



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ

ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.

ΕΛΠΙΝΙΚΗ ΜΑΥΡΑΚΗ

A.M.: 163998

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Ευαγγελινός

ΠΑΤΡΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026

Περίληψη

Η κατασκευαστική βιομηχανία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της παγκόσμιας οικονομίας, καθώς συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη των υποδομών, στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στη συνολική οικονομική και κοινωνική πρόοδο. Παρά τη στρατηγική σημασία του κλάδου, εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που επηρεάζουν την αποτελεσματική υλοποίηση των έργων, όπως οι υπερβάσεις προϋπολογισμού, οι καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση, η χαμηλή παραγωγικότητα, η μη αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και η αβεβαιότητα κατά τη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, σε σύγκριση με άλλους παραγωγικούς τομείς, ο κατασκευαστικός κλάδος εμφανίζει χαμηλότερο επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας, γεγονός που περιορίζει την αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων και επιβραδύνει την ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογικών λύσεων (Abioye et al., 2021).

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις της σύγχρονης ψηφιακής εποχής και επηρεάζει ολοένα περισσότερο τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, οργανώνονται και υλοποιούνται τα τεχνικά έργα. Η συνεχής πρόοδος των αλγορίθμων, η αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων και η ανάπτυξη τεχνολογιών όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και οι υπηρεσίες Cloud Computing δημιουργούν νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της διαχείρισης έργων, ενισχύοντας την ποιότητα της λήψης αποφάσεων, την αποδοτικότητα των διαδικασιών και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η συστηματική διερεύνηση της αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων, καθώς και η σύνθεση της σύγχρονης διεθνούς επιστημονικής γνώσης σχετικά με τις εφαρμογές, τα οφέλη, τις προκλήσεις και τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή της στον κατασκευαστικό κλάδο. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Systematic Literature

Review – SLR), μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκε συστηματική αναζήτηση, επιλογή, αξιολόγηση και σύνθεση επιστημονικών δημοσιεύσεων που προέρχονται από διεθνώς αναγνωρισμένες βάσεις δεδομένων.

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας κατέδειξε ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αξιοποιείται πλέον σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών του Construction Project Management, όπως ο χρονικός προγραμματισμός, η εκτίμηση και διαχείριση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου των έργων, η διαχείριση πόρων, η υγεία και ασφάλεια, η διαχείριση τεχνικών εγγράφων και η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Παράλληλα, αναδείχθηκε ότι η μεγαλύτερη αξία των εφαρμογών AI προκύπτει όταν αυτές λειτουργούν σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες του Construction 4.0, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό οικοσύστημα διαχείρισης έργων.

Η σύνθεση των ευρημάτων ανέδειξε επίσης ότι η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνολογικό ζήτημα. Αντίθετα, εξαρτάται από την αλληλεπίδραση τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων, όπως η ποιότητα των δεδομένων, η ψηφιακή ωριμότητα των οργανισμών, η διαθεσιμότητα κατάλληλων υποδομών, η υποστήριξη της διοίκησης, οι ψηφιακές δεξιότητες του ανθρώπινου δυναμικού, η οικονομική βιωσιμότητα των επενδύσεων, καθώς και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις δεοντολογίας και διακυβέρνησης των συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης.

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στη συστηματική οργάνωση και σύνθεση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των εφαρμογών και των παραγόντων που επηρεάζουν την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Τα ευρήματα μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες, αλλά και σημείο αναφοράς για επαγγελματίες και οργανισμούς που επιδιώκουν να ενσωματώσουν τεχνολογίες AI στις διαδικασίες διαχείρισης έργων, υποστηρίζοντας τον ψηφιακό μετασχηματισμό του κατασκευαστικού κλάδου.

Λέξεις-κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, Διαχείριση Τεχνικών Έργων, Construction Project Management, Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, Construction 4.0, Ψηφιακός Μετασχηματισμός, Machine Learning, Generative AI.

Abstract

Artificial Intelligence (AI) has emerged as one of the most influential technological developments of the digital era, transforming the way construction projects are planned, managed, and delivered. Rapid advances in AI algorithms, together with the widespread adoption of technologies such as Building Information Modeling (BIM), Digital Twins, the Internet of Things (IoT), Big Data, and Cloud Computing, have created new opportunities to improve project performance through enhanced decision-making, process automation, predictive analytics, and more efficient resource management.

