι, επιτρέπεται μία πιο ρεαλιστική αποτύπωση της επικρατούσας αβεβαιότητας (Kabir, 2017).

3.2.3 Η Τεχνική HAZOP (Hazard and Operability Study)

Η Μελέτη Επικινδυνότητας και Λειτουργικότητας (Hazard and Operability Study, HAZOP) αποτελεί μία κατ' εξοχήν ποιοτική τεχνική ανάλυσης της επικινδυνότητας και χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα, διυλιστήρια, χημικές εγκαταστάσεις και τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας, τα οποία ακολουθούν σύνθετες διεργασίες. Η εν λόγω μέθοδος αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο τη δεκαετία του 1960 στο πλαίσιο της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Από τότε έχει καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων λειτουργίας (Kletz, 2001).

Η HAZOP είναι βασισμένη στη δομημένη ανάλυση διεργασιακών ροών μέσω της χρήσης οδηγητικών λέξεων (guide words). Οι λέξεις αυτές εφαρμόζονται σε κρίσιμες παραμέτρους της διεργασίας, όπως ροή, πίεση, θερμοκρασία και σύσταση. Κάθε λέξη-οδηγός, σε συνδυασμό με λειτουργικές παραμέτρους, χρησιμοποιείται με απώτερο σκοπό να διερευνήσει τις αποκλίσεις από τον επιθυμητό τρόπο λειτουργίας, αλλά και με σκοπό να εντοπίσει πιθανούς κινδύνους ή λειτουργικά προβλήματα (Imperial College Centre for Process Safety, 2011).

Η μεθοδολογία αυτή προάγει τη διερεύνηση του τι θα συμβεί αν πληρείται μία συγκεκριμένη προϋπόθεση για έναν πολύ μεγάλο αριθμό πιθανών αποκλίσεων. Με τον τρόπο αυτόν ενισχύεται η πρόβλεψη των μηχανισμών αστοχίας που μπορεί να μην είναι προφανείς με άλλες τεχνικές.

Επίσης, η HAZOP εφαρμόζεται από διεπιστημονικές ομάδες, οι οποίες περιλαμβάνουν ειδικούς με διαφορετική τεχνογνωσία, όπως επί παραδείγματι μηχανολόγους, χημικούς, τεχνικούς ασφάλειας και κατασκευαστές. Ο ρόλος αυτής της ομάδας είναι να αναλύσει κάθε τμήμα της διεργασίας, αλλά και να καταγράψει πιθανές αποκλίσεις, να αξιολογήσει τις αιτίες και τις επιπτώσεις τους, όπως επίσης και να προτείνει μέτρα αντιμετώπισης. Η συμμετοχική φύση της HAZOP ενισχύει την πληρότητα της ανάλυσης. Την ίδια στιγμή καταφέρνει και μειώνει τον κίνδυνο της παράλειψης κρίσιμων παραγόντων (Smith & Kelly, 2011).

Η HAZOP ενδείκνυται ιδιαίτερα σε έργα, επί των οποίων η διαδικασία αποτελεί βασικό στοιχείο του συστήματος. Επίσης, ενδείκνυται σε έργα όπου μία μικρή απόκλιση μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην ασφάλεια ή στη λειτουργία. Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, χημικές διεργασίες, μονάδες παραγωγής ενέργειας και σύνθετες υδραυλικές κατασκευές. Επίσης, η εν λόγω μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί σε έργα μηχανικής, όπου η «λειτουργία» αναφέρεται σε μηχανικά ή δομικά χαρακτηριστικά (Crawley & Tyler, 2015).

Βασικό πλεονέκτημα της HAZOP αποτελεί η υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση πιθανών αποκλίσεων, αλλά και η δομημένη ανάλυση που ξεπερνά μία απλή λίστα πιθανών κινδύνων. Πιο αναλυτικά, η χρήση οδηγητικών λέξεων που προαναφέρθηκε επιτρέπει την εξερεύνηση σεναρίων που μπορεί να μην έχουν καταγραφεί σε παραδοσιακά εργαλεία, όπως οι checklists ή η απλή εμπειρική αξιολόγηση. Επιπλέον, η HAZOP υποστηρίζει την εξακρίβωση της σχέσης που υπάρχει μεταξύ της αιτίας και του αποτελέσματος με μία σαφή και λογική δομή (Crawley & Tyler, 2015).

Ωστόσο, η εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτεί χρόνο, πόρους και συντονισμό διεπιστημονικών ομάδων. Στα μεγάλα και σύνθετα έργα, οι συνεδρίες HAZOP μπορεί να απαιτούν σημαντικό επαγγελματικό χρόνο. Επίσης, η επιτυχία της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την εμπειρία και την εξειδίκευση των μελών της ομάδας. Πέραν αυτού,

εξαρτάται και από την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων σχετικά με την ακολουθούμενη διεργασία (Zhu et al., 2022).

Ο Shafiudin et al. (2025) έχει αναφέρει ότι η HAZOP έχει αξιολογηθεί ως μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την ανίχνευση λειτουργικών κινδύνων σε πολύπλοκα συστήματα, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με άλλες τεχνικές ανάλυσης, όπως η FTA ή η προσομοίωση Monte Carlo για την ποσοτικοποίηση πιθανοτήτων. Παράλληλα, οι σύγχρονες επεκτάσεις της HAZOP, όπως αναφέρεται από τους Joubert et al. (2021), περιλαμβάνουν ψηφιακά εργαλεία υποστήριξης και αυτοματοποιημένα συστήματα καταγραφής των εμφανιζόμενων αποκλίσεων, τα οποία μειώνουν τον ανθρώπινο φόρτο και αυξάνουν τα επίπεδα της αποτελεσματικότητας.

3.2.4 Η ποσοτική τεχνική ανάλυσης μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων

Η προσομοίωση Monte Carlo αποτελεί μία κατεξοχήν ποσοτική τεχνική ανάλυσης κινδύνου, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της επίδρασης της αβεβαιότητας σε κρίσιμες παραμέτρους ενός έργου, όπως το κόστος, ο χρόνος και η απόδοση. Η μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως σε πεδία όπως η μηχανική, τα οικονομικά, τα logistics και η επιστήμη δεδομένων, γεγονός που καταδεικνύει τη γενικευμένη χρησιμότητά της σε προβλήματα αβεβαιότητας. Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται στη χρήση πιθανοκρατικών κατανομών για κρίσιμες μεταβλητές και στην εκτέλεση μεγάλου αριθμού επαναληπτικών προσομοιώσεων. Σκοπός της είναι η εκτίμηση της κατανομής των πιθανών αποτελεσμάτων ενός έργου (Vose, 2008).

Σε αντίθεση με τις ντετερμινιστικές προσεγγίσεις, όπου κάθε μεταβλητή λαμβάνει μία συγκεκριμένη τιμή, η Monte Carlo ενσωματώνει την αβεβαιότητα, αποδίδοντας σε κάθε μεταβλητή μία κατανομή πιθανότητας, όπως επί παραδείγματι κανονική, τριγωνική ή λογαριθμοκανονική. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, το μοντέλο «δειγματοληπτεί» επανειλημμένα τιμές από τις κατανομές αυτές. Εν συνεχεία, υπολογίζει το τελικό αποτέλεσμα για την κάθε επανάληψη. Μετά από χιλιάδες ή και εκατομμύρια επαναλήψεις, προκύπτει μία συνολική κατανομή αποτελεσμάτων. Αυτή, κατόπιν, επιτρέπει την εκτίμηση πιθανοτήτων υπέρβασης κόστους ή καθυστέρησης χρονοδιαγράμματος (Hubbard, 2014).

Στα τεχνικά έργα, η Monte Carlo χρησιμοποιείται για την ανάλυση προϋπολογισμών και χρονοδιαγραμμάτων. Για παράδειγμα, η διάρκεια των επιμέρους δραστηριοτήτων μπορεί να θεωρηθεί αβέβαιη και να μοντελοποιηθεί μέσω κατάλληλων κατανομών. Η προσομοίωση επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας ολοκλήρωσης του έργου εντός συγκεκριμένου χρονικού ορίου. Εναλλακτικά, επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας της υπέρβασης ενός δεδομένου προϋπολογισμού. Με τον τρόπο αυτό, οι διαχειριστές των έργων αποκτούν πιο ρεαλιστική εικόνα των ενδεχόμενων αποκλίσεων εν σχέσει με τις παραδοσιακές σημειακές εκτιμήσεις (Hillson, 2017).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησίας. Πιο αναλυτικά, μέσω της αξιολόγησης της συνεισφοράς κάθε μεταβλητής στην εν γένει διακύμανση του αποτελέσματος, εντοπίζονται οι πλέον κρίσιμοι παράγοντες του κινδύνου. Αυτό επιτρέπει τη στοχευμένη κατανομή των πόρων σε μέτρα πρόληψης ή ελέγχου (Crawley & Tyler, 2015).

Επιπλέον, η Monte Carlo υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων που βασίζεται σε επίπεδα αποδεκτού κινδύνου. Έτσι, καθιστά εφικτή την επιλογή σεναρίων με συγκεκριμένη πιθανότητα επιτυχίας (Sobieraj & Metelski, 2022).

Παρά τα ανωτέρω πλεονεκτήματα, πρέπει να αναφερθεί ότι η αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης εξαρτάται από την ποιότητα των εισροών. Η επιλογή ακατάλληλων κατανομών ή η χρήση μη αξιόπιστων δεδομένων είναι πιθανόν να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Ο Aven (2016), εδώ, επισημαίνει ότι οι ποσοτικές τεχνικές πρέπει να συνοδεύονται από κριτική αξιολόγηση των παραδοχών τους, ώστε να αποφεύγεται η ψευδαίσθηση ακρίβειας. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή απαιτεί κατάλληλο λογισμικό και τεχνική εξειδίκευση για την ορθή εφαρμογή της.

Τέλος, άξιο αναφοράς είναι το ότι η σύγχρονη εξέλιξη της Monte Carlo περιλαμβάνει την ενσωμάτωσή της σε εργαλεία BIM και λογισμικά διαχείρισης έργων. Έτσι, επιτρέπεται η ενημέρωση των προσομοιώσεων με πραγματικά δεδομένα προόδου. Παράλληλα, ο συνδυασμός της με Bayesian Networks και λοιπές πιθανοκρατικές μεθόδους ενισχύει την ικανότητα της μοντελοποίησης σύνθετων αλληλεξαρτήσεων (Kabir, 2017).

3.2.5 Η τεχνική SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)

Η ανάλυση SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) αποτελεί μία από τις δημοφιλέστερες ποιοτικές στρατηγικές μεθόδους αξιολόγησης. Πρόκειται για μία αξιολογική μέθοδο, η οποία έχει προσαρμοστεί και στο πεδίο της διαχείρισης κινδύνου στα τεχνικά έργα. Παρότι η SWOT δεν αναπτύχθηκε αρχικά ως εργαλείο ανάλυσης επικινδυνότητας, η δομή της επιτρέπει τη συστηματική αναγνώριση εσωτερικών και εξωτερικών παραγόντων, που μπορούν να επηρεάσουν την επιτυχία ενός έργου (Helms & Nixon, 2010).

Η συγκεκριμένη μέθοδος διακρίνει τους παράγοντες σε τέσσερις κατηγορίες, ήτοι τις εσωτερικές δυνάμεις (strengths), τις εσωτερικές αδυναμίες (weaknesses), τις εξωτερικές ευκαιρίες (opportunities) και τις εξωτερικές απειλές (threats). Στο πλαίσιο των τεχνικών έργων, οι δυνάμεις δύνανται να περιλαμβάνουν υψηλή τεχνική κατάρτιση της ομάδας έργου ή προηγμένη τεχνολογική υποδομή. Από την άλλη, οι αδυναμίες μπορεί να σχετίζονται με περιορισμένη εμπειρία σε παρόμοια έργα ή ελλιπή χρηματοδότηση. Οι ευκαιρίες αφορούν εξωτερικές συνθήκες που μπορούν να ενισχύσουν το έργο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι ευνοϊκές ρυθμιστικές αλλαγές ή τεχνολογικές καινοτομίες. Αντιθέτως, οι απειλές σχετίζονται με κινδύνους όπως είναι η οικονομική αστάθεια, οι μεταβολές των τιμών ή ενδεχόμενοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί (Gontier et al., 2021).

Η ανάλυση SWOT προσφέρει μία ολιστική θεώρηση της επικινδυνότητας. Ο λόγος είναι ότι επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάλυση εσωτερικών και εξωτερικών παραγόντων. Σε αντίθεση με τεχνικές, όπως η FMEA ή η FTA, που επικεντρώνονται κυρίως σε τεχνικές αστοχίες, η SWOT ενσωματώνει και στρατηγικές ή διοικητικές διαστάσεις κινδύνου. Επί παραδείγματι, η αδυναμία επαρκούς διαχείρισης ενδιαφερομένων ή η ύπαρξη νομικών αβεβαιοτήτων είναι δυνατόν να αναγνωριστεί ως βασική απειλή μέσω της ανάλυσης SWOT (Milosevic, 2010).

Όπως επισημαίνεται στη μελέτη των Pickton & Wright (1998), η SWOT είναι ένα εργαλείο αρχικής χαρτογράφησης κινδύνων, το οποίο συμβάλλει στη διαμόρφωση στρατηγικής αντιμετώπισης. Η εν λόγω μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στα πρώτα στάδια ενός έργου. Δηλαδή, είναι χρήσιμη όταν απαιτείται ευρεία αποτύπωση του περιβάλλοντος και των πιθανών επιρροών.

Μάλιστα, μέσω δομημένων συνεδριών, οι συμμετέχοντες μπορούν να καταγράψουν κρίσιμους παράγοντες και να αναπτύξουν στρατηγικές που αξιοποιούν τις δυνάμεις και τις ευκαιρίες, ενώ περιορίζουν τις αδυναμίες και τις απειλές. Ωστόσο, η SWOT παρουσιάζει περιορισμούς ως προς την ποσοτικοποίηση και ιεράρχηση των κινδύνων (Pickton & Wright, 1998).

Πρόκειται για μία μέθοδο, η οποία βασίζεται κυρίως σε ποιοτική αξιολόγηση και ενδέχεται να επηρεάζεται από υποκειμενικές κρίσεις. Συν τοις άλλοις, η απλή καταγραφή των παραγόντων δεν εγγυάται και μία αποτελεσματική διαχείριση, εάν δεν ακολουθηθεί από συστηματική ανάλυση και συγκεκριμένο σχέδιο δράσης (Helms & Nixon, 2010). Για τον λόγο αυτό, προτείνεται ο συνδυασμός της SWOT με πολυκριτηριακές τεχνικές ή μεθόδους ιεράρχησης, ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία των συμπερασμάτων.

Μάλιστα, στα τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας, η SWOT είναι δυνατόν να λειτουργήσει ως γέφυρα μεταξύ στρατηγικού σχεδιασμού και διαχείρισης κινδύνου. Η σύνδεσή της με την ανάλυση ενδιαφερομένων και με τη μελέτη εξωτερικού περιβάλλοντος ενισχύει την κατανόηση μακροοικονομικών, θεσμικών και κοινωνικών παραγόντων που επηρεάζουν την επικινδυνότητα. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή δύναται να επικαιροποιείται περιοδικά, επιτρέποντας την παρακολούθηση μεταβολών στο εξωτερικό περιβάλλον και την έγκαιρη προσαρμογή της εκάστοτε ακολουθούμενης στρατηγικής (Jiang et al., 2018).

Στον πίνακα που ακολουθεί πραγματοποιείται συγκριτική παρουσίαση των ανωτέρω περιγραφόμενων μεθόδων ανάλυσης της επικινδυνότητας:

Πίνακας 2. Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων ανάλυσης επικινδυνότητας

Μέθοδος	Τύπος προσέγγισης	Εστίαση ανάλυσης	Φάση εφαρμογής σε έργα	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
FMEA	Κυρίως ποιοτική με ημιποσοτική ιεράρχηση (RPN)	Τρόποι αστοχίας επιμέρους στοιχείων και επιπτώσεις τους	Σχεδιασμός και κρίσιμες διαδικασίες κατασκευής	Δομημένη, εύληπτη, προληπτική, ενισχύει τη διεπιστημονική συνεργασία	Υποκειμενικότητα κλιμάκων, δεν εξετάζει συστημικές αλληλεπιδράσεις, εξάρτηση από εμπειρία ομάδας

FTA	Ποιοτική και ποσοτική	Λογικές σχέσεις και συνδυασμοί σφαλμάτων που οδηγούν σε top event	Κρίσιμα τεχνικά συστήματα, έργα υψηλής αξιοπιστίας	Λογική δομή, αναδεικνύει κρίσιμες διαδρομές αστοχίας, επιτρέπει ποσοτικοποίηση	Εξάρτηση από ποιότητα δεδομένων, δυσκολία σε δυναμικά/χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα
HAZOP	Ποιοτική, δομημένη διεργασιακή ανάλυση	Αποκλίσεις από κανονική λειτουργία μέσω guide words	Έργα με σύνθετες διεργασίες και λειτουργικά συστήματα	Υψηλή ευαισθησία σε αποκλίσεις, συμμετοχική, συστηματική διερεύνηση σεναρίων	Χρονοβόρα, απαιτεί εξειδικευμένη ομάδα και σημαντικούς πόρους
Monte Carlo Simulation	Καθαρά ποσοτική, πιθανοκρατική	Αβεβαιότητα σε κόστος, χρόνο, απόδοση μέσω κατανομών πιθανότητας	Προϋπολογισμός, χρονοδιάγραμμα, ανάλυση σεναρίων	Παρέχει κατανομή αποτελεσμάτων, ανάλυση ευαισθησίας, υποστηρίζει risk-based αποφάσεις	Εξάρτηση από ποιότητα εισροών, ανάγκη εξειδικευμένου λογισμικού, κίνδυνος ψευδαίσθησης ακρίβειας
SWOT	Ποιοτική, στρατηγική	Εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες (δυνάμεις, αδυναμίες, ευκαιρίες, απειλές)	Αρχικά στάδια έργου, στρατηγικός σχεδιασμός	Ολιστική θεώρηση, ενσωματώνει στρατηγικούς και διοικητικούς κινδύνους	Μη ποσοτικοποιημένη, υποκειμενική, δεν ιεραρχεί με ακρίβεια

3.3 Μοντέλα αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων στα τεχνικά έργα

Κατόπιν της προγενέστερης παρουσίασης των βασικών τεχνικών αναγνώρισης και ανάλυσης κινδύνου, κρίνεται σκόπιμη η εξέταση ορισμένων μοντέλων αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων, τα οποία επιτελούν διαφορετική αλλά συμπληρωματική λειτουργία στο πλαίσιο της διαχείρισης κινδύνου. Ειδικότερα, οι προηγούμενες τεχνικές, δηλαδή η FMEA, η FTA και η HAZOP, εστιάζουν κυρίως στον εντοπισμό των πηγών κινδύνου και στην κατανόηση των μηχανισμών μέσω των οποίων μπορεί να προκύψει μία αστοχία ή ένα ανεπιθύμητο συμβάν. Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα αποσκοπούν κυρίως στην

αξιολόγηση της σχετικής βαρύτητας των ήδη αναγνωρισμένων κινδύνων και στην ιεράρχησή τους, ώστε να διευκολύνεται η λήψη αποφάσεων και η επιλογή προτεραιοτήτων για την αντιμετώπισή τους. Κατά συνέπεια, οι τεχνικές ανάλυσης και τα μοντέλα αξιολόγησης δεν είναι αντικρουόμενα, αλλά αλληλοσυμπληρώνονται. Πιο αναλυτικά, τα πρώτα συμβάλλουν κυρίως στην αναγνώριση και κατανόηση της επικινδυνότητας, ενώ τα δεύτερα στη συγκριτική αποτίμηση και στην ιεράρχηση των κινδύνων με βάση συγκεκριμένα κριτήρια.

3.3.1 Η τεχνική αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων Risk Matrix ως ημιποσοτικό μοντέλο αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων

Η Μήτρα Κινδύνου (Risk Matrix) αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων στα τεχνικά έργα. Πρόκειται για ημι-ποσοτική μέθοδο. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την πιθανότητα εμφάνισης ενός κινδύνου με τη σοβαρότητα των συνεπειών του, αποδίδοντας σε κάθε συνδυασμό μία κατηγορία επικινδυνότητας. Η απλότητα και η ευκολία της εφαρμογής της έχουν οδηγήσει στη συστηματική χρήση της, τόσο σε εργοτάξια όσο και σε οργανωτικά συστήματα διαχείρισης ασφάλειας (International Organization for Standardization, 2018).

Η Risk Matrix οργανώνεται συνήθως σε πίνακα δύο διαστάσεων. Στον οριζόντιο άξονα αποτυπώνεται η πιθανότητα, ήτοι σπάνια, πιθανή, συχνή. Στον κάθετο άξονα αντικατοπτρίζεται η σοβαρότητα των συνεπειών, ήτοι μικρή, μέτρια ή καταστροφική. Ο συνδυασμός των δύο παραμέτρων οδηγεί σε μία κατηγορία κινδύνου, όπως χαμηλός, μέτριος ή υψηλός. Με τον τρόπο αυτό, οι κίνδυνοι ιεραρχούνται και έτσι, καθίσταται δυνατός ο καθορισμός προτεραιοτήτων για την εφαρμογή μέτρων ελέγχου (Cox, 2008).

Στα τεχνικά έργα, η Risk Matrix χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση κινδύνων ασφάλειας εργοταξίων, τεχνικών αστοχιών, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οικονομικών αβεβαιοτήτων. Πρόκειται για μία μέθοδο, η οποία διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των τεχνικών και διοικητικών στελεχών. Αυτό συμβαίνει, λόγω του ότι προσφέρει σαφή και οπτική απεικόνιση του επιπέδου επικινδυνότητας. Συν τοις άλλοις, επιτρέπει την τυποποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης, ενισχύοντας τη διαφάνεια και τη συγκρισιμότητα μεταξύ διαφορετικών έργων ή φάσεων (Youli et al., 2018).