The aim of this thesis is to investigate the application of Artificial Intelligence in Construction Project Management through a systematic synthesis of the contemporary scientific literature. To achieve this objective, a Systematic Literature Review (SLR) methodology was adopted. Relevant studies were identified, selected, evaluated, and critically synthesized using internationally recognized scientific databases, providing a comprehensive overview of the current state of knowledge in this rapidly evolving research field.

The findings indicate that Artificial Intelligence is increasingly applied across almost every major function of Construction Project Management, including project scheduling, cost estimation and control, risk management, progress monitoring, resource allocation, health and safety management, document management, and decision support. The review further demonstrates that the greatest benefits are achieved when AI is integrated with other Construction 4.0 technologies, creating interconnected digital environments capable of supporting data-driven project management throughout the entire project life cycle.

The study also reveals that successful AI adoption extends beyond technological capabilities alone. Effective implementation depends on the interaction of technological, organizational, human, economic, ethical, and regulatory factors. Data quality, digital maturity, system interoperability, management commitment, workforce competencies, investment feasibility, governance mechanisms, and regulatory compliance all play a critical role in determining the successful integration of AI within construction organizations.

Furthermore, the literature review identifies several research gaps. Although considerable progress has been made in developing AI applications, empirical evidence from large-scale real-world construction projects remains limited. Additional research is required to evaluate the long-term organizational impact of AI, investigate the practical implementation of Generative AI and Large Language Models (LLMs), and explore governance frameworks that ensure responsible, transparent, and trustworthy AI deployment within the construction industry.

This thesis contributes to the existing body of knowledge by providing a comprehensive synthesis of current research on Artificial Intelligence in Construction Project Management. It offers a structured understanding of AI applications, adoption factors, benefits, challenges, and research gaps, while also providing a useful reference for researchers and industry professionals seeking to support the digital transformation of construction organizations through the effective adoption of AI technologies.

Keywords: Artificial Intelligence; Construction Project Management; Systematic Literature Review; Construction 4.0; Digital Transformation; Machine Learning; Generative AI; Large Language Models.

Στους γονείς μου & στον αδερφό μου,

Περίληψη	1
Abstract	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7

1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Υπόβαθρο και σημασία του ερευνητικού προβλήματος	10
1.3 Σκοπός της έρευνας	14
1.4 Ερευνητικά ερωτήματα.....	16
1.5 Ερευνητικοί στόχοι	19
1.6 Αναμενόμενη επιστημονική συνεισφορά της έρευνας	21
1.7 Μεθοδολογία της Έρευνας	22
1.8 Δομή της Διατριβής	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	26
2.1 Εισαγωγή.....	27
2.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη στον κατασκευαστικό κλάδο	29
2.2.1 Εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης.....	32
2.2.2 Βασικές τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης	35
2.3 Ψηφιακός μετασχηματισμός της κατασκευαστικής βιομηχανίας.....	38
2.3.1 Construction 4.0.....	41
2.3.2 Building Information Modeling (BIM).....	43
2.3.3 Internet of Things (IoT).....	46
2.3.4 Digital Twins.....	49
2.3.5 Big Data	52
2.3.6 Cloud Computing	54
2.3.7 Ο ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης στο ψηφιακό οικοσύστημα.....	57
2.4 Η διαχείριση τεχνικών έργων (Construction Project Management)	60
2.4.1 Βασικές λειτουργίες της διαχείρισης έργων.....	63
2.4.2 Κύκλος ζωής τεχνικού έργου.....	67
2.4.3 Λήψη αποφάσεων στη διαχείριση έργων	70
2.5 Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.....	73
2.5.1 Χρονικός προγραμματισμός.....	76
2.5.2 Εκτίμηση και διαχείριση κόστους	79
2.5.3 Διαχείριση κινδύνων	82

2.5.4 Διαχείριση πόρων	86
2.5.5 Διαχείριση ποιότητας	90
2.5.6 Υγεία και ασφάλεια	92
2.5.7 Παρακολούθηση προόδου έργου	95
2.5.8 Διαχείριση εγγράφων και συμβάσεων	98
2.5.9 Υποστήριξη λήψης αποφάσεων.....	101
2.6 Η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη στα τεχνικά έργα	103
2.6.1 Σύγχρονες εφαρμογές	106
2.6.2 Δυνατότητες.....	109
2.6.3 Περιορισμοί	111
2.7 Οφέλη από την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης	114
2.8 Προκλήσεις και περιορισμοί	117
2.9 Ερευνητικά κενά της διεθνούς βιβλιογραφίας	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	124
3.1 Ερευνητικός σχεδιασμός	124
3.2 Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	126
3.3 Στρατηγική αναζήτησης της βιβλιογραφίας.....	129
3.4 Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού	131
3.5 Διαδικασία επιλογής άρθρων (PRISMA).....	134
3.6 Εξαγωγή δεδομένων	136
3.7 Θεματική ανάλυση	138
3.8 Αξιολόγηση ποιότητας της βιβλιογραφίας.....	141
3.9 Περιορισμοί της μεθοδολογίας	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	146
4.1 Συγκριτική ανάλυση των εφαρμογών AI	146
4.2 Συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών AI	149
4.3 Κυρίαρχες ερευνητικές τάσεις	152
4.4 Κριτική αποτίμηση της βιβλιογραφίας.....	155
4.5 Σύνθεση των ερευνητικών κενών.....	158

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ.....	160
5.1 Τεχνολογικοί παράγοντες.....	161
5.2 Οργανωσιακοί παράγοντες.....	164
5.3 Ανθρώπινοι παράγοντες.....	167
5.4 Οικονομικοί παράγοντες.....	170
5.5 Ηθικά και κανονιστικά ζητήματα.....	174
5.6 Παράγοντες επιτυχούς υιοθέτησης	177
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	181
6.1 Εισαγωγή.....	181
6.2 Σύνθεση των παραγόντων υιοθέτησης από τη διεθνή βιβλιογραφία	183
6.3 Εννοιολογική οργάνωση των παραγόντων υιοθέτησης.....	187
6.4 Ερμηνεία της αλληλεπίδρασης των παραγόντων.....	190
6.5 Πρακτικές επιπτώσεις για οργανισμούς και διαχειριστές έργων.....	193
6.6 Περιορισμοί της βιβλιογραφίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	196
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	200
7.1 Συμπεράσματα.....	200
7.2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα	203
7.3 Θεωρητική συνεισφορά.....	206
7.4 Πρακτική συνεισφορά.....	208
7.5 Περιορισμοί της έρευνας.....	210
7.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	211
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	214

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η κατασκευαστική βιομηχανία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της παγκόσμιας οικονομίας, καθώς συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη των υποδομών, στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στη συνολική οικονομική και κοινωνική πρόοδο. Παρά τη στρατηγική σημασία του κλάδου, εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που επηρεάζουν την αποτελεσματική υλοποίηση των έργων, όπως οι υπερβάσεις προϋπολογισμού, οι καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση, η χαμηλή παραγωγικότητα, η μη αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και η αβεβαιότητα κατά τη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, σε σύγκριση με άλλους παραγωγικούς τομείς, ο κατασκευαστικός κλάδος εμφανίζει χαμηλότερο επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας, γεγονός που περιορίζει την αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων και επιβραδύνει την ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογικών λύσεων (Abioye et al., 2021).

Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των τεχνικών έργων, σε συνδυασμό με τις διαρκείς τεχνολογικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές εξελίξεις, καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση νέων προσεγγίσεων στη διαχείρισή τους. Αν και οι παραδοσιακές μέθοδοι εξακολουθούν να αποτελούν τη βάση του Construction Project Management, συχνά αδυνατούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά τον μεγάλο όγκο και την πολυπλοκότητα των πληροφοριών που παράγονται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Ως αποτέλεσμα, η διεθνής βιβλιογραφία στρέφεται ολοένα και περισσότερο στην αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών που καθιστούν τις διαδικασίες σχεδιασμού και διοίκησης περισσότερο ευέλικτες, αποδοτικές και τεκμηριωμένες.