Ωστόσο, η Risk Matrix έχει αποτελέσει αντικείμενο κριτικής από ορισμένους μελετητές. Συγκεκριμένα, ο Cox (2008) επισημαίνει ότι η κατηγοριοποίηση κινδύνων σε διακριτές κλίμακες μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια πληροφορίας και σε εσφαλμένη ιεράρχηση. Αυτό είναι πιο πιθανό όταν διαφορετικοί συνδυασμοί πιθανότητας και σοβαρότητας οδηγούν στην ίδια κατηγορία κινδύνου. Επιπλέον, η ημι-ποσοτική φύση της μεθόδου ενδέχεται να δημιουργήσει ψευδαίσθηση ακρίβειας, ενώ στην πραγματικότητα βασίζεται σε ποιοτικές εκτιμήσεις (Sirahi & Timor, 2010).

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη δυσκολία της σύγκρισης των κινδύνων διαφορετικής φύσης. Για παράδειγμα, ένας κίνδυνος χαμηλής πιθανότητας, αλλά πολύ υψηλής σοβαρότητας, είναι πιθανόν να καταταγεί στην ίδια κατηγορία με έναν συχνό αλλά ήπιο κίνδυνο. Η εν λόγω απλοποίηση ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζει πλήρως τη στρατηγική σημασία κάθε κινδύνου (Hubbard, 2014).

Όμως, παρά τις αδυναμίες της, η Risk Matrix παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμη ως εργαλείο αρχικής αξιολόγησης και επικοινωνίας κινδύνων. Όπως αναφέρεται από τους Koulinas et al. (2021), στα ώριμα συστήματα διαχείρισης κινδύνου, η συγκεκριμένη μέθοδος συνδυάζεται με ποσοτικές τεχνικές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου είδους τεχνικών είναι η προσομοίωση Monte Carlo ή η ανάλυση δένδρου σφαλμάτων. Έτσι, μπορεί να ενισχυθεί η ακρίβεια των εκτιμήσεων. Επιπλέον, η προσαρμογή των κλιμάκων πιθανότητας και σοβαρότητας στα χαρακτηριστικά εκάστοτε έργου είναι δυνατόν να βελτιώσει την αξιοπιστία των προκύπτων αποτελεσμάτων.

3.3.2 Η μέθοδος αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων AHP (Analytic Hierarchy Process) ως πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process, AHP) χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση και ιεράρχηση κινδύνων στα τεχνικά έργα. Η εν λόγω μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Saaty (1980) και βασίζεται στη δομημένη αποσύνθεση ενός σύνθετου προβλήματος σε ιεραρχικά επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά περιλαμβάνουν τον γενικό στόχο, τα κριτήρια αξιολόγησης και τις εναλλακτικές επιλογές.

Ειδικότερα δε, στο πλαίσιο της διαχείρισης κινδύνου, το AHP επιτρέπει την ιεράρχηση κινδύνων βάσει πολλαπλών κριτηρίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των κριτηρίων

αυτών είναι η πιθανότητα εμφάνισης, η σοβαρότητα των συνεπειών, η δυνατότητα της ανίχνευσης, το κόστος αντιμετώπισης και η κοινωνική επίπτωση. Η ακολουθούμενη διαδικασία βασίζεται σε ζεύγη συγκρίσεων (pairwise comparisons). Επ' αυτών, οι συμμετέχοντες καλούνται να αξιολογήσουν τη σχετική σημασία ενός στοιχείου έναντι ενός άλλου. Οι εν λόγω διενεργηθείσες συγκρίσεις αντικατοπτρίζονται σε πίνακες και οδηγούν στον υπολογισμό βαρών προτεραιότητας μέσω ιδιοτιμών (eigenvalues) (Saaty, 1980).

Η εφαρμογή του AHP στα τεχνικά έργα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Κατ' αρχάς, επιτρέπει τη συνδυαστική αξιολόγηση ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων. Αυτό, λόγω του ότι γεφυρώνει το χάσμα που υπάρχει μεταξύ της υποκειμενικής κρίσης και της μαθηματικής τεκμηρίωσης.

Συν τοις άλλοις, η μέθοδος αυτή παρέχει έλεγχο συνέπειας (consistency ratio). Αυτός, με τη σειρά του, επιτρέπει την αξιολόγηση της λογικής συνοχής των συγκρίσεων που πραγματοποιούνται από τους εμπειρογνώμονες. Η εν λόγω δυνατότητα ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και μειώνει την αυθαιρεσία στην ιεράρχηση (Saaty & Vargas, 2001).

Οι Duleba & Moslem (2018), στη μελέτη τους, επισημαίνουν ότι το AHP έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα τεχνικών έργων, όπως επί παραδείγματι έργα υποδομών, ενεργειακές εγκαταστάσεις και συστήματα μεταφορών, για την αξιολόγηση τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών κινδύνων. Επίσης, οι Duleba & Moslem (2018) αναφέρουν ότι η εν λόγω μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν απαιτείται η ενσωμάτωση διαφορετικών απόψεων και η σύγκριση εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου. Άλλωστε, μέσω της ιεραρχικής δομής, οι κίνδυνοι κατηγοριοποιούνται και αποκτούν μετρήσιμη προτεραιότητα.

Ωστόσο, η μέθοδος AHP απαιτεί σημαντικό αριθμό συγκρίσεων. Αυτό είναι αναγκαίο, ιδιαίτερα όταν τα κριτήρια ή οι εναλλακτικές είναι πολλά. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιβαρύνει τη διαδικασία και να αυξήσει τον κίνδυνο ασυνέπειας.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις κρίσεις των συμμετεχόντων. Οι κρίσεις των εμπλεκόμενων μερών δεν αποκλείεται να επηρεάζονται από εμπειρικές προκαταλήψεις ή ακόμα και από ενδεχόμενη περιορισμένη πληροφόρηση (Triantaphyllou & Mann, 1995).

3.3.3 Η μέθοδος αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων που χρησιμοποιεί Bayesian Networks ως ποσοτικό πιθανοκρατικό μοντέλο αξιολόγησης κινδύνων

Τα Δίκτυα Bayes (Bayesian Networks) αποτελούν ισχυρά πιθανοκρατικά εργαλεία μοντελοποίησης και ανάλυσης κινδύνου. Πρόκειται για εργαλεία, τα οποία είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για σύνθετα τεχνικά έργα, όπου οι παράγοντες επικινδυνότητας αλληλεπιδρούν δυναμικά. Πρόκειται για κατευθυνόμενα ακυκλικά γραφήματα (directed acyclic graphs). Στα γραφήματα αυτά, οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν μεταβλητές, όπως για παράδειγμα τεχνικές αστοχίες, περιβαλλοντικές συνθήκες και ανθρώπινα σφάλματα, αλλά και τα τόξα αποτυπώνουν αιτιώδεις ή εξαρτημένες σχέσεις μεταξύ τους (Pearl, 1988).

Η βασική θεωρητική τους θεμελίωση είναι βασισμένη στο θεώρημα του Bayes. Το θεώρημα αυτό επιτρέπει την αναθεώρηση της πιθανότητας ενός γεγονότος υπό το φως νέων δεδομένων. Σε αντίθεση με στατικές μεθόδους, τα Bayesian Networks επιτρέπουν την ενσωμάτωση τόσο ιστορικών δεδομένων όσο και εμπειρικής γνώσης ειδικών (Leu & Chang, 2013).

Την ίδια στιγμή, μπορούν να επικαιροποιούνται, καθώς προκύπτουν νέες πληροφορίες (Jensen & Nielsen, 2007). Η ιδιότητα αυτή τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα σε έργα όπου η αβεβαιότητα εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής.

Στο πεδίο των τεχνικών έργων, τα Δίκτυα Bayes χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων. Επ' αυτών, πολλαπλοί κίνδυνοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω αλληλεξαρτήσεων. Για παράδειγμα, μία καθυστέρηση στην προμήθεια των υλικών είναι πιθανόν να αυξήσει την πιθανότητα της πίεσης χρόνου. Αυτό, με τη σειρά του, ενδέχεται να ενισχύσει την πιθανότητα ανθρώπινου σφάλματος. Οι παραδοσιακές μέθοδοι δυσκολεύονται να αποτυπώσουν τέτοιου είδους συστημικές σχέσεις, ενώ τα Bayesian Networks παρέχουν μαθηματικό πλαίσιο για την ανάλυση αυτών των αλληλεπιδράσεων (Kabir, 2017).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυνατότητα εκτέλεσης αναδρομικής ανάλυσης (backward inference). Δηλαδή, εάν παρατηρηθεί ένα ανεπιθύμητο γεγονός, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την πιθανότητα των επιμέρους αιτίων που το προκάλεσαν. Η εν λόγω ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη

στη διερεύνηση ατυχημάτων ή αστοχιών. Πέραν αυτού, είναι χρήσιμη και στον προληπτικό σχεδιασμό. Παράλληλα, τα Bayesian Networks μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση σεναρίων «τι θα συμβεί αν», διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας (Fenton & Neil, 2012).

Ωστόσο, η εφαρμογή τους απαιτεί εξειδικευμένη γνώση πιθανοκρατικής μοντελοποίησης και επαρκή δεδομένα για τον καθορισμό των πιθανοτήτων υπό συνθήκη (conditional probabilities). Σε περιβάλλοντα που υπάρχουν περιορισμένα δεδομένα, οι εκτιμήσεις βασίζονται σε γνώση εμπειρογνομόνων. Το εν λόγω γεγονός μπορεί να εισάγει αυξημένα επίπεδα υποκειμενικότητας (Khanh et al., 2023).

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των μοντέλων αυξάνεται σημαντικά όταν ο αριθμός των μεταβλητών είναι μεγάλος. Έτσι, είναι απαραίτητη τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού (Zhang et al., 2014).

Τέλος, μελέτες όπως είναι αυτή των Fenton & Neil (2012) αναγνωρίζουν ότι τα Bayesian Networks είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την ολοκληρωμένη διαχείριση κινδύνου σε έργα υψηλής τεχνικής και οργανωσιακής πολυπλοκότητας. Πιο αναλυτικά, οι Fenton & Neil (2012) υποστηρίζουν ότι τα δίκτυα αυτά υπερτερούν έναντι παραδοσιακών εργαλείων. Ο λόγος έγκειται στο ότι καθώς συνδυάζουν την αιτιώδη ανάλυση με τη δυναμική ενημέρωση και την ποσοτική τεκμηρίωση. Παράλληλα, ο Aven (2016) τονίζει ότι η ενσωμάτωσή τους σε ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης κινδύνου ενισχύει τη συστηματική κατανόηση της επικινδυνότητας.

Στον πίνακα που ακολουθεί πραγματοποιείται συγκριτική παρουσίαση των ανωτέρω μοντέλων αξιολόγησης και ιεράρχησης των κινδύνων:

Πίνακας 3. Συγκριτική παρουσίαση μοντέλων αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων

Μοντέλο	Τύπος προσέγγισης	Βασική λογική
Risk Matrix	Ημι-ποσοτική	Συνδυασμός πιθανότητας και σοβαρότητας σε πίνακα δύο διαστάσεων
AHP	Πολυκριτηριακή, ημι-ποσοτική	Ιεραρχική διάσπαση προβλήματος και συγκρίσεις ανά ζεύγη με υπολογισμό βαρών

Bayesian Networks	Πλήρως πιθανοκρατική	Κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα αιτιώδους εξάρτησης με ενημέρωση πιθανοτήτων βάσει Bayes
-------------------	----------------------	---

3.4 Καινοτόμες μέθοδοι

Σε συνέχεια των παραδοσιακών τεχνικών ανάλυσης κινδύνου και των μοντέλων αξιολόγησης και ιεράρχησης που προηγήθηκαν, στην παρούσα ενότητα εξετάζονται σύγχρονες καινοτόμες προσεγγίσεις, οι οποίες είναι κυρίως βασισμένες σε ψηφιακές τεχνολογίες και σε δεδομενοκεντρικές μεθοδολογίες. Εν αντιθέσει με τις προηγούμενες τεχνικές, οι οποίες στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε δομημένες αναλυτικές διαδικασίες και στην εμπειρική γνώση των ειδικών, οι μέθοδοι που ακολουθούν αξιοποιούν δυναμικά δεδομένα και υπολογιστική ισχύ.

3.4.1 Η ανάλυση κινδύνου μέσω BIM (BIM-based Risk Analysis) ως ψηφιακή ολοκληρωμένη προσέγγιση

Η ενσωμάτωση του Building Information Modeling (BIM) στη διαχείριση των κινδύνων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των τεχνικών έργων. Πρωτίστως, επισημαίνεται ότι το BIM δεν περιορίζεται σε μία τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση. Πέραν αυτού, αποτελεί ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό περιβάλλον διαχείρισης πληροφοριών. Πρόκειται για ένα διαχειριστικό περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση σχεδιαστικών, χρονικών, οικονομικών και λειτουργικών δεδομένων σε ενιαίο μοντέλο (Eastman et al., 2011). Έτσι, διακατέχεται από μία δυναμική δομή, η οποία καθιστά το BIM ιδιαίτερα κατάλληλο για την ανάλυση και πρόβλεψη κινδύνων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου.

Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της ανάλυσης της επικινδυνότητας, το BIM επιτρέπει την οπτικοποίηση πιθανών συγκρούσεων (clash detection) μεταξύ των κατασκευαστικών στοιχείων, πριν από την έναρξη της κατασκευής. Καθίσταται εύκολα κατανοητό ότι η έγκαιρη ανίχνευση ενδεχόμενων ασυμβατοτήτων μειώνει τον κίνδυνο τεχνικών σφαλμάτων, αλλά και τον κίνδυνο επανασχεδιασμού και καθυστερήσεων. Πρόκειται, λοιπόν, για μία δυνατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική σε

σύνθετα έργα, όπου η αλληλεπίδραση διαφορετικών συστημάτων, ήτοι δομικών, ηλεκτρομηχανολογικών και υδραυλικών, είναι πιθανόν να δημιουργήσει σημαντικούς κινδύνους, κατά την υλοποίηση (Azhar, 2011).

Πέραν της γεωμετρικής απεικόνισης, το BIM είναι δυνατόν να επεκταθεί σε διαστάσεις χρόνου (4D BIM) και κόστους (5D BIM). Έτσι, επιτρέπει την προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων κατασκευής. Μέσω της διασύνδεσης με εργαλεία προσομοίωσης, όπως επί παραδείγματι η Monte Carlo, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση πιθανών αποκλίσεων σε χρονοδιαγράμματα και προϋπολογισμούς. Σε κάθε περίπτωση, το ότι επιτρέπεται η ενσωμάτωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο συμβάλλει στην έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων, αλλά και στη λήψη διορθωτικών μέτρων (Bryde et al., 2013).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του BIM στη διαχείριση του κινδύνου είναι η ενίσχυση της συνεργασίας που επικρατεί μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών. Η κοινή ψηφιακή πλατφόρμα επιτρέπει τη διαφανή ανταλλαγή πληροφοριών. Την ίδια στιγμή, μειώνει τον κίνδυνο πιθανής λανθασμένης επικοινωνίας. Μάλιστα, σε έργα μεγάλης κλίμακας, όπου συμμετέχουν πολλοί φορείς και υπεργολάβοι, η συγκεντρωτική διαχείριση δεδομένων συμβάλλει στη μείωση διοικητικών και οργανωτικών κινδύνων (Succar, 2009).

Στο σημείο αυτό, η μελέτη που διεξήχθη από τους Zhang et al. (2013) αναγνωρίζει ότι η χρήση της μεθόδου BIM μπορεί να μειώσει σημαντικά τα κατασκευαστικά σφάλματα και να ενισχύσει την ασφάλεια εργοταξίου, μέσω της πρόβλεψης επικίνδυνων φάσεων εργασίας και της βελτιστοποίησης της ροής δραστηριοτήτων. Συν τοις άλλοις, οι Zhang et al. (2013) αναφέρουν ότι η σύνδεση του BIM με αισθητήρες και τεχνολογίες Internet of Things επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση δομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Αυτό συνεπάγεται την ενίσχυση της δυναμικής διαχείρισης του κινδύνου.

Ωστόσο, η επιτυχής υλοποίηση της μεθόδου BIM-based Risk Analysis απαιτεί υψηλό επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας, εκπαίδευση προσωπικού και επένδυση στην πλέον κατάλληλη τεχνολογική υποδομή. Επιπλέον, η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών λογισμικών και η προστασία δεδομένων αποτελούν ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Πέραν των ανωτέρω, όταν απουσιάζουν τυποποιημένες διαδικασίες ενσωμάτωσης της διαχείρισης κινδύνου στο BIM, αυτό μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητά του (Volk et al., 2014).

3.4.2 Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) ως ποσοτική και προγνωστική μέθοδος διαχείρισης κινδύνου

Η αξιοποίηση τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning, ML) στη διαχείριση του κινδύνου επί του πεδίου των τεχνικών έργων αποτελεί μία από τις πλέον δυναμικά αναπτυσσόμενες τάσεις, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Πιο αναλυτικά η Μηχανική Μάθηση, ούσα ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης, επιτρέπει στους αλγορίθμους να εντοπίζουν πρότυπα σε μεγάλα σύνολα δεδομένων. Εν συνεχεία, οι αλγόριθμοι έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν προβλέψεις χωρίς να έχουν προγραμματιστεί ρητά για κάθε πιθανό σενάριο (Goodfellow et al., 2016).

Στο σημείο αυτό, διευκρινίζεται ότι στο πλαίσιο των τεχνικών έργων, η εφαρμογή της εστιάζει κυρίως στην πρόβλεψη καθυστερήσεων, υπερβάσεων κόστους, ατυχημάτων και τεχνικών αστοχιών. Εδώ, υπενθυμίζεται ότι η διαχείριση κινδύνου σε μεγάλα έργα χαρακτηρίζεται από πολυπαραγοντικότητα και δυναμική μεταβολή συνθηκών. Έτσι, οι παραδοσιακές στατιστικές μέθοδοι εύλογα δυσκολεύονται να αποτυπώσουν μη γραμμικές σχέσεις και πολύπλοκες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαφορετικών μεταβλητών (Liu & Tian, 2019).

Οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα, τα Δένδρα Απόφασης, οι Τυχαία Δάση (Random Forests) και τα Support Vector Machines, μπορούν να επεξεργαστούν μεγάλο όγκο δεδομένων. Έτσι, έχουν τη δυνατότητα να εντοπίσουν σύνθετα μοτίβα που σχετίζονται με την εμφάνιση κινδύνων (Bishop, 2006).

Στα τεχνικά έργα, οι εφαρμογές της Μηχανικής Μάθησης εμπεριέχουν την ανάλυση ιστορικών δεδομένων εργοταξίων για την πρόβλεψη ατυχημάτων. Επίσης, περιλαμβάνουν την εκτίμηση πιθανότητας καθυστέρησης έργων βάσει χαρακτηριστικών σύμβασης και περιβάλλοντος, καθώς και την πρόβλεψη δομικών αστοχιών, μέσω αισθητήρων παρακολούθησης (Zhu et al., 2021).

Οι Gondia et al. (2020) επισημαίνουν ότι τα μοντέλα πρόβλεψης που είναι βασισμένα στη μηχανική μάθηση παρουσιάζουν υψηλότερη ακρίβεια, τουλάχιστον εν συγκρίσει με παραδοσιακά μοντέλα παλινδρόμησης. Η ακρίβεια αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν οι μεταβλητές είναι πολλές και αλληλοεξαρτώμενες.

Συν τοις άλλοις, η Μηχανική Μάθηση επιτρέπει τη μετάβαση από την αντιδραστική στην προληπτική διαχείριση κινδύνου. Πιο αναλυτικά, μέσω της συνεχούς συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, τα μοντέλα έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίζουν πρόωρα ενδεχόμενες ενδείξεις απόκλισης από το επιθυμητό πρότυπο και να ειδοποιούν για πιθανές αστοχίες. Η διασύνδεση με τεχνολογίες αισθητήρων και Internet of Things ενισχύει περαιτέρω τη δυνατότητα που έχουν τα μοντέλα της μηχανικής μάθησης στο να παρακολουθούν και αν εντοπίζουν αστοχίες, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο (Van & Quoc, 2021).

Ωστόσο, η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αξιοπιστία των προβλέψεων. Για παράδειγμα, ελλιπή, μεροληπτικά ή ασυνεπή δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα (Wang et al., 2019).

Επιπλέον, πολλά μοντέλα, και δη τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα, λειτουργούν ως «μαύρα κουτιά». Αυτό σημαίνει ότι καθίσταται δύσκολη η ερμηνεία των αποτελεσμάτων και η διαφάνεια στη λήψη αποφάσεων (Rudin, 2019). Άρα, σε περιβάλλοντα, όπου η λογοδοσία είναι κρίσιμη, η ερμηνευσιμότητα των μοντέλων αποτελεί σημαντικό ζήτημα.

Όπως τονίζουν οι Shuang & Zhang (2023), η αποτελεσματική ενσωμάτωση της Μηχανικής Μάθησης στη διαχείριση κινδύνου απαιτεί συνδυασμό τεχνικής εξειδίκευσης, αξιόπιστων δεδομένων και θεσμικού πλαισίου που διασφαλίζει την ηθική χρήση και την προστασία προσωπικών δεδομένων. Επίσης, ο Aven (2016) επισημαίνει ότι οι ποσοτικές μέθοδοι πρέπει να συνοδεύονται από κριτική αξιολόγηση των υποθέσεων και των περιορισμών τους, διότι με τον τρόπο αυτόν θα αποφευχθεί η υπερεκτίμηση της ακρίβειας των μοντέλων.

3.4.3 Η ενσωμάτωση GIS στη διαχείριση κινδύνου ως χωρική αναλυτική προσέγγιση

Η ενσωμάτωση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographic Information Systems, GIS) στη διαχείριση κινδύνου των τεχνικών έργων αποτελεί μία σημαντική καινοτόμο προσέγγιση. Πρόκειται για μία ιδιαίζουσας σπουδαιότητας καινοτομία, ιδίως σε έργα που επηρεάζονται έντονα από χωρικούς, περιβαλλοντικούς και γεωτεχνικούς παράγοντες (Bansal, 2011).