Στο πλαίσιο αυτό, η κατασκευαστική βιομηχανία διανύει τα τελευταία χρόνια μια περίοδο έντονου ψηφιακού μετασχηματισμού. Τεχνολογίες όπως η Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου (Building Information Modelling – BIM), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins), τα Μεγάλα Δεδομένα (Big Data) και οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing) διαμορφώνουν ένα ολοένα πιο διασυνδεδεμένο ψηφιακό περιβάλλον, μέσα στο οποίο παράγεται, αποθηκεύεται και αξιοποιείται μεγάλος όγκος πληροφοριών. Η εξέλιξη αυτή δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την ευρύτερη εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης, η οποία πλέον αναγνωρίζεται ως βασικός πυλώνας του Construction 4.0 (Abioye et al., 2021).

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) δεν αποτελεί μία ενιαία τεχνολογία, αλλά ένα ευρύ σύνολο μεθόδων και υπολογιστικών τεχνικών, στις οποίες περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision) και η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing). Κοινό χαρακτηριστικό των τεχνολογιών αυτών είναι η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, η αναγνώριση προτύπων, η παραγωγή προβλέψεων και η υποστήριξη σύνθετων διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Για τον λόγο αυτό, η AI θεωρείται σήμερα μία από τις πλέον ελπιδοφόρες τεχνολογικές εξελίξεις για τον μετασχηματισμό της διαχείρισης τεχνικών έργων (Abioye et al., 2021).

Οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης εκτείνονται πλέον σχεδόν σε κάθε βασική λειτουργία του Construction Project Management. Ενδεικτικά, αξιοποιούνται στον χρονικό προγραμματισμό, στην εκτίμηση του κόστους, στη διαχείριση κινδύνων και πόρων, στην παρακολούθηση της προόδου των εργασιών, στη διασφάλιση της ποιότητας, στην ενίσχυση της ασφάλειας στα εργοτάξια, καθώς και στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η πραγματική προστιθέμενη αξία της AI δεν περιορίζεται στην αυτοματοποίηση επιμέρους διαδικασιών. Αντίθετα, έγκειται κυρίως στην ικανότητά της να μετατρέπει τα διαθέσιμα δεδομένα σε χρήσιμη γνώση, ενισχύοντας τη λήψη τεκμηριωμένων και

αποτελεσματικών αποφάσεων σε όλα τα στάδια υλοποίησης ενός έργου (Abioye et al., 2021).

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει, η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό τομέα εξακολουθεί να βρίσκεται σε στάδιο εξέλιξης. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, το σχετικά χαμηλό επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας πολλών οργανισμών, το υψηλό κόστος επένδυσης, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού και οι δυσκολίες ενσωμάτωσης των νέων τεχνολογιών στις υφιστάμενες οργανωσιακές διαδικασίες συγκαταλέγονται στα σημαντικότερα εμπόδια για την ευρύτερη εφαρμογή τους. Επομένως, η επιτυχής υιοθέτηση της ΑΙ δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική πρόοδο, αλλά και από την οργανωσιακή ετοιμότητα, τη στρατηγική διοίκηση, την ανάπτυξη κατάλληλων δεξιοτήτων και την αποτελεσματική διαχείριση της οργανωσιακής αλλαγής (Abioye et al., 2021).

Οι παραπάνω εξελίξεις καταδεικνύουν ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αναμένεται να διαδραματίσει ολοένα σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος της διαχείρισης τεχνικών έργων. Παρά τη σημαντική αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος, η υφιστάμενη βιβλιογραφία παραμένει σε μεγάλο βαθμό κατακερματισμένη, καθώς οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται σε επιμέρους εφαρμογές ή τεχνολογίες, χωρίς να προσφέρουν μια συνολική αποτίμηση των εφαρμογών, των πλεονεκτημάτων, των προκλήσεων και των παραγόντων που επηρεάζουν την επιτυχή ενσωμάτωση της ΑΙ στο Construction Project Management. Παράλληλα, η περιορισμένη σύνθεση των διαθέσιμων ερευνητικών ευρημάτων δυσχεραίνει την εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων και τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων κατευθύνσεων για την αξιοποίηση της τεχνολογίας στον κατασκευαστικό κλάδο. Το ερευνητικό αυτό κενό αποτέλεσε το βασικό έναυσμα για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει, μέσα από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και κριτική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας, τον τρόπο με τον οποίο η Τεχνητή Νοημοσύνη επηρεάζει τη διαχείριση τεχνικών έργων. Ειδικότερα, καταγράφει τις κυριότερες εφαρμογές της, αναδεικνύει τα σημαντικότερα οφέλη και

τις προκλήσεις που συνοδεύουν την αξιοποίησή της, ενώ παράλληλα συνθέτει τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή της στον κατασκευαστικό τομέα. Παράλληλα, οργανώνει και ερμηνεύει τα διαθέσιμα ερευνητικά ευρήματα, αναδεικνύοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και θεσμικών παραγόντων που επηρεάζουν την εφαρμογή της ΑΙ στο Construction Project Management. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν εξαρτάται μόνο από την εξέλιξη των αλγορίθμων, αλλά κυρίως από την ικανότητα των οργανισμών να επιλέγουν, να προσαρμόζουν και να ενσωματώνουν τις κατάλληλες τεχνολογικές λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες κάθε τεχνικού έργου.

1.2 Υπόβαθρο και σημασία του ερευνητικού προβλήματος

Η διαχείριση τεχνικών έργων (Construction Project Management – CPM) αποτελεί ένα σύνθετο επιστημονικό πεδίο, στο οποίο συνδυάζονται τεχνικές, οικονομικές, διοικητικές και οργανωσιακές λειτουργίες με σκοπό την επιτυχή ολοκλήρωση ενός έργου εντός των προκαθορισμένων περιορισμών κόστους, χρόνου, ποιότητας και ασφάλειας. Η διαχείριση αυτή δεν περιορίζεται στον προγραμματισμό και τον συντονισμό των επιμέρους δραστηριοτήτων, αλλά απαιτεί τη συνεχή λήψη αποφάσεων σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα, μεταβαλλόμενες συνθήκες και έντονες αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλών εμπλεκόμενων μερών.

Τα σύγχρονα τεχνικά έργα διακρίνονται για την αυξανόμενη πολυπλοκότητά τους. Ο μεγάλος αριθμός συμμετεχόντων, οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των εργασιών, οι διαρκώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις και οι περιορισμοί που προκύπτουν κατά την υλοποίηση δημιουργούν ένα ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον διοίκησης. Υπό αυτές τις συνθήκες, η έγκαιρη και τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωση κάθε έργου.

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες στην ανάπτυξη πληροφοριακών συστημάτων, εξειδικευμένων λογισμικών διαχείρισης

έργων και σύγχρονων ψηφιακών τεχνολογιών, η κατασκευαστική βιομηχανία εξακολουθεί να εμφανίζει χαμηλότερα επίπεδα παραγωγικότητας σε σχέση με άλλους βιομηχανικούς κλάδους. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, μεγάλος αριθμός έργων εξακολουθεί να παρουσιάζει υπερβάσεις κόστους, αποκλίσεις από τα προβλεπόμενα χρονοδιαγράμματα, δυσκολίες στον συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων και περιορισμένη αξιοποίηση των διαθέσιμων πληροφοριών κατά τη λήψη αποφάσεων.

Η εικόνα αυτή δεν αποδίδεται αποκλειστικά στην εγγενή πολυπλοκότητα των τεχνικών έργων. Σε σημαντικό βαθμό συνδέεται και με τους περιορισμούς των παραδοσιακών προσεγγίσεων διαχείρισης, οι οποίες συχνά αδυνατούν να επεξεργαστούν αποτελεσματικά τον συνεχώς αυξανόμενο όγκο δεδομένων που παράγεται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου (Abioye et al., 2021).

Η επιτάχυνση του ψηφιακού μετασχηματισμού στον κατασκευαστικό κλάδο έχει οδηγήσει στη δημιουργία τεράστιου όγκου δεδομένων, τα οποία προέρχονται από συστήματα Building Information Modelling (BIM), αισθητήρες, πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης έργων, εφαρμογές παρακολούθησης της προόδου και άλλες ψηφιακές πλατφόρμες. Η συνεχής παραγωγή δεδομένων δημιουργεί νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της διαχείρισης των έργων, υπό την προϋπόθεση ότι οι διαθέσιμες πληροφορίες μπορούν να μετατραπούν σε χρήσιμη γνώση.