Πιο αναλυτικά, τα GIS επιτρέπουν τη συλλογή, αποθήκευση, ανάλυση και οπτικοποίηση γεωχωρικών δεδομένων. Πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο κατανόησης της χωρικής διάστασης της επικινδυνότητας (Longley et al., 2015).

Εν αντιθέσει με τις παραδοσιακές μεθόδους ανάλυσης κινδύνου, η χρήση GIS επιτρέπει την αποτύπωση κινδύνων που σχετίζονται με τη γεωγραφική θέση, τη μορφολογία εδάφους, τις υδρολογικές συνθήκες, τη σεισμικότητα και την εγγύτητα σε ευαίσθητες περιοχές. Παραδείγματος χάριν, σε έργα οδοποιίας ή ενεργειακών υποδομών, η χωρική ανάλυση είναι δυνατόν να εντοπίσει περιοχές υψηλού κινδύνου κατολισθήσεων ή πλημμυρών. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της λήψης των αποφάσεων, όπως επίσης και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Malczewski, 2006).

Επίσης, η ενσωμάτωση GIS στη διαχείριση κινδύνου επιτρέπει τη δημιουργία θεματικών χαρτών επικινδυνότητας. Στους χάρτες αυτούς απεικονίζονται διαφορετικά επίπεδα κινδύνου βάσει συνδυασμού χωρικών μεταβλητών. Μέσω μίας πολυκριτηριακής χωρικής ανάλυσης, μπορούν να συνδυαστούν παράγοντες όπως η κλίση του εδάφους, ο τύπος του εδάφους, ιστορικά δεδομένα φυσικών καταστροφών και δεδομένα πληθυσμιακής πυκνότητας. Έτσι, μπορεί να προκύψει ο συνολικός δείκτης επικινδυνότητας. Η εν λόγω προσέγγιση ενισχύει τη στρατηγική λήψη αποφάσεων και τη βιώσιμη χωροθέτηση των έργων (Chen et al., 2018).

Επιπλέον, τα GIS υποστηρίζουν τη δυναμική παρακολούθηση κινδύνων. Αυτό είναι εφικτό μέσω της διασύνδεσης που έχουν με τα απαραίτητα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Επί παραδείγματι, υπάρχει διασύνδεση με μετεωρολογικά στοιχεία ή με δεδομένα αισθητήρων. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε έργα μεγάλης διάρκειας, όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται ανά πάσα στιγμή (Yu et al., 2012).

Πέραν των ανωτέρω, η χωρική απεικόνιση των κινδύνων διευκολύνει και την επικοινωνία με τα ενδιαφερόμενα μέρη. Συν τοις άλλοις, επιτρέπει την ταχύτερη και καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων δεδομένων ακόμα και από άτομα που δεν έχουν τις κατάλληλες και εξειδικευμένες γνώσεις (Xu, 2021).

Σε κάθε περίπτωση, όπως αναφέρουν οι Akindele et al. (2025), η αποτελεσματική αξιοποίηση GIS στη διαχείριση κινδύνου απαιτεί ποιοτικά και αξιόπιστα γεωχωρικά δεδομένα, καθώς και επαρκή τεχνική εξειδίκευση. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων

και η ανάγκη διαλειτουργικότητας με άλλα συστήματα, όπως τα BIM ή βάσεις δεδομένων των έργων, αποτελούν προκλήσεις που πρέπει απαραίτητως να αντιμετωπιστούν. Παράλληλα, ζητήματα ακρίβειας χωρικών δεδομένων και ενημέρωσης χαρτογραφικών βάσεων ενδέχεται να επηρεάσουν την εγκυρότητα των προκυπτουσών αναλύσεων, όπως επισημαίνεται στη μελέτη των Liu & Cui (2012).

Όσον αφορά τη σύγχρονη τάση, αυτή, όπως αναφέρουν οι Hamdy et al. (2022), προσανατολίζεται προς την ενοποίηση GIS με BIM και τεχνολογίες Machine Learning, δημιουργώντας ολοκληρωμένα ψηφιακά οικοσυστήματα διαχείρισης κινδύνου. Ο συνδυασμός της χωρικής πληροφορίας με λειτουργικά και χρονικά δεδομένα επιτρέπει την πολυδιάστατη αποτύπωση της επικινδυνότητας. Έτσι, ενισχύεται η ανθεκτικότητα των έργων απέναντι σε φυσικούς και ανθρωπογενείς κινδύνους.

Στον πίνακα που ακολουθεί πραγματοποιείται συγκριτική παρουσίαση των ανωτέρω καινοτόμων μεθόδων για την διαχείριση του κινδύνου:

Πίνακας 4. Συγκριτική παρουσίαση καινοτόμων μεθόδων διαχείρισης κινδύνου

Μέθοδος	Βασική φιλοσοφία	Τύπος δεδομένων	Επίπεδο ανάλυσης	Κύρια εφαρμογή σε τεχνικά έργα	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
BIM-based Risk Analysis	Ολοκληρωμένο ψηφιακό μοντέλο διαχείρισης πληροφοριών σε όλο τον κύκλο ζωής	Σχεδιαστικά, χρονικά (4D), οικονομικά (5D), λειτουργικά δεδομένα	Σχεδιαστικό, κατασκευαστικό και λειτουργικό	Clash detection, προσομοίωση σεναρίων, έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων	Οπτικοποίηση συγκρούσεων, μείωση τεχνικών σφαλμάτων, ενίσχυση συνεργασίας, διαφάνεια	Απαιτεί ψηφιακή ωριμότητα, εκπαίδευση, επενδύσεις, ζητήματα διαλειτουργικότητας και προστασίας δεδομένων
Machine Learning	Αλγοριθμική μάθηση προτύπων από μεγάλα σύνολα δεδομένων	Ιστορικά δεδομένα έργων, αισθητήρες, περιβαλλοντικά και διοικητικά δεδομένα	Προγνωστικό και δυναμικό	Πρόβλεψη καθυστερήσεων, υπερβάσεων κόστους, ατυχημάτων και αστοχιών	Υψηλή προβλεπτική ακρίβεια, ανίχνευση μη γραμμικών σχέσεων, μετάβαση σε προληπτική διαχείριση	Εξάρτηση από ποιότητα δεδομένων, «μαύρο κουτί», ανάγκη τεχνικής εξειδίκευσης και θεσμικού πλαισίου

GIS Integration	Χωρική ανάλυση και οπτικοποίηση γεωγραφικής διάστασης κινδύνου	Γεωχωρική, περιβαλλοντικά, γεωτεχνική, μετεωρολογικά δεδομένα	Χωρικό και στρατηγικό	Χαρτογράφηση κινδύνων, ανάλυση χωροθέτησης, θεματικοί χάρτες επικινδυνότητας	Κατανόηση χωρικής επικινδυνότητας, υποστήριξη βιώσιμης χωροθέτησης, ενίσχυση επικοινωνίας	Απαιτεί αξιόπιστα γεωχωρικά δεδομένα, τεχνική εξειδίκευση, προκλήσεις διαλειτουργικότητας
--------------------	---	---	--------------------------	--	--	--

3.5 Συνολική συγκριτική αποτίμηση των μεθόδων ανάλυσης και αξιολόγησης της επικινδυνότητας

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται μία συνολική συγκριτική αποτίμηση των μεθόδων ανάλυσης και αξιολόγησης της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα. Αρχικά, παρουσιάζεται ο κάτωθι συνοπτικός πίνακας που περιλαμβάνει το σύνολο των μεθόδων αξιολόγησης που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο:

Πίνακας 5. Συγκεντρωτική συγκριτική παρουσίαση μεθόδων ανάλυσης και αξιολόγησης επικινδυνότητας

Μέθοδος	Κατηγορία	Τύπος προσέγγισης	Εστίαση ανάλυσης	Επίπεδο ποσοτικοποίησης	Κύρια πλεονεκτήματα	Βασικοί περιορισμοί
FMEA	Αναγνωρισμένη τεχνική	Προληπτική, bottom-up	Τρόποι αστοχίας επιμέρους στοιχείων	Ημι-ποσοτική (RPN)	Δομημένη, εύχρηστη, προληπτική, ενισχύει διεπιστημονική συνεργασία	Υποκειμενικότητα κλιμάκων, δεν αποτυπώνει αλληλεπιδράσεις
FTA	Αναγνωρισμένη τεχνική	Top-down, λογική	Συνδυασμοί αιτίων που οδηγούν σε top event	Ποιοτική και ποσοτική	Ανάλυση κρίσιμων διαδρομών αστοχίας, σαφής λογική δομή	Εξάρτηση από ποιότητα δεδομένων, δυσκολία σε δυναμικά συστήματα
HAZOP	Αναγνωρισμένη τεχνική	Διεργασιακή, συστηματική	Αποκλίσεις λειτουργικών παραμέτρων	Ποιοτική	Υψηλή ευαισθησία σε αποκλίσεις, δομημένη διερεύνηση σεναρίων	Χρονοβόρα, απαιτεί εξειδικευμένη ομάδα

Monte Carlo	Αναγνωρισμένη τεχνική	Πιθανοκρατική προσομοίωση	Αβεβαιότητα σε κόστος, χρόνο, απόδοση	Πλήρως ποσοτική	Κατανομή αποτελεσμάτων, ανάλυση ευαισθησίας, risk-based αποφάσεις	Εξάρτηση από εισροές, ανάγκη εξειδικευμένου υ λογισμικού
SWOT	Αναγνωρισμένη τεχνική	Στρατηγική, ολιστική	Εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες	Ποιοτική	Ενσωματώνει στρατηγικές και διοικητικές διαστάσεις	Δεν ιεραρχεί με ακρίβεια, υποκειμενικότητα
Risk Matrix	Μοντέλο ιεράρχησης	Ημι-ποσοτική κατηγοριοποίηση	Πιθανότητα × σοβαρότητα	Περιορισμένη	Απλή, οπτική απεικόνιση, διευκολύνει επικοινωνία	Απώλεια πληροφορίας, πιθανή εσφαλμένη κατάταξη
AHP	Μοντέλο ιεράρχησης	Πολυκριτηριακή ιεραρχική	Πολλαπλά κριτήρια αξιολόγησης	Μεσαίο προς υψηλό	Έλεγχος συνέπειας, μετρήσιμη προτεραιοποίηση	Πολλές συγκρίσεις, εξάρτηση από κρίση ειδικών
Bayesian Networks	Μοντέλο ιεράρχησης	Πιθανοκρατική αιτιώδης μοντελοποίηση	Αλληλεξαρτώμενοι και δυναμικοί κίνδυνοι	Υψηλό	Δυναμική ενημέρωση, backward inference, what-if ανάλυση	Πολυπλοκότητα, ανάγκη εξειδίκευσης και δεδομένων
BIM-based Risk Analysis	Καινοτόμος μέθοδος	Ψηφιακή ολοκληρωμένη μοντελοποίηση	Σχεδιαστικοί, χρονικοί και οικονομικοί κίνδυνοι	Μεσαίο έως υψηλό	Clash detection, προσομοίωση 4D/5D, ενίσχυση συνεργασίας	Απαιτεί ψηφιακή ωριμότητα και διαλειτουργικότητα
Machine Learning	Καινοτόμος μέθοδος	Αλγοριθμική προγνωστική ανάλυση	Πρόβλεψη καθυστερήσεων, κόστους, ατυχημάτων	Υψηλό	Ανίχνευση μη γραμμικών σχέσεων, προληπτική διαχείριση	Ποιότητα δεδομένων, ερμηνευσιμότητα
GIS Integration	Καινοτόμος μέθοδος	Χωρική ανάλυση	Γεωχωρικοί και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι	Μεσαίο	Χαρτογράφηση επικινδυνότητας, υποστήριξη χωροθέτησης	Ακρίβεια δεδομένων, ανάγκη εξειδίκευσης

Ο ανωτέρω συγκεντρωτικός πίνακας δείχνει τη μεθοδολογική πολυμορφία που χαρακτηρίζει τη σύγχρονη διαχείριση κινδύνου στα τεχνικά έργα. Σε πρώτο επίπεδο, οι παραδοσιακές τεχνικές, όπως η FMEA, η FTA και η HAZOP εστιάζουν κυρίως στην

τεχνική διάσταση του κινδύνου. Η FMEA λειτουργεί με λογική bottom-up, ξεκινώντας από επιμέρους στοιχεία και διαδικασίες και εξετάζοντας τους πιθανούς τρόπους αστοχίας τους. Η έμφαση δίνεται στην πρόληψη, πριν από την υλοποίηση ή κατά τη διάρκεια των κρίσιμων φάσεων της κατασκευής. Ωστόσο, εδώ εντοπίζεται μία περιορισμένη δυνατότητα αποτύπωσης των αλληλεπιδράσεων που επικρατούν μεταξύ των διαφορετικών αστοχιών. Άρα, η αδυναμία αυτή κρίνουμε ότι καθιστά την FMEA είναι περισσότερο κατάλληλη για ανάλυση σε επίπεδο υποσυστήματος και όχι τόσο κατάλληλη για τη συστημική προσέγγιση σύνθετων έργων.

Αντιθέτως, η FTA μετατοπίζει το επίκεντρο σε μια top-down προσέγγιση. Εξετάζει τις αιτιώδεις αλληλουχίες που οδηγούν σε ένα κρίσιμο συμβάν. Δίνει τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης μέσω πιθανοκρατικών υπολογισμών, η οποία, με τη σειρά της, επιτρέπει βαθύτερη κατανόηση των «κρίσιμων διαδρομών αστοχίας». Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η εν λόγω μέθοδος παραμένει σχετικά στατική και δυσκολεύεται να ενσωματώσει δυναμικές μεταβολές συνθηκών.

Η HAZOP διαφοροποιείται μέσω της διεργασιακής της προσέγγισης. Μέσω των οδηγητικών λέξεων επιτυγχάνεται η διερεύνηση των αποκλίσεων που δεν είναι άμεσα εμφανείς. Όμως, συνοδεύεται από κόστος χρόνου και πόρων.

Η προσομοίωση Monte Carlo σηματοδοτεί τη μετάβαση από ημι-ποσοτικές σε πλήρως ποσοτικές προσεγγίσεις. Η μέθοδος αυτή ενσωματώνει κατανομές πιθανότητας για κρίσιμες μεταβλητές και επιτρέπει την εκτίμηση εύρους αποτελεσμάτων αντί για τις σημειακές προβλέψεις. Άρα, θεωρούμε ότι σε έργα όπου ο χρόνος και το κόστος επηρεάζονται από πολλαπλές αβεβαιότητες, η εν λόγω μέθοδος διακατέχεται από σαφές πλεονέκτημα. Ωστόσο, η ποιότητα των αποτελεσμάτων της εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των εισροών.

Η SWOT διαφοροποιείται ως εργαλείο στρατηγικού χαρακτήρα. Εν αντιθέσει με τις τεχνικές αστοχίας, η SWOT ενσωματώνει οργανωσιακές, θεσμικές και μακροοικονομικές παραμέτρους. Ναι μεν δεν παρέχει ποσοτική ιεράρχηση, αλλά λειτουργεί αποτελεσματικά ως αρχικό στάδιο χαρτογράφησης κινδύνων.

Σε δεύτερο επίπεδο, τα μοντέλα αξιολόγησης και ιεράρχησης κινδύνων παρουσιάζουν μία διαφορετική φιλοσοφία. Η Risk Matrix αποτελεί το απλούστερο εργαλείο κατηγοριοποίησης. Πρόκειται για ένα εργαλείο που βλέπουμε ότι συνδυάζει την πιθανότητα και τη σοβαρότητα. Μάλιστα, η ευκολία της κατανόησης του εργαλείου

αυτού αποτελεί ένα από τα δυνατά σημεία του, αλλά η απώλεια πληροφορίας και η πιθανή εξομοίωση ανόμοιων κινδύνων περιορίζουν την ακρίβειά της.

Το AHP εισάγει πολυκριτηριακή λογική. Επιτρέπει την ιεραρχική αποδόμηση των σύνθετων προβλημάτων. Η δυνατότητα ελέγχου συνέπειας ενισχύει την αξιοπιστία του, αλλά το ότι εξαρτάται από υποκειμενικές κρίσεις, συνδυαστικά με τον αυξημένο αριθμό των συγκρίσεων, αποτελούν στοιχεία που μπορεί να επιβαρύνουν τη διαδικασία.

Τα Bayesian Networks αποτελούν το πλέον σύνθετο μοντέλο της κατηγορίας αυτής. Ακολουθούν μία πιθανοκρατική αιτιώδη μοντελοποίηση και δυναμική ενημέρωση πιθανοτήτων. Έτσι, επιτρέπουν τη συστημική κατανόηση της επικινδυνότητας. Όμως, συνοδεύονται από την ανάγκη υψηλής ανάγκη εξειδίκευσης και χρήσης αξιόπιστων δεδομένων.

Στο τρίτο επίπεδο, το BIM-based Risk Analysis επιτρέπει ενοποίηση γεωμετρικών, χρονικών και οικονομικών δεδομένων σε ένα ενιαίο μοντέλο. Δίνει τη δυνατότητα clash detection και προσομοίωσης 4D/5D και με τον τρόπο αυτόν, αναβαθμίζει τη διαχείριση κινδύνου από αντιδραστική σε προληπτική. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την ψηφιακή ωριμότητα του εκάστοτε οργανισμού.

Η Μηχανική Μάθηση μεταφέρει την ανάλυση σε προγνωστικό επίπεδο. Προσφέρει τη δυνατότητα της επεξεργασίας μεγάλων όγκων δεδομένων και έτσι, μπορεί να εντοπίσει μη γραμμικές σχέσεις, που διαφεύγουν των παραδοσιακών μεθόδων. Έχει υψηλή προβλεπτική ικανότητα, αλλά τίθενται ζητήματα ποιότητας των δεδομένων και ερμηνείας τους.

Η ενσωμάτωση GIS προσθέτει τη χωρική διάσταση της επικινδυνότητας. Σε έργα υποδομών, όπου οι γεωτεχνικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι καθοριστικοί, η χωρική χαρτογράφηση κινδύνου συμβάλλει στη στρατηγική χωροθέτηση, συνδυαστικά με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας.

Εν γένει, η συγκριτική αποτίμηση επιβεβαιώνει ότι καμία μέθοδος δεν επαρκεί από μόνη της για την πλήρη κατανόηση της επικινδυνότητας στα σύγχρονα τεχνικά έργα. Οι παραδοσιακές τεχνικές δίνουν τη δυνατότητα της δομημένης αναγνώρισης των αστοχιών. Κατόπιν, τα μοντέλα ιεράρχησης ενισχύουν τη συστηματική αξιολόγηση. Τέλος, οι καινοτόμες ψηφιακές μέθοδοι επιτρέπουν μία δυναμική και ταυτόχρονα

πολυδιάστατη ανάλυση. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η αποτελεσματική διαχείριση του κινδύνου προϋποθέτει μία συνδυαστική και προσαρμοστική χρήση των εν λόγω εργαλείων. Στο πλαίσιο αυτής, σε κάθε περίπτωση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το επίπεδο της πολυπλοκότητας, σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων και την οργανωσιακή ωριμότητα από την οποία διακατέχεται το κάθε έργο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες της επικινδυνότητας στην περίπτωση των τεχνικών έργων και πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες, οι τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι, οι οικονομικοί και συμβατικοί κίνδυνοι, οι περιβαλλοντικοί και γεωτεχνικοί κίνδυνοι. Τέλος, αναλύονται νομικοί και διοικητικοί κίνδυνοι.

4.1 Ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες

Οι ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα την πιθανότητα εμφάνισης ατυχημάτων, τεχνικών αστοχιών, καθώς επίσης και την πιθανότητα εμφάνισης λειτουργικής φύσεως αποκλίσεων. Παρά τη σημασία των τεχνικών προδιαγραφών και των μηχανικών υπολογισμών, ο Reason (1997), αλλά και η πιο πρόσφατη μελέτη του Baiburin (2017), έχουν αναφέρει ότι μεγάλο ποσοστό σοβαρών συμβάντων αποδίδεται σε ανθρώπινα σφάλματα, ανεπαρκή επικοινωνία, ελλιπή εκπαίδευση ή αδυναμίες στη διοικητική δομή.

Πρωτίστως, είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι η έννοια του ανθρώπινου σφάλματος δεν περιορίζεται σε μεμονωμένες λανθασμένες ενέργειες. Αντιθέτως, εντάσσεται σε ευρύτερο συστημικό πλαίσιο. Σύμφωνα με το μοντέλο «*Swiss Cheese*» του Reason (1997), τα ατυχήματα προκύπτουν από τη συνδυασμένη ύπαρξη ενεργών σφαλμάτων και λανθανουσών οργανωτικών αδυναμιών.

Οι λανθάνουσες συνθήκες, όπως είναι επί παραδείγματι οι ανεπαρκείς διαδικασίες, η πίεση χρόνου ή ενδεχόμενη ασαφής κατανομή αρμοδιοτήτων, δημιουργούν ένα περιβάλλον αυξημένης επικινδυνότητας. Αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει ακόμη και όταν οι τεχνικές προδιαγραφές είναι ορθές (Reason, 1997).

Στα τεχνικά έργα, οι ανθρώπινοι παράγοντες σχετίζονται με δεξιότητες, εμπειρία, κόπωση, επικοινωνία και συμπεριφορά στο εργοτάξιο. Η ανεπαρκής εκπαίδευση ή η έλλειψη τυποποιημένων διαδικασιών αποτελούν στοιχεία, τα οποία είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε λανθασμένους χειρισμούς εξοπλισμού ή ακόμα και σε παραβίαση των κανόνων ασφαλείας. Επίσης, η πίεση για επιτάχυνση χρονοδιαγραμμάτων ενδέχεται να

ενισχύσει την τάση παράκαμψης διαδικασιών. Αυτό, με τη σειρά του, αυξάνει τον κίνδυνο της πρόκλησης ατυχημάτων (Cooper & Phillips, 2004).

Οι Cooper & Phillips (2004) επισημαίνουν ότι η συμπεριφορά ασφάλειας επηρεάζεται σημαντικά από το οργανωτικό περιβάλλον, αλλά και από την αντίληψη των εργαζομένων σχετικά με τη δέσμευση που έχουν τα διοικητικά στελέχη σε ζητήματα ασφάλειας.