Στην πράξη, όμως, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει πάντοτε. Σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα αξιοποιούνται κυρίως για την καταγραφή και την παρακολούθηση της εξέλιξης των εργασιών, χωρίς να χρησιμοποιούνται συστηματικά για την πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων ή την υποστήριξη σύνθετων διοικητικών αποφάσεων. Ως αποτέλεσμα, η συνεχώς αυξανόμενη διαθεσιμότητα πληροφοριών δεν συνοδεύεται απαραίτητα από αποτελεσματικότερη αξιοποίησή τους, γεγονός που εξακολουθεί να αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της σύγχρονης διαχείρισης τεχνικών έργων.

Στο περιβάλλον αυτό, η συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα μετατροπής του μεγάλου όγκου διαθέσιμων δεδομένων σε αξιοποιήσιμη γνώση. Η αξία της δεν περιορίζεται στην ταχύτερη επεξεργασία πληροφοριών, αλλά επεκτείνεται

στην αναγνώριση σύνθετων προτύπων, στην εξαγωγή προβλέψεων και στην υποστήριξη διαδικασιών λήψης αποφάσεων που μέχρι πρότινος βασίζονταν κυρίως στην εμπειρία και στην ανθρώπινη κρίση.

Όπως επισημαίνουν οι Abioye et al. (2021), οι τεχνολογίες ΑΙ μπορούν να αναλύουν πολύπλοκα δεδομένα, να εντοπίζουν σχέσεις που δύσκολα γίνονται αντιληπτές με συμβατικές μεθόδους και να υποστηρίζουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα στον κατασκευαστικό κλάδο, όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται συχνά υπό συνθήκες αβεβαιότητας, περιορισμένου χρόνου και συνεχώς μεταβαλλόμενων απαιτήσεων.

Παρά τις προοπτικές που δημιουργεί η Τεχνητή Νοημοσύνη, η εφαρμογή της στον κατασκευαστικό τομέα εξακολουθεί να βρίσκεται σε σχετικά πρώιμο στάδιο. Η αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα δεν συνοδεύεται ακόμη από αντίστοιχα εκτεταμένη αξιοποίηση των σχετικών τεχνολογιών στην καθημερινή πρακτική των οργανισμών. Η απόσταση ανάμεσα στις θεωρητικές δυνατότητες της ΑΙ και στην ουσιαστική ενσωμάτωσή της στις διαδικασίες διαχείρισης έργων εξακολουθεί να είναι αισθητή.

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Regona et al. (2022) αναδεικνύει ότι η ευρεία υιοθέτηση της ΑΙ επηρεάζεται από ένα σύνολο αλληλένδετων παραγόντων. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η περιορισμένη ψηφιακή ωριμότητα πολλών οργανισμών, οι δυσκολίες διαχείρισης αξιόπιστων και ποιοτικών δεδομένων, το υψηλό κόστος εφαρμογής, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού, αλλά και η αντίσταση που συχνά εκδηλώνεται απέναντι στις οργανωσιακές αλλαγές που συνεπάγεται η εισαγωγή νέων τεχνολογιών.

Οι διαπιστώσεις αυτές υπογραμμίζουν ότι η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνολογικό ζήτημα. Αντίθετα, προϋποθέτει οργανισμούς που διαθέτουν τις κατάλληλες υποδομές, επαρκείς δεξιότητες, σαφή στρατηγική και την απαραίτητη οργανωσιακή ετοιμότητα ώστε να ενσωματώσουν αποτελεσματικά τις νέες τεχνολογίες στις υφιστάμενες λειτουργίες και διαδικασίες τους (Regona et al., 2022).

Παράλληλα, η υφιστάμενη επιστημονική γνώση παραμένει σε σημαντικό βαθμό κατακερματισμένη. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων μελετών εξετάζει μεμονωμένες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως η πρόβλεψη κόστους, ο χρονικός προγραμματισμός, η διαχείριση κινδύνων ή η ασφάλεια στα εργοτάξια. Αν και οι έρευνες αυτές έχουν συμβάλει ουσιαστικά στην πρόοδο του γνωστικού πεδίου, σπανιότερα προσεγγίζουν συνολικά τον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες ΑΙ μπορούν να ενσωματωθούν στη λειτουργία των οργανισμών του κατασκευαστικού κλάδου.

Ανάλογα περιορισμένος είναι και ο αριθμός των μελετών που εξετάζουν ταυτόχρονα τις τεχνολογικές, οργανωσιακές, οικονομικές, ανθρώπινες και κανονιστικές διαστάσεις της υιοθέτησης της ΑΙ. Ως αποτέλεσμα, η διαδικασία ενσωμάτωσης της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτυπώνεται συνήθως αποσπασματικά, χωρίς να αναδεικνύονται επαρκώς οι σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων που τη διαμορφώνουν (Abioye et al., 2021· Regona et al., 2022).

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αναδεικνύουν ότι το ερευνητικό ενδιαφέρον δεν περιορίζεται πλέον στις τεχνολογικές δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης. Εξίσου σημαντικό είναι να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι εφαρμογές της μπορούν να ενσωματωθούν αποτελεσματικά στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων, ποια οφέλη μπορούν να προσφέρουν στην πράξη, ποιες προκλήσεις συνοδεύουν την εφαρμογή τους και ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή τους από τους οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου.

Η ανάγκη αυτή αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία αν ληφθεί υπόψη ότι η διεθνής βιβλιογραφία εξακολουθεί να παρουσιάζει περιορισμένη συνθετική προσέγγιση του θέματος. Παρότι τα τελευταία χρόνια έχει δημοσιευθεί μεγάλος αριθμός ερευνών, οι περισσότερες εξετάζουν μεμονωμένες τεχνολογίες ή συγκεκριμένα πεδία εφαρμογής, χωρίς να επιχειρούν μια συνολική αποτίμηση του τρόπου με τον οποίο η Τεχνητή Νοημοσύνη επηρεάζει τη διαχείριση τεχνικών έργων σε όλο το εύρος της.

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στη μεθοδολογία της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, με στόχο τη συγκέντρωση, την αξιολόγηση και τη σύνθεση της διαθέσιμης διεθνούς επιστημονικής γνώσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει όχι μόνο την καταγραφή των υφιστάμενων ερευνητικών

δεδομένων, αλλά και την κριτική αποτίμησή τους, ώστε να αναδειχθούν τόσο τα σημεία σύγκλισης όσο και οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στη σχετική βιβλιογραφία.

Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην εννοιολογική οργάνωση των παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και στην ερμηνεία των μεταξύ τους σχέσεων. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται η διαμόρφωση μιας περισσότερο ολοκληρωμένης εικόνας του γνωστικού πεδίου, η οποία υπερβαίνει την απλή καταγραφή επιμέρους εφαρμογών ή τεχνολογικών εξελίξεων.

Η συμβολή της εργασίας δεν περιορίζεται επομένως στην παρουσίαση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας. Επιδιώκει να οργανώσει συστηματικά τη διαθέσιμη γνώση, να αναδείξει τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά και να προσφέρει ένα συνεκτικό θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση των προϋποθέσεων, των δυνατοτήτων και των περιορισμών που συνοδεύουν την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.

Μέσα από αυτή τη συνθετική προσέγγιση, η εργασία φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο τόσο για τη μελλοντική επιστημονική έρευνα όσο και για τους επαγγελματίες του χώρου, υποστηρίζοντας την καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που διαμορφώνουν την επιτυχή ενσωμάτωση της ΑΙ στη διαχείριση τεχνικών έργων.

1.3 Σκοπός της έρευνας

Η ραγδαία εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) και η ολοένα ευρύτερη ενσωμάτωσή της στον κατασκευαστικό κλάδο δημιουργούν νέες προοπτικές για τη βελτίωση της διαχείρισης τεχνικών έργων. Τα τελευταία χρόνια καταγράφεται σημαντική αύξηση των επιστημονικών δημοσιεύσεων που εξετάζουν εφαρμογές της ΑΙ σε βασικούς τομείς του Construction Project Management, όπως ο χρονικός προγραμματισμός, η εκτίμηση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου των έργων, η ασφάλεια στα εργοτάξια και η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Παράλληλα, η πρόοδος που σημειώνεται στη Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), στη Βαθιά Μάθηση (Deep Learning) και σε άλλες

προηγμένες τεχνικές διευρύνει συνεχώς τις δυνατότητες αξιοποίησης της ΑΙ στον κατασκευαστικό τομέα (Abioye et al., 2021).