Όσον αφορά τους οργανωτικούς παράγοντες, περιλαμβάνουν τη δομή διοίκησης, την κουλτούρα ασφάλειας, τα συστήματα επικοινωνίας, καθώς επίσης και τις διαδικασίες ελέγχου. Ένας οργανισμός που διακατέχεται σαφείς ρόλους, αποτελεσματική ροή πληροφορίας και θεσμοθετημένους μηχανισμούς ελέγχου, εύλογα παρουσιάζει μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης συστημικής φύσεως σφαλμάτων. Εν αντιθέσει, η ασάφεια αρμοδιοτήτων και η έλλειψη συντονισμού μεταξύ των υπεργολάβων μπορούν να δημιουργήσουν κενά στην εφαρμογή μέτρων πρόληψης, όπως χαρακτηριστικά επισημαίνεται από τη μελέτη που διεξήχθη από τους Chan et al. (2022).

Η έννοια της «*κουλτούρας ασφάλειας*», που αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση ανθρώπινων συμπεριφορών. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τον Guldenmund (2000), η κουλτούρα ασφάλειας αντανακλά τις κοινές αξίες και αντιλήψεις ενός οργανισμού σχετικά με τη σημασία της πρόληψης. Όταν η διοίκηση δίνει προτεραιότητα στην τήρηση προδιαγραφών και ενθαρρύνει την αναφορά κινδύνων χωρίς τιμωρητική διάθεση, μειώνεται η πιθανότητα απόκρυψης προβλημάτων και ενισχύεται η συλλογική ευθύνη.

Παράλληλα, η επικοινωνία και ο συντονισμός αποτελούν κρίσιμες μεταβλητές. Στα μεγάλα τεχνικά έργα, επί των οποίων εμπλέκονται πολλαπλές ομάδες και υπεργολάβοι, η έλλειψη αποτελεσματικής επικοινωνίας είναι πιθανόν να οδηγήσει σε παρερμηνείες σχεδίων. Επίσης, μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ασυμβατότητες μεταξύ φάσεων εργασίας. Η διαχείριση ανθρώπινων πόρων και η καλλιέργεια συνεργατικής κουλτούρας μειώνουν τον κίνδυνο της πρόκλησης συγκρούσεων και της εμφάνισης επιχειρησιακών σφαλμάτων (Dekker, 2011).

Η προσέγγιση του Hollnagel (2014) στην ανάλυση επικινδυνότητας αναγνωρίζει ότι οι ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες δεν αποτελούν «*αδύναμο κρίκο*». Αντιθέτως, είναι ένα αναπόσπαστο μέρος ενός σύνθετου κοινωνικοτεχνικού συστήματος. Η

ανθεκτικότητα (resilience) ενός οργανισμού εξαρτάται από την ικανότητά του να προσαρμόζεται σε απρόβλεπτες συνθήκες και να μαθαίνει από προηγούμενα συμβάντα. Ο Hollnagel (2014), λοιπόν, υποστηρίζει ότι η μετάβαση από την προσέγγιση «Safety-I», που εστιάζει στην αποτροπή λαθών, στη «Safety-II», που επικεντρώνεται στην ενίσχυση ορθών πρακτικών, είναι δυνατόν να ενισχύσει τη συνολική αξιοπιστία των τεχνικών έργων.

4.2 Τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι

Οι τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι αποτελούν βασική κατηγορία επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα, για τον λόγο του ότι συνδέονται άμεσα με τη δομική ακεραιότητά τους. Επίσης, η συγκεκριμένη κατηγορία κινδύνων είναι συνυφασμένη και με τη λειτουργικότητα και τη συμμόρφωση του εκάστοτε έργου με τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές (Sokolov & Sukhov, 2023).

Πρόκειται για μία κατηγορία κινδύνων, που αναδύονται κυρίως κατά τα στάδια του αρχικού σχεδιασμού, της μελέτης εφαρμογής και της κατασκευής. Μάλιστα, συχνά έχουν μακροχρόνιες επιπτώσεις στη βιωσιμότητα και στο κόστος συντήρησης του έργου (PMI, 2021).

Στον πυρήνα των σχεδιαστικών κινδύνων εντοπίζονται σφάλματα ή παραλείψεις στη μελέτη. Επίσης, οι κίνδυνοι αυτοί αφορούν εσφαλμένες παραδοχές για τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και αδυναμία της ενσωμάτωσης των απαιτούμενων κανονιστικών απαιτήσεων. Η πολυπλοκότητα των σύγχρονων έργων υποδομής, όπως είναι ενδεικτικά οι σήραγγες, αυξάνει την πιθανότητα της εμφάνισης ασυμβατοτήτων μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών συστημάτων. Στο σημείο αυτό, η μελέτη των Love et al. (2011) επιβεβαιώνει ότι σημαντικό ποσοστό τεχνικών αστοχιών σχετίζεται με ελλείψεις στον αρχικό σχεδιασμό και όχι αποκλειστικά με κατασκευαστικά σφάλματα.

Όπως αναφέρεται στη μελέτη των Sokolov & Sukhov (2023), ο ανεπαρκής γεωτεχνική διερεύνηση αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνικού κινδύνου. Ενδεχόμενες εσφαλμένες εκτιμήσεις σχετικά με τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους ή την παρουσία υπόγειων υδάτων είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε καθιζήσεις ή ακόμα και στην κατάρρευση των δομικών στοιχείων. Σε έργα μεγάλου μεγέθους, η αβεβαιότητα που επικρατεί γύρω από τις γεωλογικές συνθήκες απαιτεί και τη δέουσα εκτενή

προκαταρκτική έρευνα, όπως επίσης και συντηρητικές παραδοχές που αφορούν το σχεδιαστικό σκέλος.

Παράλληλα, η εισαγωγή νέων τεχνολογιών και καινοτόμων υλικών, να μεν ενισχύει την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των έργων, αλλά παράλληλα, δημιουργεί πρόσθετους κινδύνους αβεβαιότητας. Σε αυτό το σημείο, η έλλειψη επαρκών ιστορικών δεδομένων για τη συμπεριφορά νέων υλικών υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενδέχεται να οδηγήσει σε απρόβλεπτες αστοχίες. Ορθά, λοιπόν, ο Aven (2016) επισημαίνει ότι η διαχείριση τεχνικής αβεβαιότητας απαιτεί έναν συνδυασμό ποσοτικών αναλύσεων και ποιοτικής κρίσης ειδικών.

Συν τοις άλλοις, η ανεπαρκής διαχείριση αλλαγών σχεδιασμού κατά τη διάρκεια υλοποίησης ενός έργου αποτελεί σημαντικό παράγοντα επικινδυνότητας. Πιο αναλυτικά, οι τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται χωρίς πλήρη αξιολόγηση επιπτώσεων είναι δυνατόν να διαταράξουν την ισορροπία που επικρατεί μεταξύ των επιμέρους συστημάτων. Παράλληλα, η έλλειψη ενοποιημένης πλατφόρμας συντονισμού αυξάνει τον κίνδυνο σφαλμάτων και επανασχεδιασμού. Αυτό, με τη σειρά, του, οδηγεί σε καθυστερήσεις και υπερβάσεις κόστους (Bryde et al., 2013).

Επίσης, οι τεχνικοί κίνδυνοι σχετίζονται με την ποιότητα κατασκευής και την επάρκεια της επίβλεψης. Όταν υπάρχει ανεπαρκής έλεγχος επί των υλικών, αλλά και μη συμμόρφωση με τις τεχνικές προδιαγραφές και ελλιπής τεκμηρίωση των κατασκευαστικών διαδικασιών, όλα αυτά μπορούν να υπονομεύσουν την ανθεκτικότητα ενός έργου. Έτσι, η εφαρμογή συστημάτων διασφάλισης ποιότητας και η συστηματική επιθεώρηση μειώνουν την πιθανότητα τεχνικών αστοχιών (Upadhyaya & Malek, 2023).

Οι σύγχρονες προσεγγίσεις που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπως είναι η ενσωμάτωση BIM και η προσομοίωση των σεναρίων, ενισχύουν τη δυνατότητα πρόβλεψης και πρόληψης τεχνικών κινδύνων. Παράλληλα, η οπτικοποίηση συγκρούσεων και η ανάλυση επιπτώσεων στα πρώιμα στάδια σχεδιασμού αποτελούν στρατηγικές που μειώνουν την πιθανότητα κατασκευαστικών λαθών. Ωστόσο, ακόμη και με τη χρήση προηγμένων εργαλείων, η τεχνική κρίση και η εμπειρία των μελετητών συνεχίζουν να είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντες (Deng et al., 2019).

4.3 Οικονομικοί και συμβατικοί κίνδυνοι

Ένας από τους σημαντικότερους οικονομικούς κινδύνους αφορά την υπέρβαση του προϋπολογισμού (cost overrun). Η εμπειρική έρευνα των Plebankiewicz & Wieczorek (2020) αναφέρει ότι μεγάλο ποσοστό έργων υποδομής παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ αρχικών εκτιμήσεων και τελικού κόστους. Οι Flyvbjerg et al. (2003) υποστηρίζουν ότι οι υπερβάσεις κόστους δεν αποτελούν μεμονωμένα περιστατικά, αλλά ότι πρόκειται για ένα συστημικό φαινόμενο. Μάλιστα, αναφέρουν ότι το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με αισιόδοξες προβλέψεις, στρατηγική υποεκτίμηση και ανεπαρκή διαχείριση αβεβαιότητας. Επίσης, η οικονομική αβεβαιότητα εντείνεται από διακυμάνσεις στις τιμές πρώτων υλών, μεταβολές συναλλαγματικών ισοτιμιών και απρόβλεπτες μεταβολές στις χρηματοδοτικές συνθήκες.

Παράλληλα, η χρηματοδοτική δομή ενός έργου επηρεάζει το επίπεδο της επικινδυνότητας που το χαρακτηρίζει. Για παράδειγμα, έργα που βασίζονται σε σύνθετα σχήματα χρηματοδότησης, όπως είναι επί παραδείγματι οι συμπράξεις του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (ΣΔΙΤ), εκτίθενται σε πρόσθετους κινδύνους. Οι κίνδυνοι αυτοί σχετίζονται με τη βιωσιμότητα εσόδων, όπως επίσης και με τη μεταφορά των κινδύνων μεταξύ συμβαλλομένων. Συν τοις άλλοις, πρόκειται για κινδύνους που είναι συνυφασμένοι και με τη μακροχρόνια σταθερότητα των συμβάσεων (Yescombe, 2014). Η ανεπαρκής κατανομή του κινδύνου μεταξύ των μερών μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις και επαναδιαπραγματεύσεις.

Οι συμβατικοί κίνδυνοι αφορούν κυρίως την ερμηνεία και εφαρμογή των όρων σύμβασης. Επίσης, αφορούν την κατανομή ευθυνών και τη διαχείριση των αλλαγών. ενδεχόμενες ασάφειες στις τεχνικές προδιαγραφές ή στις ρήτρες αποζημίωσης ενδέχεται να δημιουργήσουν νομικές διαμάχες και διεκδικήσεις (claims). Έτσι, η μη ορθή διαχείριση αιτημάτων αλλαγής (change orders) αποτελεί συχνή αιτία καθυστερήσεων και αύξησης του κόστους. Σύμφωνα με τους Love et al. (2011), οι αλλαγές επί του σχεδιασμού και οι συμβατικές τροποποιήσεις συμβάλλουν σε σημαντικό βαθμό στις οικονομικές αποκλίσεις που εμφανίζονται στα έργα.

Επιπλέον, οι καθυστερήσεις στις πληρωμές προς τους υπεργολάβους ή προς τους προμηθευτές μπορούν να δημιουργήσουν αλυσιδωτές επιπτώσεις στη ρευστότητα και στην πρόοδο εργασιών. Έτσι, η διαχείριση ταμειακών ροών και η παρακολούθηση χρηματοοικονομικών δεικτών αποτελούν κρίσιμα στοιχεία πρόληψης. Μάλιστα,

κυρίως στα διεθνή έργα, πολιτικοί και μακροοικονομικοί κίνδυνοι, όπως επί παραδείγματι οι αλλαγές του φορολογικού καθεστώτος ή του κανονιστικού πλαισίου, εντείνουν την υφιστάμενη αβεβαιότητα (Xie et al., 2022).

Η σύγχρονη διαχείριση οικονομικών και συμβατικών κινδύνων προϋποθέτει τη συστηματική ανάλυση ευαισθησίας και την εφαρμογή σεναρίων πρόβλεψης. Η ενσωμάτωση ποσοτικών εργαλείων, όπως η προσομοίωση Monte Carlo, επιτρέπει την εκτίμηση πιθανών αποκλίσεων κόστους και αποκλίσεων επί του χρονοδιαγράμματος. Παράλληλα, η σαφής διατύπωση των συμβατικών όρων και η πρόβλεψη μηχανισμών επίλυσης διαφορών συμβάλλουν στη μείωση της ενδεχόμενης νομικής αβεβαιότητας που μπορεί να υπάρχει (Jung et al., 2016).

Σε κάθε περίπτωση, η αποτελεσματική διαχείριση των εν λόγω κινδύνων αυτών απαιτεί έναν συνδυασμό τεχνικής, οικονομικής και νομικής εξειδίκευσης. Η διαφάνεια στις εκτιμήσεις κόστους, συνδυαστικά με τη ρεαλιστική αποτύπωση αβεβαιοτήτων και την ορθολογική κατανομή κινδύνου μεταξύ των συμβαλλομένων μερών αποτελούν τις πλέον βασικές προϋποθέσεις για τη διατήρηση της βιωσιμότητας στα έργα. Σε αντίθετη περίπτωση, οι οικονομικοί και συμβατικοί κίνδυνοι είναι δυνατόν να μετατραπούν σε έναν καθοριστικό παράγοντα αποτυχίας ενός έργου.

4.4 Περιβαλλοντικοί και γεωτεχνικοί κίνδυνοι

Αρχικά, επισημαίνεται ότι η φύση των κινδύνων αυτών είναι συχνά εξωγενής. Οι κίνδυνοι αυτοί χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας. Το εν λόγω γεγονός καθιστά αναγκαία τη συστηματική ανάλυση και πρόβλεψή τους, ήδη από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού του έργου (Fearne & Fowler, 2006).

Πιο αναλυτικά, οι γεωτεχνικοί κίνδυνοι σχετίζονται κυρίως με τη σύσταση, τη δομή και τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους και των βραχωδών σχηματισμών. Η ανεπαρκής διερεύνηση γεωλογικών συνθηκών είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καθιζήσεις ή ακόμα και σε κατολισθήσεις, ρηγματώσεις ή αστοχίες επί των θεμελιώσεων (Sierikova & Strelnikova, 2019).

Για παράδειγμα, σε έργα σιράγγων και υπόγειων κατασκευών, η αβεβαιότητα σχετικά με τις υπόγειες συνθήκες αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες

κινδύνου. Ο λόγος είναι ότι μικρές αποκλίσεις στις αρχικές παραδοχές είναι δυνατόν να επιφέρουν σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις (Einstein, 1996).

Συν τοις άλλοις, η σεισμικότητα αποτελεί κρίσιμο γεωτεχνικό παράγοντα. Ο παράγοντας αυτός είναι ακόμα πιο σημαντικός σε περιοχές υψηλής τεκτονικής δραστηριότητας. Στο σημείο αυτό, διευκρινίζεται ότι ο σχεδιασμός των κατασκευών με βάση αντισεισμικούς κανονισμούς μειώνει την πιθανότητα καταστροφικών αστοχιών. Ωστόσο, η αβεβαιότητα ως προς τη μελλοντική ένταση και συχνότητα σεισμικών γεγονότων δεν δύναται να εξαλειφθεί πλήρως (Tanyas et al., 2022).

Εδώ, η ενσωμάτωση πιθανοκρατικών μοντέλων σεισμικού κινδύνου συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης. Επίσης, συντελεί και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των έργων (Tanyas et al., 2022).

Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν πλημμύρες, ακραία καιρικά φαινόμενα, διάβρωση, άνοδο στάθμης θάλασσας, αλλά και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η αυξανόμενη συχνότητα και ένταση των ακραίων φαινομένων καθιστά αναγκαία την προσαρμογή των τεχνικών έργων στις νέες συνθήκες αβεβαιότητας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε το ότι ο IPCC (2022) επισημαίνει ότι οι υποδομές πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψιν σενάρια μελλοντικών κλιματικών μεταβολών. Έτσι, μπορεί να διασφαλιστεί η μακροχρόνια βιωσιμότητα και λειτουργικότητά τους.

Επιπλέον, περιβαλλοντικοί κίνδυνοι συνδέονται με επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ρύπανση των υδάτων, η απώλεια της βιοποικιλότητας και η εν γένει υποβάθμιση των φυσικών πόρων. Αν δεν υπάρχει πλήρης συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, αυτό μπορεί να επιφέρει κυρώσεις, αλλά και διακοπή των εργασιών ή ακόμα και κοινωνικές αντιδράσεις. Έτσι, είναι αντιληπτό ότι η περιβαλλοντική αδειοδότηση και η εκπόνηση μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελούν βασικά εργαλεία πρόληψης και διαχείρισης τέτοιου είδους κινδύνων (Provodina et al., 2021).

Επίσης, η αλληλεπίδραση των γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών παραγόντων τείνει να δημιουργεί σύνθετα σενάρια επικινδυνότητας. Για παράδειγμα, η έντονη βροχόπτωση σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ασταθή εδάφη αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα της πρόκλησης κατολισθήσεων. Η χωρική ανάλυση μέσω GIS και η χρήση πιθανοκρατικών μοντέλων επιτρέπουν την έγκαιρη αποτύπωση και ιεράρχηση των εν λόγω κινδύνων (Malczewski, 2006).

Όπως αναφέρουν οι Wang et al. (2019), η σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση περιβαλλοντικών και γεωτεχνικών κινδύνων εστιάζει στην έννοια της ανθεκτικότητας (resilience). Πρόκειται για την ικανότητα ενός έργου να αντέχει, να προσαρμόζεται και να ανακάμπτει από εξωγενείς διαταραχές. Η ενσωμάτωση των κλιματικών σεναρίων, η εφαρμογή συντηρητικών παραδοχών σχεδιασμού, συνδυαστικά με τη συνεχή παρακολούθηση των περιβαλλοντικών δεδομένων, αποτελούν δράσεις που ενισχύουν τη δυνατότητα μίας έγκαιρης αντίδρασης από την πλευρά των αρμοδίων μερών.

4.5 Νομικοί και διοικητικοί κίνδυνοι

Οι νομικοί και διοικητικοί κίνδυνοι σχετίζονται με το κανονιστικό πλαίσιο, τις διαδικασίες αδειοδότησης, τη συμβατική συμμόρφωση και τη θεσμική οργάνωση της διοίκησης. Σε έργα μεγάλης κλίμακας, οι κίνδυνοι αυτοί μπορούν να επηρεάσουν καθοριστικά τη χρονική εξέλιξη και τη χρηματοοικονομική σταθερότητα του έργου.

Ένας βασικός νομικός κίνδυνος αφορά τη μεταβολή του κανονιστικού πλαισίου, κατά τη διάρκεια υλοποίησης ενός έργου. Πρόκειται για ενδεχόμενες αλλαγές στη νομοθεσία περί περιβαλλοντικής προστασίας, πολεοδομικών κανονισμών ή φορολογικών ρυθμίσεων. Οι αλλαγές αυτές ενδέχεται να επιβάλουν πρόσθετες απαιτήσεις, τροποποιήσεις επί του σχεδιασμού ή ακόμη και αναστολή των κατασκευαστικών εργασιών. Η εν λόγω προκαλούμενη αβεβαιότητα είναι εντονότερη σε έργα με μεγάλη διάρκεια κατασκευής ή σε διεθνή έργα που υπόκεινται σε πολλαπλά κανονιστικά καθεστώτα (Yescombe, 2014).

Παράλληλα, η διαδικασία της αδειοδότησης αποτελεί συχνή πηγή διοικητικού κινδύνου. Ο κίνδυνος αυτός εμπεριέχει καθυστερήσεις στην έκδοση οικοδομικών αδειών, εγκρίσεων περιβαλλοντικών όρων ή απαλλοτριώσεων. Οι καθυστερήσεις αυτές δύνανται να διαταράξουν το χρονοδιάγραμμα της υλοποίησης ενός έργου. Πέραν αυτού, είναι δυνατόν να επιφέρουν και οικονομικής δύσεως συνέπειες. Μάλιστα, σε περιβάλλοντα με πολυεπίπεδη διοικητική δομή, η έλλειψη συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων υπηρεσιών αυξάνει την πιθανότητα της εμφάνισης γραφειοκρατικών εμποδίων (Thomas & Wright, 2020).

Επίσης, οι νομικές διαμάχες και οι διεκδικήσεις (claims) αποτελούν μία ακόμα σημαντική κατηγορία κινδύνου. Η κατηγορία αυτή αφορά διαφωνίες σχετικά με ερμηνεία συμβατικών όρων, καθυστερήσεις πληρωμών ή αποκλίσεις από τεχνικές

προδιαγραφές, οι οποίες δύνανται να οδηγήσουν σε διαιτησία ή δικαστικές διαδικασίες. Οι Love et al. (2011) επισημαίνουν ότι οι συμβατικές συγκρούσεις τείνουν να προκύπτουν από ασαφείς όρους, ή ακόμα και από ανεπαρκή διαχείριση των αλλαγών. Στην προκειμένη περίπτωση, η ύπαρξη σαφών μηχανισμών επίλυσης των διαφορών μειώνει τον κίνδυνο παρατεταμένων συγκρούσεων.

Πέραν των ανωτέρω, οι διοικητικοί κίνδυνοι συνδέονται με την οργανωτική δομή και την ικανότητα διακυβέρνησης του έργου. Πρόκειται για τον ανεπαρκή συντονισμό μεταξύ των φορέων, για τον ελλιπή έλεγχο συμμόρφωσης ή την αδυναμία διαχείρισης εγγράφων και τεκμηρίωσης. Όλα αυτά μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια πληροφοριών και στη λήψη λανθασμένων αποφάσεων. Εδώ, η αποτελεσματική διακυβέρνηση έργου (project governance) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα μείωσης διοικητικής αβεβαιότητας (PMI, 2021).

Επιπλέον, σε διεθνή έργα ή στις περιπτώσεις έργων, τα οποία χρηματοδοτούνται από διεθνείς οργανισμούς, η συμμόρφωση με πρότυπα διαφάνειας και κανόνες προμηθειών αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση. Ενδεχόμενες παραβάσεις επί των διαδικασιών ενδέχεται να οδηγήσουν σε επιβολή κυρώσεων ή ακόμα και σε απώλεια της χρηματοδότησης. Επί του σημείου τούτου, οι Klakegg et al. (2010) υπογραμμίζουν ότι η θεσμική ποιότητα και η διαφάνεια στη λήψη αποφάσεων επηρεάζουν άμεσα το επίπεδο κινδύνου μεγάλων δημόσιων έργων.

Για λόγους πληρέστερης κατανόησης, παρατίθεται ο κάτωθι πίνακας, στον οποίο συνοψίζονται οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν στο παρόν κεφάλαιο:

Πίνακας 6. Σύνοψη μελετών σχετικά με τους παράγοντες επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα

Πηγή	Κύρια θέση
Reason (1997)	Ανάπτυξη του μοντέλου “Swiss Cheese”. Τα ατυχήματα προκύπτουν από έναν συνδυασμό ενεργών σφαλμάτων και λανθασμένων οργανωτικών αδυναμιών. Οι οργανωτικές συνθήκες, ήτοι η πίεση χρόνου και οι ασαφείς ρόλοι, αυξάνουν τη συστημική επικινδυνότητα.
Baiburin (2017)	Μεγάλο ποσοστό σοβαρών συμβάντων στα τεχνικά έργα αποδίδεται σε ανθρώπινα σφάλματα και σε οργανωτικής φύσεως ανεπάρκειες.

Cooper & Phillips (2004)	Η συμπεριφορά ασφάλειας επηρεάζεται από το οργανωτικό περιβάλλον, αλλά και από την αντιλαμβανόμενη δέσμευση της διοίκησης επί θεμάτων που αφορούν την ασφάλεια.
Chan et al. (2022)	Η ασάφεια επί των αρμοδιοτήτων και ο ανεπαρκής συντονισμός μεταξύ των υπεργολάβων δημιουργούν κενά στην εφαρμογή των απαιτούμενων μέτρων πρόληψης.
Guldenmund (2000)	Η κουλτούρα ασφάλειας αντικατοπτρίζει κοινές αξίες και αντιλήψεις σχετικά με την πρόληψη. Η μη τιμωρητική αναφορά των κινδύνων μειώνει την απόκρυψη των προβλημάτων.
Dekker (2011)	Η διαχείριση των ανθρώπινων πόρων και η συνεργατική κουλτούρα μειώνουν τις συγκρούσεις και τα επιχειρησιακά σφάλματα.
Hollnagel (2014)	Μετάβαση από “Safety-I” (εστίαση στα λάθη) σε “Safety-II” (ενίσχυση ορθών πρακτικών). Η ανθεκτικότητα εξαρτάται από την ικανότητα της προσαρμογής του κάθε οργανισμού.
Sokolov & Sukhov (2023)	Οι τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι επηρεάζουν τη δομική ακεραιότητα και τη συμμόρφωση με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές. Η ανεπαρκής γεωτεχνική διερεύνηση αποτελεί σημαντικό κίνδυνο.
PMI (2021)	Οι τεχνικοί κίνδυνοι αναδύονται κυρίως στα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής και ασκούν επιρροή στη μακροχρόνια βιωσιμότητα του έργου.
Love et al. (2011)	Σημαντικό ποσοστό αστοχιών σχετίζεται με ελλείψεις στον αρχικό σχεδιασμό, αλλά και με αλλαγές και συμβατικές τροποποιήσεις, οι οποίες οδηγούν σε οικονομικές αποκλίσεις.
Aven (2016)	Η διαχείριση της τεχνικής αβεβαιότητας απαιτεί έναν συνδυασμό ποσοτικών αναλύσεων και ποιοτικής κρίσης από την πλευρά των ειδικών.
Bryde et al. (2013)	Η ανεπαρκής διαχείριση των αλλαγών σχεδιασμού διαταράσσει την ισορροπία των συστημάτων και οδηγεί σε καθυστερήσεις και σε υπερβάσεις κόστους.
Upadhyaya & Malek (2023)	Η διασφάλιση της ποιότητας και η συστηματική επιθεώρηση μειώνουν την πιθανότητα της εμφάνισης τεχνικών αστοχιών.
Deng et al. (2019)	Παρά τη χρήση BIM και προσομοιώσεων, η τεχνική κρίση και η εμπειρία των μελετητών συνεχίζουν να είναι καθοριστικές.

Plebankiewicz & Wiczorek (2020)	Μεγάλο ποσοστό έργων παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των αρχικών εκτιμήσεων και του τελικού κόστους.
Flyvbjerg et al. (2003)	Οι υπερβάσεις κόστους αποτελούν συστηματικό φαινόμενο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με αισιόδοξες προβλέψεις και με τη στρατηγική υποεκτίμηση.
Yescombe (2014)	Στα έργα ΣΔΙΤ η κατανομή του κινδύνου και η βιωσιμότητα των εσόδων επηρεάζουν την οικονομική σταθερότητα. Μεταβολές στο κανονιστικό πλαίσιο που επικρατεί αυξάνουν τα επίπεδα της αβεβαιότητας.
Xie et al. (2022)	Πολιτικοί και μακροοικονομικοί παράγοντες εντείνουν την οικονομική αβεβαιότητα στα διεθνή έργα.
Jung et al. (2016)	Η σαφής διατύπωση των συμβατικών όρων και οι μηχανισμοί επίλυσης των διαφορών μειώνουν τα επίπεδα της νομικής αβεβαιότητας.
Fearne & Fowler (2006)	Οι περιβαλλοντικοί και γεωτεχνικοί κίνδυνοι είναι εξωγενείς και χαρακτηρίζονται από υψηλή αβεβαιότητα.
Sierikova & Strelnikova (2019)	Η ανεπαρκής γεωλογική διερεύνηση είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καθιζήσεις, κατολισθήσεις και αστοχίες επί των θεμελιώσεων.
Einstein (1996)	Σε έργα σιράγγων, μικρές αποκλίσεις σε γεωτεχνικές παραδοχές μπορούν να επιφέρουν σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις.
Tanyaş et al. (2022)	Η ενσωμάτωση των πιθανοκρατικών μοντέλων σεισμικού κινδύνου ενισχύει την ανθεκτικότητα των έργων.
IPCC (2022)	Οι υποδομές πρέπει να σχεδιάζονται βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής για μακροχρόνια βιωσιμότητα.
Provodina et al. (2021)	Η συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς και οι μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων μειώνουν τους ρυθμιστικούς κινδύνους.
Malczewski (2006)	Η χωρική ανάλυση μέσω του GIS επιτρέπει την ιεράρχηση περιβαλλοντικών και γεωτεχνικών κινδύνων.
Wang et al. (2019)	Η έννοια της ανθεκτικότητας είναι κομβικής σημασίας στη σύγχρονη διαχείριση των περιβαλλοντικών κινδύνων.
Thomas & Wright (2020)	Καθυστερήσεις αδειοδοτήσεων και γραφειοκρατικά εμπόδια αποτελούν βασικούς διοικητικούς κινδύνους.
Klakegg et al. (2010)	Η θεσμική ποιότητα και η διαφάνεια ασκούν επιρροή στο επίπεδο κινδύνου των μεγάλων δημόσιων έργων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΣΤΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονες τάσεις και προοπτικές στην διαχείριση του κινδύνου στα τεχνικά έργα, συμπεριλαμβανομένης της ψηφιοποίησης και της τεχνητής νοημοσύνης, αλλά και της ενοποίησης της διαχείρισης του κινδύνου με τα πλαίσια βιωσιμότητας (sustainability) και ανθεκτικότητας (resilience). Κατόπιν, αναλύεται η προληπτική συντήρηση και ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως επίσης και οι κίνδυνοι στην περίπτωση των έργων πράσινης μετάβασης και ενεργειακών υποδομών.

5.1 Ψηφιοποίηση και τεχνητή νοημοσύνη στη διαχείριση κινδύνων τεχνικών έργων

Η ψηφιοποίηση των τεχνικών έργων και η ενσωμάτωση των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI) μετασχηματίζουν σε σημαντικό βαθμό τη διαχείριση των κινδύνων στα τεχνικά έργα. Η ενσωμάτωση των εν λόγω προηγμένων τεχνολογικών εργαλείων μετατοπίζει το επίκεντρο από την αντιδραστική αντιμετώπιση συμβάντων σε προληπτική και δυναμική πρόβλεψη (Lu et al., 2022).

Όταν ομιλούμε περί ψηφιοποίησης αναφερόμαστε στη μετάβαση σε ψηφιακά περιβάλλοντα διαχείρισης, σε συνδυασμό με την ανάλυση μεγάλων δεδομένων (big data). Η μετάβαση αυτή επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και τη βελτιστοποίηση της λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Sacks et al., 2020).

Η ψηφιοποίηση στα τεχνικά έργα εκφράζεται μέσα από την υιοθέτηση πλατφορμών BIM, αλλά και μέσα από την υιοθέτηση συστημάτων διαχείρισης έργου (project management software), αισθητήρων IoT και ψηφιακών διδύμων (digital twins). Τα ψηφιακά δίδυμα, ως δυναμικά εικονικά μοντέλα φυσικών υποδομών, επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση των λειτουργικών παραμέτρων. Επίσης, επιτρέπουν τη σύγκριση της προβλεπόμενης και της πραγματικής απόδοσης. Μάλιστα, μέσω της διασύνδεσης με δεδομένα πεδίου, ενισχύεται η ικανότητα πρόβλεψης τεχνικών αστοχιών και λειτουργικών κινδύνων (Tao et al., 2019).

Εν συνεχεία, η τεχνητή νοημοσύνη αξιοποιείται κυρίως μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και ανάλυσης προτύπων. Σε περιβάλλοντα εργοταξίων, τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να επεξεργάζονται ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων και να εντοπίζουν κρίσιμους παράγοντες που αυξάνουν την πιθανότητα της εμφάνισης ενός συμβάντος (Fang et al., 2020).

Παράλληλα, η ανάλυση της εικόνας μέσω της υπολογιστικής όρασης (computer vision) επιτρέπει την αυτόματη ανίχνευση επικίνδυνων συμπεριφορών ή μη χρήσης μέσω ατομικής προστασίας (Fang et al., 2020). Η αξιοποίηση τέτοιου είδους εργαλείων ενισχύει σημαντικά την πρόληψη. Μάλιστα, μειώνει την εξάρτηση από την αποκλειστικά ανθρώπινη επιτήρηση (Xu et al., 2021).

Εν συνεχεία, η ψηφιακή ολοκλήρωση των δεδομένων από πολλαπλές πηγές επιτρέπει τη συστημική προσέγγιση της επικινδυνότητας. Πιο αναλυτικά, η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων κόστους, χρόνου και ποιότητας είναι δυνατόν να αποκαλύψει πρότυπα, τα οποία υποδηλώνουν αυξημένο κίνδυνο υπέρβασης ή καθυστέρησης. Μάλιστα, η προγνωστική ανάλυση (predictive analytics) καθιστά δυνατή τη δημιουργία σεναρίων εξέλιξης έργου και τη λήψη διορθωτικών μέτρων, πριν την εκδήλωση κρίσιμων αποκλίσεων (Castro Miranda et al., 2022).

Ωστόσο, η υιοθέτηση των ψηφιακών τεχνολογιών και της τεχνητής νοημοσύνης συνοδεύεται από προκλήσεις. Η ποιότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων αποτελούν θεμελιώδη προϋπόθεση για την ακρίβεια των μοντέλων αυτών. Ενδεχόμενα ελλιπή ή μεροληπτικά δεδομένα είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε λανθασμένες προβλέψεις (Kim, 2025).

Επιπλέον, ζητήματα κυβερνοασφάλειας και προστασίας δεδομένων αναδεικνύονται ως νέοι τύποι κινδύνου, και δη, σε έργα κρίσιμων υποδομών (ENISA, 2021). Για τον λόγο αυτόν, εύλογα, η διασφάλιση της ακεραιότητας των ψηφιακών συστημάτων αποτελεί πλέον αναπόσπαστο μέρος της διαχείρισης κινδύνου.

Παράλληλα, η εισαγωγή της τεχνητής νοημοσύνης εγείρει ζητήματα διαφάνειας και έγκυρης ερμηνείας. Η λήψη αποφάσεων βάσει αλγοριθμικών μοντέλων απαιτεί την σαφή κατανόηση των υποθέσεων, αλλά και των περιορισμών τους. Στο σημείο αυτό, η μελέτη του Rudin (2019) τονίζει ότι η τεχνητή νοημοσύνη δεν υποκαθιστά την ανθρώπινη κρίση. Αντιθέτως, λειτουργεί υποστηρικτικά, ενισχύοντας την ικανότητα ανάλυσης και πρόβλεψης.

Στρατηγικά, η ψηφιοποίηση συμβάλλει στη μετάβαση προς πιο ανθεκτικά και βιώσιμα έργα. Άλλωστε, η ενσωμάτωση δεδομένων κλιματικού κινδύνου, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και λειτουργικής απόδοσης στις ψηφιακές πλατφόρμες επιτρέπει μία ολιστική αξιολόγηση της επικινδυνότητας. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται από τον Shi (2024), ο συνδυασμός των συστημάτων BIM, τεχνητής νοημοσύνης και GIS δημιουργεί πολυεπίπεδα συστήματα υποστήριξης των ληφθεισών αποφάσεων, τα οποία αδιαμφισβήτητα βελτιώνουν την εν γένει διακυβέρνηση ενός έργου.

5.2 Ενοποίηση διαχείρισης κινδύνου με τα πλαίσια βιωσιμότητας (sustainability) και ανθεκτικότητας (resilience)

Η σύγχρονη διαχείριση κινδύνου στα τεχνικά έργα δεν περιορίζεται πλέον στην αποτροπή ατυχημάτων ή στην αντιμετώπιση των οικονομικών αποκλίσεων. Αντιθέτως, εντάσσεται σε ένα ευρύτερο στρατηγικό πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει τη βιωσιμότητα (sustainability) και την ανθεκτικότητα (resilience) (Sesana & Dell’Oro, 2024).

Πιο αναλυτικά, η βιωσιμότητα αναφέρεται στην ισορροπημένη ικανοποίηση περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών στόχων, όπως αποτυπώθηκε ήδη από την Έκθεση Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987). Από την άλλη πλευρά, η ανθεκτικότητα συνδέεται με την ικανότητα ενός συστήματος να απορροφά διαταραχές, να προσαρμόζεται και να ανακάμπτει διατηρώντας βασικές λειτουργίες (UNDRR, 2015).

Η ενσωμάτωση αμφότερων των εννοιών αυτών στη διαχείριση κινδύνου επιβεβαιώνει ότι βρισκόμαστε σε μία μετάβαση από μία στενά τεχνική προσέγγιση σε μία ολιστική θεώρηση των τεχνικών έργων ως σύνθετων κοινωνικοτεχνικών συστημάτων. Εδώ, διευκρινίζεται ότι η παραδοσιακή ανάλυση κινδύνου εστίαζε κυρίως στον προσδιορισμό πιθανότητας και συνεπειών συγκεκριμένων γεγονότων. Ωστόσο, σε περιβάλλοντα αυξανόμενης αβεβαιότητας, όπως είναι επί παραδείγματι αυτά που διαμορφώνονται από την κλιματική αλλαγή, την ενεργειακή μετάβαση και την ψηφιοποίηση, απαιτείται μία διεύρυνση επί του πλαισίου αξιολόγησης (Murtagh et al., 2020).

Ο Aven (2016) και οι Balaguera et al. (2018), υποστηρίζουν ότι η σύγχρονη διαχείριση κινδύνου πρέπει να ενσωματώνει ευρύτερες διαστάσεις αβεβαιότητας. Σε αυτές

συμπεριλαμβάνονται και κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες. Αυτό είναι αναγκαίο, ώστε να αποφεύγεται η υποεκτίμηση συστημικών επιπτώσεων. Η εν λόγω προσέγγιση μετατοπίζει την ανάλυση από τα απομονωμένα συμβάντα στα αλληλεπιδρώντα δίκτυα των κινδύνων.

Η βιωσιμότητα εισάγει στη διαχείριση κινδύνου την έννοια της τριπλής διάστασης (triple bottom line), που αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για την ταυτόχρονη επίτευξη της οικονομικής αποδοτικότητας, περιβαλλοντικής προστασίας και κοινωνικής αποδοχής (Elkington, 1997). Στα τεχνικά έργα, αυτό μεταφράζεται σε αξιολόγηση κινδύνων, που σχετίζονται με εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κατανάλωση φυσικών πόρων, επιπτώσεις σε τοπικές κοινότητες και ζητήματα θεσμικής διακυβέρνησης.

Στο σημείο αυτό, η ενσωμάτωση κριτηρίων ESG (Environmental, Social and Governance) έχει καταστεί ένα βασικό εργαλείο αξιολόγησης στρατηγικών κινδύνων. Αυτό, διότι η μη συμμόρφωση με περιβαλλοντικά ή κοινωνικά πρότυπα είναι δυνατόν να επιφέρει οικονομικές κυρώσεις, αλλά και αρνητικές επιπτώσεις στη φήμη (World Economic Forum, 2020).

Παράλληλα, η έννοια της ανθεκτικότητας εστιάζει στην προσαρμοστική ικανότητα των έργων απέναντι σε απρόβλεπτες διαταραχές. Στην προκειμένη περίπτωση, το Πλαίσιο Sendai για τη Μείωση Κινδύνου Καταστροφών (UNDRR, 2015) υπογραμμίζει τη σημασία της ενίσχυσης των ανθεκτικών υποδομών που μπορούν να αντέχουν σε φυσικές και ανθρωπογενείς καταστροφές. Στα τεχνικά έργα, αυτό συνεπάγεται τον σχεδιασμό για ακραία κλιματικά φαινόμενα, αλλά και την ενσωμάτωση εναλλακτικών συστημάτων λειτουργίας. Επίσης, συνεπάγεται την ανάπτυξη μηχανισμών ταχείας αποκατάστασης. Εδώ, υπενθυμίζεται ότι ο Hollnagel (2014) προτείνει τη μετάβαση από την προσέγγιση «Safety-I», που εστιάζει στην αποφυγή σφαλμάτων, στη «Safety-II», που αναγνωρίζει την ικανότητα των οργανισμών να προσαρμόζονται δημιουργικά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Η ενοποίηση της βιωσιμότητας και της διαχείρισης κινδύνου αποτυπώνεται επίσης σε διεθνή πρότυπα. Το ISO 31000 (International Organization for Standardization, 2018) προωθεί την ενσωμάτωση της διαχείρισης κινδύνου στη στρατηγική διοίκηση οργανισμών. Κατόπιν, το ISO 14001 συνδέει τη διαχείριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων με συστηματική αξιολόγηση αβεβαιοτήτων. Η σύγκλιση αυτών των

πλαισίων ενισχύει τη συνοχή πολιτικών και μειώνει τον κίνδυνο κατακερματισμένων παρεμβάσεων.

Συν τοις άλλοις, η κλιματική αλλαγή αναδεικνύεται σε κυρίαρχο παράγοντα επαναπροσδιορισμού της επικινδυνότητας. Η Έκθεση του IPCC (2022) επισημαίνει ότι οι υποδομές είναι απαραίτητο να σχεδιάζονται με βάση σενάρια μελλοντικών κλιματικών μεταβολών, ενσωματώνοντας αβεβαιότητες που εκτείνονται σε ορίζοντα δεκαετιών. Η ενσωμάτωση κλιματικής φύσεως σεναρίων στη διαχείριση κινδύνου επιτρέπει τη μετάβαση από τη βραχυπρόθεσμη στη μακροπρόθεσμη αξιολόγηση της βιωσιμότητας.

Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η σύνδεση ανθεκτικότητας και βιωσιμότητας επιτυγχάνεται και μέσω της ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment). Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη φάση σχεδιασμού έως την αποξήλωση. Με τον τρόπο αυτό, οι κίνδυνοι δεν περιορίζονται στη φάση της κατασκευής αλλά εξετάζονται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Η ολιστική αυτή θεώρηση μειώνει τον κίνδυνο μετακύλισης περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων στο μέλλον (Buyle et al., 2013).

Ωστόσο, η ενοποίηση της διαχείρισης κινδύνου με τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα παρουσιάζει μεθοδολογικές προκλήσεις. Η ποσοτικοποίηση των κοινωνικών επιπτώσεων και η αποτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων σε χρηματοοικονομικούς όρους συνεχίζουν να αποτελούν σύνθετα ζητήματα. Ο Aven (2016) τονίζει ότι η υπερβολική εμπιστοσύνη σε ποσοτικά μοντέλα είναι δυνατόν να υποεκτιμήσει αβεβαιότητες υψηλού επιπέδου, και δη στους συστημικούς κινδύνους.

5.3 Προληπτική συντήρηση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Η προληπτική συντήρηση (predictive maintenance) και η ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο αποτελούν βασικούς πυλώνες της σύγχρονης διαχείρισης κινδύνου στα τεχνικά έργα. Η σημασία τους είναι μεγαλύτερη ιδίως κατά τη φάση λειτουργίας και εκμετάλλευσης υποδομών (Seeni et al., 2024).

Η παραδοσιακή διορθωτική συντήρηση ενεργοποιείται μετά την εμφάνιση βλάβης. Αντιθέτως, η προληπτική προσέγγιση βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων

παραμέτρων και στην έγκαιρη πρόβλεψη αστοχιών. Στόχος της είναι η μείωση των διακοπών λειτουργίας, όπως επίσης και η μείωση του κόστους, αλλά και ο περιορισμός των κινδύνων ασφάλειας (Mobley, 2002).

Η τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων, των συστημάτων Internet of Things (IoT) και των υποδομών επεξεργασίας των μεγάλων δεδομένων έχει καταστήσει δυνατή τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Επί παραδείγματι στις γέφυρες, σε σήραγγες, σε ενεργειακά δίκτυα και στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οι αισθητήρες παρακολουθούν πολλαπλές βασικές μεταβλητές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταβλητών που παρακολουθούνται από τα συστήματα αυτά είναι οι δονήσεις, η θερμοκρασία, ενδεχόμενες παραμορφώσεις, τα επίπεδα της υγρασίας και τα φορτία. Τα δεδομένα αυτά τροφοδοτούν τους αλγορίθμους ανάλυσης, που εντοπίζουν αποκλίσεις από τα φυσιολογικά πρότυπα λειτουργίας (Lee et al., 2014; Solanki, 2025).

Η προληπτική συντήρηση συνδέεται αρρήκτως με τη διαχείριση κινδύνου. Ο λόγος έγκειται στο ότι μειώνει την πιθανότητα αιφνίδιων και καταστροφικών αστοχιών. Η έγκαιρη ανίχνευση μικρορωγμών ή υπερθέρμανσης εξοπλισμού επιτρέπει την προγραμματισμένη παρέμβαση, πριν επέλθει η εκδήλωση ενός σοβαρού συμβάντος. Με τον τρόπο αυτό, η πιθανότητα και η σοβαρότητα των συνεπειών περιορίζονται σε σημαντικό βαθμό. Έτσι, ενισχύεται η αξιοπιστία ενός έργου (Jardine et al., 2006).

Επίσης, η ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει τη μετάβαση από στατικά μοντέλα αξιολόγησης σε δυναμικά μοντέλα διαχείρισης του κινδύνου. Παραδοσιακά, η ανάλυση της επικινδυνότητας πραγματοποιούνταν περιοδικά. Πρόκειται για μία διαδικασία η οποία γινόταν κυρίως βάσει ιστορικών δεδομένων. Στο πλαίσιο της σημερινής εποχής, όμως, η συνεχής ροή της πληροφορίας καθιστά δυνατή την άμεση αναπροσαρμογή εκτιμήσεων κινδύνου, λαμβάνοντας υπόψιν τις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Στο σημείο αυτό, οι Tao et al. (2019) επισημαίνουν ότι η διασύνδεση των ψηφιακών διδύμων με δεδομένα αισθητήρων ενισχύει την ικανότητα πρόβλεψης και βελτιστοποίησης της λειτουργίας.

Σημαντική συμβολή στην προληπτική συντήρηση έχει και η Μηχανική Μάθηση. Επί του συγκεκριμένου θέματος, επισημαίνεται ότι οι αλγόριθμοι ταξινόμησης και παλινδρόμησης έχουν τη δυνατότητα να προβούν στον εντοπισμό μοτίβων, τα οποία προηγούνται των βλαβών. Έτσι, δημιουργούνται μοντέλα πρόβλεψης του «χρόνου έως

την *αστοχία*» (remaining useful life). Η εφαρμογή τέτοιων μοντέλων σε ενεργειακές εγκαταστάσεις ή στον ιομηχανικό εξοπλισμό έχει αποδειχθεί ότι μειώνει σημαντικά το κόστος προγραμματιστών διακοπών (Fregonara & Ferrando, 2020).

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της προληπτικής συντήρησης εξαρτάται από την ποιότητα και πληρότητα των δεδομένων. Για παράδειγμα, η ελλιπής βαθμονόμηση των αισθητήρων ή απώλεια σημαντικών δεδομένων μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες εκτιμήσεις. Επιπλέον, η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί την κατοχή επαρκούς υποδομής, αλλά και την απασχόληση εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού (ENISA, 2021).

Συν τοις άλλοις, ζητήματα κυβερνοασφάλειας αναδεικνύονται επίσης ως κρίσιμοι παράγοντες. Τα ζητήματα αυτά είναι ακόμα σημαντικότερα στην περίπτωση των έργων που αφορούν κρίσιμες υποδομές. Πρόκειται για έργα, επί των οποίων ενδεχόμενη κακόβουλη παρέμβαση στα ψηφιακά συστήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει σοβαρούς κινδύνους που θα είχαν αντίκτυπο στο ευρύτερο κοινωνικό σύνολο (Mourtzis & Vlachou, 2018).

Σε κάθε περίπτωση, η υιοθέτηση της προληπτικής συντήρησης στη στρατηγική διαχείρισης κινδύνου ενισχύει την έννοια της ανθεκτικότητας. Για παράδειγμα, ένα έργο το οποίο παρακολουθείται συνεχώς και προσαρμόζεται βάσει πραγματικών δεδομένων παρουσιάζει αυξημένη ικανότητα της απορρόφησης των προκυπτουσών διαταραχών. Το ότι έχει υπάρξει μετατόπιση από την προγραμματισμένη περιοδική συντήρηση στην συντήρηση βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) μειώνει τις αβεβαιότητες και δεν τίθεται αμφιβολία για το ότι οδηγεί στην βελτιστοποίηση της αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων (Prajapati et al., 2012).

5.4 Κίνδυνοι σε έργα πράσινης μετάβασης και ενεργειακών υποδομών

Όπως ήδη έχει καταστεί κατανοητό από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέχρι στιγμής στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πράσινη μετάβαση και η αναδιάρθρωση του ενεργειακού τομέα αποτελούν κεντρικούς άξονες της σύγχρονης αναπτυξιακής πολιτικής. Όμως, δεν παύουν να αποτελούν στοιχεία, τα οποία συνοδεύονται από ένα ιδιαίτερα σύνθετο πλέγμα κινδύνων (Ige et al., 2024).

Πιο αναλυτικά, τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα δίκτυα αποθήκευσης, οι υποδομές υδρογόνου και τα έξυπνα δίκτυα (smart grids) ενσωματώνουν υψηλό βαθμό τεχνολογικής και κανονιστικής αβεβαιότητας. Πρόκειται για ένα γεγονός, το οποίο καθιστά τη συστηματική ανάλυση επικινδυνότητας απαραίτητη προϋπόθεση της βιωσιμότητας (Awujoola et al., 2025).

Πρωτίστως, επισημαίνεται ότι ένας από τους βασικούς κινδύνους στα έργα πράσινης μετάβασης αφορά την τεχνολογική ωριμότητα. Πιο αναλυτικά, πολλές τεχνολογίες, όπως επί παραδείγματι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας ή η παραγωγή πράσινου υδρογόνου, βρίσκονται σε στάδιο ταχείας εξέλιξης. Η περιορισμένη ιστορική εμπειρία αυξάνει τα επίπεδα βεβαιότητας που υπάρχουν σχετικά με τη μακροχρόνια απόδοση, αλλά και σχετικά με τη διάρκεια ζωής και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων (IEA, 2022). Στο σημείο αυτό, η μελέτη που διεξήχθη από τον Aven (2016) επισημαίνει ότι η διαχείριση τέτοιων καινοτομιών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη διατύπωση υποθέσεων, αλλά και στη συνεκτίμηση βαθύτερων αβεβαιοτήτων.

Παράλληλα, τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εκτίθενται σε κλιματικούς και περιβαλλοντικούς κινδύνους. Αναπόφευκτα, η παραγωγή ενέργειας από αιολικά ή φωτοβολταϊκά συστήματα εξαρτάται από μεταβλητές φυσικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές ενδέχεται να μεταβληθούν λόγω του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Η εν λόγω μεταβλητότητα, με τη σειρά της, επηρεάζει τόσο τη λειτουργική απόδοση όσο και τα χρηματοοικονομικά μοντέλα βιωσιμότητας (IPCC, 2022).

Επιπλέον, ακραία καιρικά φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στις ενεργειακές υποδομές. Το ενδεχόμενο αυτό ενισχύει σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό την ανάγκη του σχεδιασμού των τεχνικών έργων με γνώμονα την ανθεκτικότητα (Rustambekov et al., 2024).

Συν τοις άλλοις, ιδιαίτερη σημασία έχουν και οι ρυθμιστικοί κίνδυνοι. Πιο συγκεκριμένα, τα έργα πράσινης μετάβασης εξαρτώνται στις συνηθέστερες περιπτώσεις από επιδοτήσεις, από καθεστώτα εγγυημένων τιμών ή από μηχανισμούς εμπορίας ρύπων. Σε περίπτωση κατά την οποία περιέχουν μεταβολές στο κανονιστικό πλαίσιο ή στην ενεργειακή πολιτική, αυτές αδιαμφισβήτητα θα ασκήσουν επιρροή στην χρηματοοικονομική βιωσιμότητα των επενδύσεων. Για τον λόγο αυτόν, άλλωστε, το World Economic Forum (2020) υπογραμμίζει ότι η ενεργειακή μετάβαση συνδέεται

με μεταβατικούς κινδύνους (transition risks). Πρόκειται για κινδύνους, οι οποίοι απορρέουν από τις πολιτικές αποφάσεις και από ενδεχόμενες αλλαγές που μπορεί να συμβούν στις αγορές (Witt, 2024).

Ένας επιπλέον παράγοντας επικινδυνότητας αφορά την κοινωνική αποδοχή. Πιο αναλυτικά, τα έργα αιολικών πάρκων ή μεγάλων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων συχνά αντιμετωπίζουν αντιδράσεις τοπικών κοινοτήτων. Οι αντιδράσεις αυτές είναι εντονότερες κυρίως όταν εγείρονται ζητήματα περιβαλλοντικής υποβάθμισης ή οπτικής όχλησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όμως, η έλλειψη διαβούλευσης και διαφάνειας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καθυστερήσεις ή νομικές προσφυγές. Αυτά με τη σειρά τους ενισχύουν αφενός τους διοικητικούς και αφετέρου τους οικονομικούς κινδύνους, όπως αυτοί αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι ενεργειακές υποδομές υψηλής διασύνδεσης, όπως είναι επί παραδείγματι τα έξυπνα δίκτυα και τα συστήματα αποθήκευσης, εισάγουν επιπλέον κινδύνους που εμπίπτουν στη σφαίρα της κυβερνοασφάλειας. Η αυξανόμενη ψηφιοποίηση του ενεργειακού τομέα καθιστά τα συστήματα ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις. Αυτές, εν συνεχεία, δύνανται να διαταράξουν τη λειτουργία των κρίσιμων υποδομών (ENISA, 2021). Για τον λόγο αυτόν, η ενσωμάτωση μέτρων κυβερνοπροστασίας στη διαχείριση κινδύνου αποτελεί πλέον αναπόσπαστο στοιχείο της ενεργειακής ασφάλειας (Solanki, 2025).

Στο πλαίσιο της ανθεκτικότητας, η πράσινη μετάβαση απαιτεί σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψιν τόσο φυσικούς όσο και συστημικούς κινδύνους. Η διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών, η αποκέντρωση της παραγωγής, συνδυαστικά με την ενίσχυση των διασυνδέσεων μεταξύ δικτύων αυξάνουν την ικανότητα της απορρόφησης των διαταραχών. Σύμφωνα με τον UNDRR (2015), η ενίσχυση των ανθεκτικών υποδομών αποτελεί μία θεμελιώδη στρατηγική υπέρ της προώθησης της βιώσιμης ανάπτυξης (Matsuoka & Gonzales Rocha, 2020).

Επομένως, τα έργα πράσινης μετάβασης και ενεργειακών υποδομών ενσωματώνουν υψηλό επίπεδο τεχνολογικής, ρυθμιστικής και περιβαλλοντικής αβεβαιότητας. Η ολοκληρωμένη διαχείριση του κινδύνου σε αυτά τα έργα απαιτεί έναν συνδυασμό τεχνικής αξιολόγησης, θεσμικής σταθερότητας και στρατηγικού σχεδιασμού της ανθεκτικότητας. Η επιτυχία της ενεργειακής μετάβασης, λοιπόν, δεν εξαρτάται μόνο

από την τεχνολογική καινοτομία. Πέραν αυτής, εξαρτάται και από την ικανότητα της διαχείρισης των πολυεπίπεδων κινδύνων που τη συνοδεύουν.

Για λόγους πληρέστερης κατανόησης, παρατίθεται ο κάτωθι πίνακας, στον οποίο συνοψίζονται οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν στο παρόν κεφάλαιο:

Πίνακας 7. Σύνοψη μελετών σχετικά με τις σύγχρονες τάσεις στη διαχείριση κινδύνου

Πηγή	Κύρια θέση
Lu et al. (2022)	Η ψηφιοποίηση και η τεχνητή νοημοσύνη μετατοπίζουν τη διαχείριση του κινδύνου από αντιδραστική σε προληπτική και δυναμική πρόβλεψη.
Sacks et al. (2020)	Η μετάβαση προς τα ψηφιακά περιβάλλοντα και η ανάλυση των μεγάλων δεδομένων επιτρέπουν την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων, όπως επίσης και τη βελτιστοποίηση αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.
Tao et al. (2019)	Τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση των λειτουργικών παραμέτρων και την ενίσχυση της πρόβλεψης των αστοχιών μέσω της καλύτερης διασύνδεσης με τα δεδομένα πεδίου.
Fang et al. (2020)	Η τεχνητή νοημοσύνη και η υπολογιστική όραση επιτρέπουν την ανάλυση ιστορικών ατυχημάτων και την αυτόματη ανίχνευση επικίνδυνων συμπεριφορών.
Xu et al. (2021)	Η ανάλυση εικόνας μειώνει την αποκλειστική εξάρτηση από την ανθρώπινη επιτήρηση στα εργοταξιακά περιβάλλοντα.
Castro Miranda et al. (2022)	Η προγνωστική ανάλυση μεγάλων δεδομένων κόστους και χρόνου επιτρέπει τη δημιουργία σεναρίων και την έγκαιρη λήψη διορθωτικών μέτρων.
Kim (2025)	Η ποιότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων αποτελούν βασική προϋπόθεση για την ακρίβεια των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης.
ENISA (2021)	Η κυβερνοασφάλεια και η προστασία δεδομένων αποτελούν τους νέους τύπους κινδύνου στα ψηφιοποιημένα έργα και ειδικά στις κρίσιμες υποδομές.
Rudin (2019)	Η τεχνητή νοημοσύνη δεν υποκαθιστά την ανθρώπινη κρίση, ενώ παράλληλα απαιτείται διαφάνεια και ερμηνευσιμότητα μοντέλων.
Shi (2024)	Ο συνδυασμός BIM, AI και GIS δημιουργεί πολυεπίπεδα συστήματα υποστήριξης της διαδικασίας της λήψης αποφάσεων και ενισχύει τη διακυβέρνηση των έργων.

Sesana & Dell’Oro (2024)	Η σύγχρονη διαχείριση κινδύνου εντάσσεται σε στρατηγικό πλαίσιο βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας.
World Commission on Environment and Development (1987)	Ορισμός βιωσιμότητας ως ισορροπία περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών στόχων.
UNDRR (2015)	Η ανθεκτικότητα αφορά την ικανότητα της απορρόφησης διαταραχών και της ανάκαμψης των υφιστάμενων υποδομών (Πλαίσιο Sendai).
Murtagh et al. (2020)	Η αυξανόμενη αβεβαιότητα απαιτεί τη διεύρυνση της παραδοσιακής ανάλυσης κινδύνου σε συστημικό επίπεδο.
Aven (2016)	Η σύγχρονη διαχείριση κινδύνου πρέπει να ενσωματώνει βαθύτερες αβεβαιότητες και κοινωνικούς αλλά και περιβαλλοντικούς παράγοντες.
Balaguera et al. (2018)	Η ανάλυση κινδύνου πρέπει να εξετάζει αλληλεπιδρώντα δίκτυα κινδύνων και όχι διακριτά και αυτοτελή συμβάντα.
Elkington (1997)	Η έννοια του triple bottom line εισάγει τριπλή διάσταση αξιολόγησης, που είναι η οικονομική, η περιβαλλοντική και η κοινωνική.
World Economic Forum (2020)	Τα κριτήρια ESG συνδέονται με στρατηγικούς και μεταβατικούς κινδύνους στη βιωσιμότητα των επενδύσεων.
International Organization for Standardization (2018)	Το ISO 31000 προωθεί την ενσωμάτωση της διαχείρισης κινδύνου στη στρατηγική διοίκηση.
IPCC (2022)	Οι υποδομές πρέπει να σχεδιάζονται με βάση σενάρια κλιματικής αλλαγής μακροπρόθεσμου ορίζοντα.
Buyle et al. (2013)	Η ανάλυση κύκλου ζωής επιτρέπει την ολιστική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών κινδύνων σε όλο τον κύκλο ζωής ενός έργου.
Seeni et al. (2024)	Η προληπτική συντήρηση αποτελεί τον βασικό πυλώνα της σύγχρονης διαχείρισης κινδύνου στη φάση της λειτουργίας των υποδομών.
Mobley (2002)	Η προληπτική συντήρηση βασίζεται στην παρακολούθηση παραμέτρων και στην έγκαιρη πρόβλεψη των αστοχιών.
Lee et al. (2014)	Οι αισθητήρες IoT επιτρέπουν την συλλογή δεδομένων λειτουργίας και την έγκαιρη ανίχνευση ενδεχόμενων αποκλίσεων.
Solanki (2025)	Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο ενισχύει την πρόληψη των αστοχιών και την ενεργειακή ασφάλεια.
Jardine et al. (2006)	Η έγκαιρη ανίχνευση των μικροαστοχιών μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης καταστροφικών συμβάντων.

Fregonara & Ferrando (2020)	Τα μοντέλα πρόβλεψης “remaining useful life” μειώνουν το κόστος των απρογραμμάτιστων διακοπών στα τεχνικά έργα.
Mourtzis & Vlachou (2018)	Οι ψηφιοποιημένες υποδομές είναι ευάλωτες σε κυβερνοεπιθέσεις οι οποίες με τη σειρά τους έχουν και κοινωνικές επιπτώσεις.
Prajapati et al. (2012)	Η συντήρηση βάσει κατάστασης μειώνει τις αβεβαιότητες και βελτιστοποιεί την αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.
Ige et al. (2024)	Τα έργα πράσινης μετάβασης ενσωματώνουν ένα σύνθετο πλέγμα τεχνολογικών και ρυθμιστικών κινδύνων.
Awujoola et al. (2025)	Οι ενεργειακές υποδομές υψηλής καινοτομίας απαιτούν τη συστηματική ανάλυση της επικινδυνότητας.
IEA (2022)	Η περιορισμένη ιστορική εμπειρία σε νέες ενεργειακές τεχνολογίες αυξάνει την αβεβαιότητα της απόδοσης.
Rustambekov et al. (2024)	Τα ακραία καιρικά φαινόμενα αυξάνουν την ανάγκη σχεδιασμού ενεργειακών υποδομών, οι οποίες να έχουν ως γνώμονα την ανθεκτικότητα.
Witt (2024)	Οι μεταβατικοί κίνδυνοι απορρέουν από πολιτικές και αγοραίες αλλαγές στην ενεργειακή μετάβαση.
Matsuoka & Gonzales Rocha (2020)	Η ενίσχυση ανθεκτικών ενεργειακών υποδομών αποτελεί βασικό πυλώνα της βιώσιμης ανάπτυξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης. Επ' αυτού, επιπροσθέτως, αναφέρονται οι περιορισμοί και διατυπώνονται οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα και τέλος, προτείνεται από πλευράς μας, σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν, ένα υβριδικό μοντέλο για την αποτελεσματική διαχείριση κινδύνου στην περίπτωση των τεχνικών έργων.

6.1 Συμπεράσματα

Εκ της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαφάνηκε η διαχείριση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα ως μία πολυδιάστατη, δυναμική και στρατηγικής σημασίας διαδικασία. Πρόκειται για μία διαδικασία, η οποία υπερβαίνει τα στενά όρια της τεχνικής αξιολόγησης και ενσωματώνει οργανωτικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και θεσμικές παραμέτρους.

Πιο συγκεκριμένα, από την ανάλυση του θεωρητικού και εννοιολογικού πλαισίου προέκυψε ότι ο κίνδυνος δεν αποτελεί απλώς μία πιθανότητα για την πρόκληση ενός ανεπιθύμητου γεγονότος. Αντιθέτως, πρόκειται για μία σύνθετη συνάρτηση αβεβαιότητας, συνεπειών και συστημικών αλληλεξαρτήσεων. Η κατανόηση της έννοιας αυτής είναι αναγκαία, προκειμένου η διαχείριση έργων αυξανόμενης πολυπλοκότητας να καταστεί αποτελεσματική, όχι μόνο βραχυπρόθεσμα, αλλά και σε μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα.

Εκ της διερεύνησης του κύκλου ζωής των τεχνικών έργων διαφάνηκε ότι η επικινδυνότητα δεν περιορίζεται στη φάση της κατασκευής. Πέραν της φάσης αυτής, η επικινδυνότητα εκτείνεται από τον αρχικό σχεδιασμό έως τη λειτουργία και την αποξήλωση. Μάλιστα, από την ανάλυση της βιβλιογραφίας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποδείχτηκε ότι οι ανθρώπινοι και οργανωτικοί παράγοντες είναι καθοριστικοί. Ο λόγος έγκειται στο ότι η κουλτούρα ασφάλειας, η ποιότητα διοίκησης και η αποτελεσματική επικοινωνία επηρεάζουν ουσιαστικά την πιθανότητα της εμφάνισης εκτάκτων και επικίνδυνων συμβάντων. Μάλιστα, η προσέγγιση των έργων ως κοινωνικοτεχνικών συστημάτων ενισχύει την

κατανόηση του ρόλου της διοικητικής ωριμότητας και της ηγεσίας στον περιορισμό των κινδύνων.

Παράλληλα, οι τεχνικοί και σχεδιαστικοί κίνδυνοι αποδείχτηκε ότι αποτελούν τη βασική πηγή αβεβαιότητας και κυρίως στα έργα υψηλής πολυπλοκότητας. Επί παραδείγματι, σφάλματα σχεδιασμού, η ανεπαρκής γεωτεχνική διερεύνηση και η ατελής διαχείριση των αλλαγών μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις κόστους και χρόνου. Η έγκαιρη ενσωμάτωση εργαλείων ανάλυσης, όπως είναι ενδεικτικά τα FMEA, FTA και HAZOP, δύναται να συμβάλλει στον συστηματικό εντοπισμό και την ιεράρχηση πιθανών αστοχιών.

Εν συνεχεία, η εξέταση ποσοτικών και ποιοτικών μεθόδων κατέδειξε ότι καμία τεχνική δεν είναι επαρκής από μόνη της. Για παράδειγμα η μέθοδος Risk Matrix, αν και είναι εύχρηστη, παρουσιάζει περιορισμούς ακρίβειας. Από την άλλη πλευρά, προσεγγίσεις οι οποίες είναι περισσότερο σύνθετες, όπως είναι επί παραδείγματι τα Bayesian Networks, να μεν έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν μία δυναμική και αιτιώδη ανάλυση. Παράλληλα, όμως, απαιτούν αυξημένη τεχνική εξειδίκευση. Κατόπιν, η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία ενισχύει τη διαφάνεια πολυκριτηριακής αξιολόγησης, ενώ οι προσομοιώσεις Monte Carlo επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων. Ως εκ των ανωτέρω, η αποτελεσματική διαχείριση του κινδύνου προϋποθέτει έναν συνδυασμό εργαλείων, τα οποία είναι προσαρμοσμένα στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διαθέτει το κάθε έργο.

Επιπροσθέτως, η ανάδειξη των οικονομικών και συμβατικών κινδύνων κατέστησε κατανοητή τη σημασία των ρεαλιστικών εκτιμήσεων και της σαφούς κατανομής των ευθυνών, κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής ενός κατασκευαστικού και τεχνικού έργου. Από την παρούσα ανασκόπηση της βιβλιογραφίας διαφάνηκε ότι οι υπερβάσεις κόστους αποτελούν συχνό φαινόμενο. Το γεγονός αυτό, με τη σειρά του, καθιστά αναγκαία τη χρήση προγνωστικών μοντέλων και ανάλυσης ευαισθησίας. Σε κάθε περίπτωση η διασύνδεση της χρηματοοικονομικής παρακολούθησης και της διαχείρισης του κινδύνου ενισχύει τη βιωσιμότητα των έργων μεγάλης κλίμακας.

Κατόπιν, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στους περιβαλλοντικούς και γεωτεχνικούς κινδύνους. Πρόκειται για ένα σύνολο κινδύνων, οι οποίοι καθίστανται ολοένα σημαντικότεροι λόγω της κλιματικής μεταβολής και της αυξημένης περιβαλλοντικής ευαισθησίας. Σε αυτό το σημείο, η ανάγκη της ενσωμάτωσης σεναρίων κλιματικής

προσαρμογής και ανάλυσης κύκλου ζωής επιβεβαιώνει ότι επικρατεί μία μετάβαση προς μία μακροπρόθεσμη θεώρηση της επικινδυνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η ανθεκτικότητα των υποδομών αναδεικνύεται ως η βασική στρατηγική επιλογή.

Στο πεδίο των σύγχρονων τάσεων, η ψηφιοποίηση και η τεχνητή νοημοσύνη αποτελούν τα πρωταγωνιστικά στοιχεία του μετασχηματισμού της διαχείρισης κινδύνου. Πιο αναλυτικά, η αξιοποίηση BIM, ψηφιακών διδύμων και προγνωστικής ανάλυσης επιτρέπει τη δυναμική παρακολούθηση έργων, όπως επίσης και τη μετάβαση από την αντιδραστική προς την προληπτική διαχείριση. Παράλληλα, η προληπτική συντήρηση και η ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μειώνουν τους λειτουργικούς κινδύνους και παράλληλα ενισχύουν την αξιοπιστία. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές εισάγουν νέες μορφές κινδύνου. Πρόκειται για κινδύνους που αφορούν επί παραδείγματι τις κυβερνοαπειλές, οι οποίες απαιτούν ενσωμάτωση μέτρων ασφάλειας.

Εν συνεχεία, συμπεραίνεται ότι η ενοποίηση διαχείρισης κινδύνου με τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα σημαίνει μία θεμελιώδη μετατόπιση της ακολουθούμενης στρατηγικής. Πιο αναλυτικά, η ενσωμάτωση κριτηρίων ESG και η ευθυγράμμιση με διεθνή πρότυπα, όπως είναι για παράδειγμα το ISO 31000, ενισχύουν τη συνοχή πολιτικών και τη θεσμική αξιοπιστία. Όμως, η πράσινη μετάβαση, αν και δημιουργεί νέες ευκαιρίες, ωστόσο, συνοδεύεται από τεχνολογική και ρυθμιστική αβεβαιότητα. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την ολιστική αξιολόγηση κινδύνων.

Εν κατακλείδι, η παρούσα ανάλυση καταδεικνύει ότι η διαχείριση επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα αποτελεί μία πολυεπίπεδη διαδικασία. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την ακολούθηση συστηματικής μεθοδολογίας, διατομεακής συνεργασίας και στρατηγικής διοίκησης. Είναι γεγονός ότι η επιτυχία ενός έργου δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την τεχνική του αρτιότητα. Εξαρτάται και από επιπλέον παράγοντες, όπως είναι επί παραδείγματι η ικανότητα πρόβλεψης, προσαρμογής και ολοκληρωμένης διαχείρισης των κινδύνων. Η μετάβαση προς ψηφιακά, βιώσιμα και ανθεκτικά μοντέλα ανάπτυξης καθιστά τη διαχείριση κινδύνου αφενός μία υποστηρικτική λειτουργία και αφετέρου έναν κεντρικό άξονα στρατηγικού σχεδιασμού.

6.2 Κενά στη βιβλιογραφία

Η ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη διαχείριση της επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα, που διεξήχθη στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έδειξε ότι έχει πραγματοποιηθεί σημαντική πρόοδος σε μεθοδολογικό και τεχνολογικό επίπεδο. Όμως, την ίδια στιγμή κατέδειξε την ύπαρξη ουσιαστικών κενών που περιορίζουν την πληρότητα και τη συνοχή της επιστημονικής γνώσης.

Τα κενά αυτά εντοπίζονται τόσο σε θεωρητικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο. Μάλιστα, σχετίζονται με τη συστημική προσέγγιση κινδύνων, την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, την ποσοτικοποίηση μη χρηματοοικονομικών παραμέτρων και τη διασύνδεση βιωσιμότητας και διαχείρισης κινδύνου.

Ένα πρώτο σημαντικό κενό αφορά την περιορισμένη ενσωμάτωση κοινωνικών και οργανωσιακών παραγόντων σε ποσοτικά μοντέλα ανάλυσης κινδύνου. Παρά το γεγονός του ότι η σημασία της κουλτούρας ασφάλειας και των ανθρώπινων σφαλμάτων έχει αναλυθεί επαρκώς, όπως συμβαίνει επί παραδείγματι στις μελέτες των Reason (1997) και Guldenmund (2000), ωστόσο, τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα εξακολουθούν να εστιάζουν κυρίως σε τεχνικές και οικονομικές μεταβλητές. Η συστηματική ενσωμάτωση δεικτών οργανωσιακής ωριμότητας και η ποσοτικοποίηση της διοικητικής επίδρασης στην επικινδυνότητα συνεχίζουν να είναι περιορισμένες. Αυτό δεν παύει να δημιουργεί ένα θεωρητικό, αλλά και εμπειρικό κενό στην υφιστάμενη βιβλιογραφία.

Ένα ακόμα κενό εντοπίζεται στη διαχείριση βαθιάς αβεβαιότητας (deep uncertainty), και δη στα έργα μεγάλης χρονικής διάρκειας ή υψηλής τεχνολογικής καινοτομίας. Παρά του ότι η επικρατούσα βιβλιογραφία, όπως επί παραδείγματι η μελέτη του Aven (2016), αναγνωρίζει την ύπαρξη αβεβαιοτήτων που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν επαρκώς, ωστόσο, η πλειονότητα των εφαρμογών βασίζεται σε πιθανοκρατικές προσεγγίσεις. Πρόκειται για προσεγγίσεις, οι οποίες προϋποθέτουν διαθέσιμα και αξιόπιστα δεδομένα. Στην περίπτωση των έργων που εμπίπτουν στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης και των ενεργειακών υποδομών, όπου η τεχνολογία εξελίσσεται ταχέως, απαιτούνται νέα μεθοδολογικά εργαλεία. Για παράδειγμα, είναι απαραίτητα μεθοδολογικά εργαλεία τα οποία να συνδυάζουν τα εναλλακτικά σενάρια με την ποιοτική ανάλυση και την προσαρμοστική διακυβέρνηση.

Συν τοις άλλοις, παρά την ανάπτυξη της ψηφιοποίησης, παρατηρείται περιορισμένη εμπειρική τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας των ψηφιακών περιβαλλόντων και συστημάτων διαχείρισης των κινδύνων στα τεχνικά έργα. Αν και μελέτες, όπως είναι για παράδειγμα αυτή που διεξήχθη από τους Sacks et al. (2020), επισημαίνουν τα οφέλη των BIM, των ψηφιακών διδύμων και της τεχνητής νοημοσύνης, ωστόσο, λείπουν συγκριτικές αναλύσεις μεγάλης κλίμακας που να αποδεικνύουν τη μακροπρόθεσμη επίδρασή τους στη μείωση κόστους, του χρόνου και στη μείωση του πλήθους των ατυχημάτων. Η αξιολόγηση της απόδοσης τέτοιου είδους τεχνολογιών σε πραγματικά έργα αποτελεί ένα πεδίο που αδιαμφισβήτητα απαιτεί περαιτέρω έρευνα.

Ένα ακόμη σημαντικό κενό αφορά τη διασύνδεση της διαχείρισης κινδύνου και της βιωσιμότητας. Παρά την αναγνώριση της ανάγκης ενσωμάτωσης των ESG δεικτών και των περιβαλλοντικών σεναρίων (World Economic Forum, 2020), δεν υπάρχουν επαρκώς ενοποιημένα μοντέλα, που να συνδυάζουν την οικονομική, την περιβαλλοντική και την κοινωνική ανάλυση επικινδυνότητας σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Η ανάλυση του κύκλου ζωής και η εκτίμηση του κλιματικού κινδύνου, επί της υφιστάμενης βιβλιογραφίας, διαπιστώσαμε ότι τείνουν να λειτουργούν αποσπασματικά και όχι ως μέρος μίας ολοκληρωμένης στρατηγικής διαχείρισης.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία παρουσιάζει γεωγραφικές ανισορροπίες. Πιο αναλυτικά, οι περισσότερες εμπειρικές μελέτες προέρχονται από ανεπτυγμένες οικονομίες (Klakegg et al., 2010). Από την άλλη πλευρά, διαπιστώσαμε ότι περιορισμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα για τις αναπτυσσόμενες χώρες ή για τις περιπτώσεις περιβαλλόντων με ασταθή θεσμικά πλαίσια. Ωστόσο, οι διοικητικοί και ρυθμιστικοί κίνδυνοι διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με το θεσμικό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την ανάγκη για τη διεξαγωγή συγκριτικών διακρατικών μελετών.

Επιπλέον, εντοπίζεται έλλειψη μακροχρόνιων (longitudinal) ερευνών, που να εξετάζουν τη διαχείριση κινδύνου σε όλο τον κύκλο ζωής των έργων. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στις φάσεις του σχεδιασμού ή της κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, δεν δίνεται τόσο μεγάλη προσοχή λειτουργία και στη φάση της αποξήλωσης. Η διασύνδεση της προληπτικής συντήρησης, της ανάλυσης δεδομένων και της διαχείρισης της επικινδυνότητας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός έργου συνεχίζει να αποτελεί ένα πεδίο που είναι σχετικά ανεξερεύνητο.

Τέλος, παρά την αυξανόμενη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, η βιβλιογραφία δεν έχει ακόμη εμβαθύνει επαρκώς σε ζητήματα διαφάνειας, ηθικής και λογοδοσίας των αλγοριθμικών μοντέλων, τουλάχιστον στα περιβάλλοντα υψηλής διακινδύνευσης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν ερμηνεύσιμα μοντέλα και σαφή πλαίσια διακυβέρνησης της τεχνητής νοημοσύνης. Πρόκειται για μία ανάγκη η οποία θεωρούμε ότι είναι επιτακτική, ιδίως στα έργα κρίσιμων υποδομών.

Εν γένει, λοιπόν, τα εντοπισμένα κενά επί της βιβλιογραφίας καταδεικνύουν ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο, η διαχείριση επικινδυνότητας στα τεχνικά έργα παραμένει ένα πεδίο ερευνητικής εξέλιξης. Βασικές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα είναι η ανάπτυξη διεπιστημονικών προσεγγίσεων, η ενσωμάτωση κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, αλλά και η συστηματική αξιολόγηση ψηφιακών τεχνολογιών.

6.3 Προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο διαχείρισης κινδύνου για τεχνικά έργα

Η συγκριτική και εξελικτική αποτίμηση των μεθόδων ανάλυσης κινδύνου που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθιστά εμφανές ότι καμία επιμέρους τεχνική δεν επαρκεί αυτοτελώς για την αποτελεσματική διαχείριση της επικινδυνότητας στα σύγχρονα τεχνικά έργα. Η πολυπλοκότητα των έργων υποδομής, συνδυαστικά με την αλληλεπίδραση τεχνικών, οργανωσιακών και περιβαλλοντικών παραγόντων, καθώς και η αυξανόμενη αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το οικονομικό και θεσμικό περιβάλλον, επιβάλλουν τη διαμόρφωση ενός υβριδικού και πολυεπίπεδου πλαισίου.

Το παρόν προτεινόμενο μοντέλο επιχειρεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των παραδοσιακών τεχνικών, των πολυκριτηριακών μοντέλων, των πιθανοκρατικών προσεγγίσεων και των ψηφιακών τεχνολογιών σε μία ενιαία και προσαρμοστική αρχιτεκτονική επί του πεδίου της διαχείρισης των κινδύνων. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα υβριδικό αυτό μοντέλο, το οποίο οργανώνεται σε τέσσερα διαδοχικά και αλληλοσυνδεόμενα επίπεδα, ως κάτωθι:

Στο πρώτο επίπεδο, εντάσσεται η συστηματική αναγνώριση κινδύνων μέσω παραδοσιακών τεχνικών, όπως η FMEA, η HAZOP και η SWOT. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι η αρχική χαρτογράφηση της επικινδυνότητας, τόσο σε τεχνικό όσο και σε

στρατηγικό επίπεδο. Η FMEA και η HAZOP επιτρέπουν την ενδελεχή ανάλυση τρόπων αστοχίας και των λειτουργικών αποκλίσεων. Από την άλλη πλευρά η ανάλυση SWOT διευρύνει το πλαίσιο συμπεριλαμβάνοντας θεσμικούς και μακροοικονομικούς παράγοντες. Το παρόν πρώτο επίπεδο λειτουργεί ως η βάση του συστήματος, λόγω του ότι εξασφαλίζει την πληρότητα της αναγνώρισης πριν από την ποσοτική ή μοντελοποιημένη αξιολόγηση. Επίσης, επισημαίνεται ότι βασικό χαρακτηριστικό της πρώτης αυτής φάσης είναι ότι η ανάλυση είναι κυρίως στατική. Οι μέθοδοι εξετάζουν τον κίνδυνο ως γεγονός ή πιθανότητα αστοχίας, χωρίς να ενσωματώνουν πλήρως τη δυναμική μεταβολή των συνθηκών. Παράλληλα, η έμφαση αποδίδεται στο τεχνικό σύστημα και λιγότερο στη διασύνδεση με ευρύτερες οργανωσιακές και περιβαλλοντικές παραμέτρους.

Στο δεύτερο επίπεδο, το μοντέλο ενσωματώνει εργαλεία ιεράρχησης και δομημένης αξιολόγησης, όπως η Risk Matrix και το AHP. Η Risk Matrix προσφέρει μία αρχική κατηγοριοποίηση. Επίσης, διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών. Ωστόσο, για τα έργα αυξημένης πολυπλοκότητας, η χρήση του AHP επιτρέπει την πολυκριτηριακή αποτίμηση των κινδύνων, λόγω του ότι λαμβάνει υπόψιν τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Η διαδοχική χρήση των δύο αυτών εργαλείων επιτρέπει τη μετάβαση από τη γενική κατηγοριοποίηση προς μία πιο αναλυτική και εμπειριστατωμένη ιεράρχηση. Η παρούσα δεύτερη φάση, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη μοντέλων που επιχειρούν να οργανώσουν και να ιεραρχήσουν τους κινδύνους με συστηματικότερο τρόπο.

Το τρίτο επίπεδο αφορά τη συστημική και πιθανοκρατική μοντελοποίηση της επικινδυνότητας. Στο στάδιο αυτό ενσωματώνονται τα Bayesian Networks και η Monte Carlo Simulation. Τα Bayesian Networks χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση των αλληλεξαρτώμενων κινδύνων και τη μοντελοποίηση των αιτιωδών σχέσεων. Εν συνεχεία, η Monte Carlo επιτρέπει την εκτίμηση ενός εύρους πιθανών αποκλίσεων σε κόστος και χρόνο. Ο συνδυασμός αυτών των δύο εργαλείων δίνει τη δυνατότητα για την αποτύπωση τόσο της δομικής όσο και της ποσοτικής διάστασης της αβεβαιότητας. Έτσι, η διαχείριση του κινδύνου μετατρέπεται από στατική διαδικασία αξιολόγησης σε μία πιο δυναμική προσομοίωση σεναρίων. Στην τρίτη φάση, λοιπόν, η επικινδυνότητα δεν αντιμετωπίζεται ως στατική κατηγορία αλλά ως δυναμικό σύστημα αλληλεπιδρώντων μεταβλητών. Επίσης, σε αυτή τη φάση, η διαχείριση κινδύνου

αποκτά μαθηματική τεκμηρίωση υψηλού επιπέδου. Πέραν αυτού, ενσωματώνει την έννοια της εξελισσόμενης αβεβαιότητας κατά τον κύκλο ζωής του έργου.

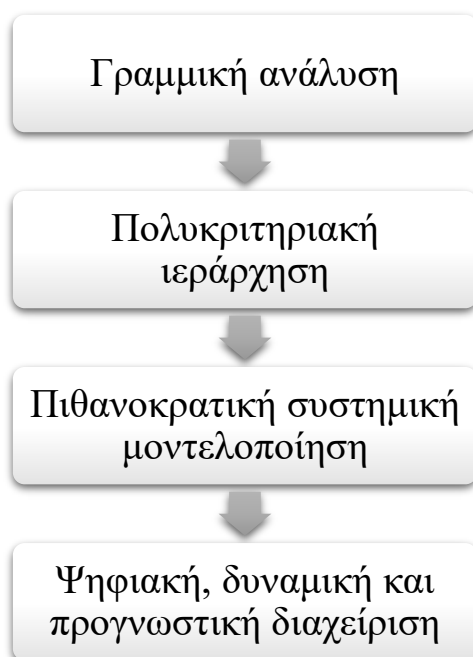
Το τέταρτο επίπεδο ενσωματώνει τις ψηφιακές και καινοτόμες τεχνολογίες, όπως το BIM, η Μηχανική Μάθηση και τα GIS. Το BIM λειτουργεί ως κεντρική ψηφιακή πλατφόρμα ενοποίησης των δεδομένων. Πρόκειται για το εργαλείο που επιτρέπει την οπτικοποίηση, την προσομοίωση 4D και 5D και τον εντοπισμό συγκρούσεων σε πραγματικό χρόνο. Η Μηχανική Μάθηση αξιοποιείται για την προγνωστική ανάλυση. Μέσω αυτής εντοπίζονται πρότυπα, τα οποία σχετίζονται με καθυστερήσεις ή αστοχίες. Τα GIS προσθέτουν τη χωρική διάσταση. Αναλυτικότερα, ενισχύουν τη στρατηγική χωροθέτηση και την ανθεκτικότητα του έργου έναντι περιβαλλοντικών κινδύνων.

Πιο αναλυτικά, η τέταρτη αυτή φάση χαρακτηρίζεται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- Δυναμική ενημέρωση δεδομένων
- Ολοκληρωμένη διαλειτουργικότητα συστημάτων
- Μετάβαση από αντιδραστική σε προληπτική και προγνωστική διαχείριση
- Ενσωμάτωση τεχνικών, οργανωσιακών και περιβαλλοντικών διαστάσεων.

Πλέον, η επικινδυνότητα δεν αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένο γεγονός αλλά ως πολυδιάστατο και εξελισσόμενο σύστημα. Άρα, η εξελικτική πορεία από τις παραδοσιακές τεχνικές στα ψηφιακά οικοσυστήματα αποτυπώνει την κάτωθι σαφή μετάβαση:

Σχεδιάγραμμα 1. Προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο διαχείρισης κινδύνου για τεχνικά έργα



Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι η κατανόηση της ανωτέρω εικονιζόμενης εξέλιξης δεν επιτρέπει μόνο την επιλογή των πλέον κατάλληλων εργαλείων για την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Πέραν αυτού, δίνει και τη δυνατότητα για και τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων, υβριδικών πλαισίων διαχείρισης κινδύνου για τα σύγχρονα τεχνικά έργα.

Μάλιστα, η καινοτομία του εν λόγω προτεινόμενου υβριδικού μοντέλου έγκειται αφενός στη συνδυαστική χρήση των εργαλείων και αφετέρου στη διαδοχική λογική εφαρμογής τους. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία ξεκινά από ευρεία αναγνώριση. Εν συνεχεία, προχωρά στην ιεράρχηση και μεταβαίνει στη συστημική μοντελοποίηση. Εν τέλει, καταλήγει στη δυναμική ψηφιακή παρακολούθηση. Με τον τρόπο αυτόν, θεωρούμε πως διασφαλίζεται ότι η ανάλυση κινδύνου δεν παραμένει μόνο σε επίπεδο θεωρητικής ανάλυσης, αλλά ενσωματώνεται στον κύκλο ζωής του έργου.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του παρόντος προτεινόμενου μοντέλου είναι η προσαρμοστικότητά του. Πιο αναλυτικά, το βάθος και η πολυπλοκότητα των επιπέδων μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με το μέγεθος και τη φύση του έργου. Σε μικρής κλίμακας έργα, για παράδειγμα, ενδέχεται να επαρκεί η χρήση των δύο πρώτων

επιπέδων. Κατόπιν, αν αναφερόμαστε σε ε έργα υψηλής τεχνικής και οργανωσιακής πολυπλοκότητας, τότε απαιτείται πλήρης ενεργοποίηση όλων των επιπέδων.

Τέλος, η εφαρμογή του παρόντος προτεινόμενου υβριδικού πλαισίου ενισχύει τη σύνδεση της διαχείρισης κινδύνου με τη στρατηγική διοίκηση έργων. Η συστηματική ανατροφοδότηση των δεδομένων από τα ψηφιακά εργαλεία προς τα μοντέλα αξιολόγησης επιτρέπει τη συνεχή επικαιροποίηση της ιεράρχησης των κινδύνων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μία δυναμική προσαρμογή των μέτρων πρόληψης και ελέγχου που πρέπει να υιοθετηθούν.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adepoju, A. H., Hamza, O., Collins, A., & Austin-Gabriel, B. (2025). Integrating Risk Management and Communication Strategies in Technical Research Programs to Secure High-Value Investments. *Gulf Journal of Advance Business Research*, 3(1), 105-127. <https://doi.org/10.51594/gjabr.v3i1.69>
- Akindele, O., Ajayi, S., Oyegoke, A. S., Alaka, H. A., & Omotayo, T. (2025). Application of Geographic Information System (GIS) in construction: a systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 14(1), 210-236. <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2023-0016>
- Atkinson, R. (1999). Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337-342. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00069-6)
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Aven, T., & Renn, O. (2009). *Risk management and governance: Concepts, guidelines and applications*. NY: Springer.
- Awujoola, J. O., Enem, T. A., Owolabi, J. A., Akusu, O. C., Abioye, O., & Adelegan, R. O. (2025). Machine learning and predictive maintenance in smart grids. In *AI and Blockchain in Smart Grids* (pp. 14-49). NY: Auerbach Publications.
- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Baiburin, A. K. (2017). Errors, defects and safety control at construction stage. *ProcediaEngineering*, 206, 807-813. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.555>
- Balaguera, A., Carvajal, G. I., Albertí, J., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>
- Bansal, V. K. (2011). Application of geographic information systems in construction safety planning. *International Journal of Project Management*, 29(1), 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.01.007>
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. NY: Springer.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 26, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>

- Castro Miranda, S. L., Del Rey Castillo, E., Gonzalez, V., & Adafin, J. (2022). Predictive analytics for early-stage construction costs estimation. *Buildings*, *12*(7), 1043. <https://doi.org/10.3390/buildings12071043>
- Chan, D. W., Baghbaderani, A. B., & Sarvari, H. (2022). An empirical study of the human error-related factors leading to site accidents in the Iranian urban construction industry. *Buildings*, *12*(11), 1858. <https://doi.org/10.3390/buildings12111858>
- Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., & Tien Bui, D. (2018). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, *151*, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.032>
- Cooper, M. D., & Phillips, R. A. (2004). Exploratory analysis of the safety climate and safety behavior relationship. *Journal of Safety Research*, *35*(5), 497-512. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2004.08.004>
- Cox, L. A. (2008). What's wrong with risk matrices? *Risk Analysis*, *28*(2), 497-512. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x>
- Crawley, F., & Tyler, B. (2015). *HAZOP: Guide to best practice*. NY: Elsevier.
- Cui, P., Ge, Y., Li, S., Li, Z., Xu, X., Zhou, G. G., ... & Wang, Y. (2022). Scientific challenges in disaster risk reduction for the Sichuan-Tibet Railway. *Engineering Geology*, *309*, 106837. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106837>
- Dekker, S. (2011). *Drift into failure: From hunting broken components to understanding complex systems*. NY: Ashgate.
- Deng, L., Zhong, M., Liao, L., Peng, L., & Lai, S. (2019). Research on safety management application of dangerous sources in engineering construction based on BIM technology. *Advances in Civil Engineering*, *2019*(1), 7450426. <https://doi.org/10.1155/2019/7450426>
- Duleba, S., & Moslem, S. (2018). Examining Pareto optimality in analytic hierarchy process on real data: An application in transport project risk assessment. *Symmetry*, *10*(10), 477. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2018.08.049>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors* (2nd ed.). NY: Wiley.
- Edmondson, A. C. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. *Administrative Science Quarterly*, *44*(2), 350-383. <https://doi.org/10.2307/2666999>
- Einstein, H. H. (1996). Risk and risk analysis in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *11*(2), 141-155. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(96\)00014-4](https://doi.org/10.1016/0886-7798(96)00014-4)
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. NY: Capstone.

- ENISA. (2021). *Threat landscape for supply chain attacks*. European Union Agency for Cybersecurity. <https://www.enisa.europa.eu/publications/threat-landscape-for-supply-chain-attacks>
- Ericson, C. A. (2015). *Hazard analysis techniques for system safety* (2nd ed.). NY: Wiley.
- Fang, W., Ding, L., Love, P. E., Luo, H., Li, H., Peña-Mora, F., ... & Zhou, C. (2020). Computer vision applications in construction safety assurance. *Automation in Construction*, *110*, 103013. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103013>
- Fearne, A., & Fowler, N. (2006). Efficiency versus effectiveness in construction supply chains: the dangers of “lean” thinking in isolation. *Supply chain management: An international journal*, *11*(4), 283-287. <https://doi.org/10.1108/13598540610671725>
- Fenton, N., & Neil, M. (2012). *Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks*. NY: CRC Press.
- Flyvbjerg, B. (2014). What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project Management Journal*, *45*(2), 6-19. <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>
- Flyvbjerg, B., Holm, M. K. S., & Buhl, S. L. (2003). How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, *23*(1), 71-88. <https://doi.org/10.1080/01441640309904>
- Fregonara, E., & Ferrando, D. G. (2020). The stochastic annuity method for supporting maintenance costs planning and durability in the construction sector: A simulation on a building component. *Sustainability*, *12*(7), 2909. <https://doi.org/10.3390/su12072909>
- Genc, O. (2023). Identifying principal risk factors in Turkish construction sector according to their probability of occurrences: a relative importance index (RII) and exploratory factor analysis (EFA) approach. *International Journal of Construction Management*, *23*(6), 979-987. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1946901>
- Gondia, A., Siam, A., El-Dakhakhni, W., & Nassar, A. H. (2020). Machine learning algorithms for construction projects delay risk prediction. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(1), 04019085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001736](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001736)
- Gontier, J. C., Wong, P. S., & Teo, P. (2021). Towards the implementation of immersive technology in construction-a SWOT Analysis. *Journal of Information Technology in Construction*, *26*. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.020>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. NY: MIT Press.
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, *26*(2), 91-108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Guldenmund, F. W. (2000). The nature of safety culture: A review of theory and research. *Safety Science*, *34*(1-3), 215-257. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00014-X)

- Hamdy, O., Gaber, H., Abdalzaher, M. S., & Elhadidy, M. (2022). Identifying exposure of urban area to certain seismic hazard using machine learning and GIS: A case study of greater Cairo. *Sustainability*, 14(17), 10722. <https://doi.org/10.3390/su141710722>
- Helms, M. M., & Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis - Where are we now? A review of academic research from the last decade. *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215-251. <https://doi.org/10.1108/17554251011064837>
- Hillson, D. (2017). *Practical project risk management: The ATOM methodology* (3rd ed.). NY: Management Concepts Press.
- Hofstede, G. (2001). *Culture's consequences: Comparing values, behaviors, institutions and organizations across nations*(2nd ed.). NY: Sage.
- Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management*. NY: Ashgate.
- Hopkin, P. (2018). *Fundamentals of risk management: Understanding, evaluating and implementing effective risk management* (5th ed.). NY: Kogan Page.
- Hubbard, D. W. (2014). *How to measure anything: Finding the value of intangibles in business* (3rd ed.). NY: Wiley.
- Hurtado-Martell, J. L., & Ros, A. (2025). Improving Performance in Mining and Construction Projects: An Integrated Method Based on the Triple Constraint, Change and Risk Management with Normalized Databases. *Revista ingeniería de construcción*, 40(1), 1-14. <http://dx.doi.org/10.7764/ric.00136.21>
- Ige, A. B., Kupa, E., & Ilori, O. (2024). Best practices in cybersecurity for green building management systems: Protecting sustainable infrastructure from cyber threats. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(1), 2960-2977. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.1.1185>
- Imperial College Centre for Process Safety. (2011). *Guidelines for hazard evaluation procedures* (5th ed.). NY: Wiley.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA). (2022). *World energy outlook 2022*.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk management-Guidelines*. <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems-Requirements with guidance for use*. <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>
- Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2007). *Bayesian networks and decision graphs* (2nd ed.). NY: Springer.

- Jiang, R., Mao, C., Hou, L., Wu, C., & Tan, J. (2018). A SWOT analysis for promoting off-site construction under the backdrop of China's new urbanisation. *Journal of cleaner production*, 173, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.147>
- Joubert, F., Steyn, E., & Pretorius, L. (2021). Using the HAZOP method to conduct a risk assessment on the dismantling of large industrial machines and associated structures: case study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(1), 05020021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001942](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001942)
- Judijanto, L., Sudarmanto, E., & Gilaa, T. (2024). The Effect of Risk Management, Technological Innovation, and Human Resources Quality on Construction Project Performance in Jakarta Case Study on Government Infrastructure Projects. *Sciences du Nord Economics and Business*, 1(02), 73-82. <https://doi.org/10.58812/sneb.v1i2.32>
- Jung, J. H., Kim, D. Y., & Lee, H. K. (2016). The computer-based contingency estimation through analysis cost overrun risk of public construction project. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1119-1130. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0184-8>
- Kabir, S. (2017). An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. *Expert Systems with Applications*, 77, 114-135. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.058>
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). NY: Wiley.
- Khanh, H. D., Kim, S. Y., & Linh, L. Q. (2023). Construction productivity prediction through Bayesian networks for building projects: case from Vietnam. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(5), 2075-2100. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2021-0602>
- Kim, J. (2025). Balancing AI generalization and specialization: Multi-domain learning for universal computer vision models in construction. *Automation in Construction*, 176, 106279. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106279>
- Klakegg, O. J., Williams, T., Magnussen, O. M., & Glasspool, H. (2010). Governance frameworks for public project development and estimation. *International Journal of Project Management*, 28(7), 722-733. <https://doi.org/10.1002/pmj.20058>
- Kletz, T. A. (2001). *Hazop and risk assessment: A guide to better practice* (3rd ed.). NY: CRC Press.
- Koulinas, G. K., Demesouka, O. E., Sidas, K. A., & Koulouriotis, D. E. (2021). A TOPSIS-risk matrix and Monte Carlo expert system for risk assessment in engineering projects. *Sustainability*, 13(20), 11277. <https://doi.org/10.3390/su132011277>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Leu, S. S., & Chang, C. M. (2013). Bayesian-network-based safety risk assessment for steel construction projects. *Accident Analysis & Prevention*, 54, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.019>

- Liu, G., & Cui, H. (2012). The research of risk warning mechanism for metro construction based on GIS. *Procedia Engineering*, 29, 940-946. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.068>
- Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2012). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828-838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Liu, H., & Tian, G. (2019). Building engineering safety risk assessment and early warning mechanism construction based on distributed machine learning algorithm. *Safety Science*, 120, 764-771. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.022>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*(4th ed.). NY: Wiley.
- Love, P. E. D., Edwards, D. J., & Irani, Z. (2011). Moving beyond optimism bias and strategic misrepresentation in infrastructure projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58(3), 560-571. <https://doi.org/10.1109/TEM.2011.2163628>
- Lu, W., Chen, J., & Xue, F. (2022). Using computer vision to recognize composition of construction waste mixtures: A semantic segmentation approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106022>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Matsuoka, Y., & Gonzales Rocha, E. (2020). Sendai voluntary commitments: landslide stakeholders and the all-of-society approach enhanced by UNDRR. *Landslides*, 17(10), 2253-2269. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01519-y>
- Milosevic, I. N. (2010). Practical application of SWOT analysis in the management of a construction project. *Leadership and Management in Engineering*, 10(2), 78-86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000041](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000041)
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). NY: Butterworth-Heinemann.
- Mourtzis, D., & Vlachou, E. (2018). A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance. *Journal of manufacturing systems*, 47, 179-198. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.05.008>
- Murtagh, N., Scott, L., & Fan, J. (2020). Sustainable and resilient construction: Current status and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122264>
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. NY: Morgan Kaufmann.
- Pickton, D. W., & Wright, S. (1998). What's SWOT in strategic analysis? *Strategic Change*, 7(2), 101-109. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1697\(199803/04\)7:2%3C101::AID-JSC332%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1697(199803/04)7:2%3C101::AID-JSC332%3E3.0.CO;2-6)

- Plebankiewicz, E., & Wieczorek, D. (2020). Prediction of cost overrun risk in construction projects. *Sustainability*, *12*(22), 9341. <https://doi.org/10.3390/su12229341>
- Prajapati, A., Bechtel, J., & Ganesan, S. (2012). Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *18*(4), 384-400. <https://doi.org/10.1108/13552511211281552>
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). NY: PMI.
- Provodina, E. V., Krasovskaya, O. Y., Zhelokov, N. V., Komissarenko, E. S., & Baranova, M. A. (2021, March). Public danger and mechanisms for preventing damage to land. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 723, No. 4, p. 042058). NY: IOP Publishing.
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. NY: Ashgate.
- Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, *1*(5), 206-215. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>
- Rustambekov, I., Saidakhmedovich, G. S., Abduvaliyev, B., Kan, E., Abdukhakimov, I., Yakubova, M., & Karimov, D. (2024, November). Predictive maintenance of smart grid components based on real-time data analysis. In *2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)* (pp. 949-952). NY: IEEE.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. NY: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*. NY: Springer.
- Sacks, R., Girolami, M., & Brilakis, I. (2020). Building information modelling, artificial intelligence and construction safety. *Automation in Construction*, *118*, 103286. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>
- Schein, E. H. (2010). *Organizational culture and leadership* (4th ed.). NY: Jossey-Bass.
- Seeni, S. K., Maheswari, P., Konidhala, J., Suguna, M. R., Ishwarya, M. V., & Srinivasan, S. (2024, May). Construction equipment performance with cloud data analysis for predictive maintenance. In *2024 IEEE recent advances in intelligent computational systems (RAICS)* (pp. 1-6). NY: IEEE.
- Sesana, M. M., & Dell'Oro, P. (2024). Sustainability and resilience assessment methods: A literature review to support the decarbonization target for the construction sector. *Energies*, *17*(6), 1440. <https://doi.org/10.3390/en17061440>
- Shafiudin, M., Prayoga, C. S., Firmanda, R. A., Juliawan, F. R., & Septian, R. Y. (2025). Probability analysis of occupational accidents in housing construction projects using the hazop method: A risk-based approach to safety performance improvement. *Calamity: A Journal of Disaster Technology and Engineering*, *3*(1), 33-45. <https://doi.org/10.61511/calamity.v3i1.2025.2066>

- Shi, J. (2024). Construction and Application of Three-dimensional Information Management System for Intelligent Buildings Integrating BIM and GIS Technologies. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 25(4), 2985-3000. <https://doi.org/10.12694/scpe.v25i4.2939>
- Shuang, Q., & Zhang, Z. (2023). Determining critical cause combination of fatality accidents on construction sites with machine learning techniques. *Buildings*, 13(2), 345. <https://doi.org/10.3390/buildings13020345>
- Sierikova, E., & Strelnikova, E. (2019). Environmental safety of building development on the kharkiv city flooding areas example. *Noble International Journal of Scientific Research*, 3(8), 72-78.
- Sipahi, S., & Timor, M. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management decision*, 48(5), 775-808. <https://doi.org/10.1108/00251741011043920>
- Slovic, P. (1987). Perception of risk. *Science*, 236(4799), 280-285. <https://doi.org/10.1126/science.3563507>
- Smirnova, E. (2020, August). The use of the Monte Carlo method for predicting environmental risk in construction zones. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1614, No. 1, p. 012083). NY: IOP Publishing.
- Smith, D. J., & Kelly, C. (2011). *Hazard identification methods: A guide for the practitioner*. NY: Wiley.
- Sobieraj, J., & Metelski, D. (2022). Project risk in the context of construction schedules-combined monte carlo simulation and time at risk (TaR) approach: insights from the fort bema housing estate complex. *Applied Sciences*, 12(3), 1044. <https://doi.org/10.3390/app12031044>
- Sokolov, V., & Sukhov, V. (2023). The influence of dangerous geological and technogenic processes during engineering and geological research and environmental safety for construction in the modern period. *Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (58), 111-121. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-09>
- Solanki, T. J. (2025). Digital Twin-Enabled Smart Construction: Integrating BIM, IoT, and AI for Predictive Infrastructure Maintenance and Sustainability. *International Journal of Multidisciplinary Research in Science, Engineering, Technology & Management*, 1(03), 20-25.
- Soytu, N. Y., Aleynikova, M. A., & Novozhilova, A. V. (2021, March). Investigation of the Technical Condition of Buildings and Structures in the Conditions of Dangerous Geological Processes. In *International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction* (pp. 234-240). Cham: Springer International Publishing.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution* (2nd ed.). NY: ASQ Quality Press.
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357-375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>

- Tanyaş, H., Görüm, T., Kirschbaum, D., & Lombardo, L. (2022). Could road constructions be more hazardous than an earthquake in terms of mass movement?. *Natural hazards*, 112(1), 639-663. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05199-2>
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2019). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- Teo, E. A. L., Ling, F. Y. Y., & Chong, A. F. W. (2005). Framework for project managers to manage construction safety. *International Journal of project management*, 23(4), 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.09.001>
- Thomas, R., & Wright, M. (2020). *Construction contract claims*. NY: Bloomsbury Publishing.
- Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1995). Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges. *International Journal of Industrial Engineering*, 2(1), 35-44. https://www.researchgate.net/publication/241416054_Using_the_analytic_hierarchy_process_for_decision_making_in_engineering_applications_Some_challenges
- Turner, R., & Müller, R. (2005). The project manager's leadership style as a success factor on projects: A literature review. *Project Management Journal*, 36(2), 49-61. <https://doi.org/10.1177/875697280503600206>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030*. https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf
- Upadhyaya, D., & Malek, M. (2023). Examining potential dangers and risk factors in building construction projects. In *Emerging Trends and Innovations in Industries of the Developing World*(pp. 181-185). NY: CRC Press.
- Van, T. N., & Quoc, T. N. (2021). Research trends on machine learning in construction management: A scientometric analysis. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(02), 124-132. <https://doi.org/10.38094/jastt203105>
- Venter, B., Ngobeni, S. P., & du Plessis, H. (2021). Factors influencing the adoption of Building Information Modelling (BIM) in the South African Construction and Built Environment (CBE) from a quantity surveying perspective. *Engineering Management in Production and Services*, 13(3). <https://reference-global.com/2/v2/download/pdf/10.2478/emj-2021-0027>
- Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. (2002). *Fault tree handbook with aerospace applications*. NASA Office of Safety and Mission Assurance. https://www.mwfr.com/CS2/Fault%20Tree%20Handbook_NASA.pdf
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building information modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Vose, D. (2008). *Risk analysis: A quantitative guide* (3rd ed.). NY: Wiley.

- Wang, H., & Liu, L. (2019, October). Research on Environmental Risk and Hidden Dangers in Civil Engineering Field. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 631, No. 4, p. 042012). NY: IOP Publishing.
- Wang, M., Wong, P., Luo, H., Kumar, S., Delhi, V., & Cheng, J. (2019, May). Predicting safety hazards among construction workers and equipment using computer vision and deep learning techniques. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 36, pp. 399-406). NY: IAARC Publications.
- Witt, E. (2024, November). Risks in Transitioning to a Circular Economy in the Construction Sector. In *Construction Management Workshop* (pp. 411-423). Cham: Springer Nature Switzerland.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford: Oxford University Press.
- World Economic Forum. (2020). *The global risks report 2020*. <https://www.weforum.org/publications/the-global-risks-report-2020/>
- Xie, W., Deng, B., Yin, Y., Lv, X., & Deng, Z. (2022). Critical factors influencing cost overrun in construction projects: A fuzzy synthetic evaluation. *Buildings*, 12(11), 2028. <https://doi.org/10.3390/buildings12112028>
- Xu, S. (2021). Three-Dimensional Visualization Algorithm Simulation of Construction Management Based on GIS and VR Technology. *Complexity*, 2021(1), 6631999. <https://doi.org/10.1155/2021/6631999>
- Xu, S., Wang, J., Shou, W., Ngo, T., Sadick, A. M., & Wang, X. (2021). Computer Vision Techniques in Construction: A Critical Review: S. Xu et al. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(5), 3383-3397. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09504-3>
- Yescombe, E. R. (2014). *Public-private partnerships: Principles of policy and finance* (2nd ed.). NY: Butterworth-Heinemann.
- Youli, Y., Yingjian, P., Xiaoxia, L., & Airan, Z. (2018, July). Research on safety risk management of civil construction projects based on risk matrix method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 392, No. 6, p. 062080). NY: IOP Publishing.
- Yu, Q., Jiang, J., & Yu, H. (2012). Research on the emergency response system of major dangerous chemical accident on highway based on the GIS. *Procedia Engineering*, 45, 716-721. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.229>
- Zhang, L., Wu, X., Skibniewski, M. J., Zhong, J., & Lu, Y. (2014). Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects. *Reliability Engineering & System Safety*, 131, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.06.006>
- Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Eastman, C. M., & Venugopal, M. (2013). Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Automation in Construction*, 29, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>
- Zhu, L., Ma, H., Huang, Y., Liu, X., Xu, X., & Shi, Z. (2022). Analyzing construction workers' unsafe behaviors in hoisting operations of prefabricated buildings using

HAZOP. *International journal of environmental research and public health*, 19(22), 15275. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215275>

Zhu, R., Hu, X., Hou, J., & Li, X. (2021). Application of machine learning techniques for predicting the consequences of construction accidents in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 145, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.006>

Zohar, D. (2010). Thirty years of safety climate research: Reflections and future directions. *Accident Analysis & Prevention*, 42(5), 1517-1522. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.12.019>