Παρά τη σημαντική ενίσχυση της ερευνητικής δραστηριότητας, η διαθέσιμη γνώση εξακολουθεί να εμφανίζει έντονο κατακερματισμό. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων μελετών επικεντρώνεται είτε σε επιμέρους εφαρμογές είτε στην επίλυση συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων, χωρίς να εξετάζει συνολικά τον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να ενσωματωθούν στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων. Παράλληλα, περιορισμένος παραμένει ο αριθμός των ερευνών που συνθέτουν συστηματικά τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή τους από τους οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου. Όπως επισημαίνουν οι Regona et al. (2022), η αποτελεσματική αξιοποίηση της ΑΙ δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις δυνατότητες των αλγορίθμων, αλλά από ένα ευρύτερο πλέγμα οργανωσιακών, οικονομικών, ανθρώπινων και κανονιστικών παραγόντων που διαμορφώνουν το περιβάλλον εφαρμογής της.

Με αφετηρία τα παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά συστηματικά τον ρόλο της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων μέσα από την καταγραφή, την ανάλυση, τη σύνθεση και την κριτική αξιολόγηση της διεθνούς βιβλιογραφίας. Βασικός στόχος είναι η αποτύπωση των σημαντικότερων εφαρμογών της ΑΙ στους κύριους τομείς του Construction Project Management, η διερεύνηση των οφελών που προκύπτουν από την αξιοποίησή της, καθώς και η ανάλυση των προκλήσεων, των περιορισμών και των παραγόντων που επηρεάζουν την επιτυχή εφαρμογή της στους οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στη σύνθεση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στην καταγραφή τους, αλλά εξετάζει και την αλληλεπίδρασή τους, προκειμένου να αναδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τις αποφάσεις που σχετίζονται με την επιλογή, την ενσωμάτωση και την αποτελεσματική αξιοποίηση εφαρμογών ΑΙ στον κατασκευαστικό κλάδο.

Παράλληλα, επιχειρείται η ανάδειξη των σημαντικότερων ερευνητικών κενών που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς και η συστηματική οργάνωση των διαθέσιμων ερευνητικών ευρημάτων σε ένα συνεκτικό πλαίσιο αναφοράς. Η συνθετική αυτή προσέγγιση διευκολύνει την κατανόηση της πολυδιάστατης φύσης της υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης και συμβάλλει στη διαμόρφωση ενός θεωρητικού πλαισίου για την ερμηνεία των παραγόντων που επηρεάζουν την εφαρμογή της στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Κατ' επέκταση, η εργασία δεν περιορίζεται στην περιγραφή των επιμέρους εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης, αλλά επιδιώκει να προσφέρει μια ολοκληρωμένη και κριτικά τεκμηριωμένη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τη χρήση της AI στο Construction Project Management. Μέσα από τη συστηματική οργάνωση της υπάρχουσας γνώσης και την ερμηνεία των σχέσεων μεταξύ των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτησή της, επιδιώκεται η διαμόρφωση ενός χρήσιμου θεωρητικού υπόβαθρου για τη μελλοντική επιστημονική έρευνα, αλλά και για τους οργανισμούς και τους επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου που επιθυμούν να αξιοποιήσουν αποτελεσματικότερα τις δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης.

1.4 Ερευνητικά ερωτήματα

Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) για τη διαχείριση τεχνικών έργων, εξακολουθούν να υφίστανται ουσιαστικά ερευνητικά κενά. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων μελετών επικεντρώνεται είτε στην ανάπτυξη εξειδικευμένων εφαρμογών είτε στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων, ενώ σχετικά περιορισμένος είναι ο αριθμός εκείνων που επιχειρούν να συνθέσουν τη διαθέσιμη γνώση σε ένα ενιαίο ερμηνευτικό πλαίσιο. Αντίστοιχα, λίγες έρευνες εξετάζουν ολοκληρωμένα τις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν την

υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης ή αποτυπώνουν συνολικά τις προϋποθέσεις αξιοποίησής της στο Construction Project Management (Abioye et al., 2021; Regona et al., 2022; Love et al., 2022).

Με γνώμονα το ερευνητικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, τον σκοπό της παρούσας εργασίας και τα κενά που εντοπίζονται στη σχετική βιβλιογραφία, διαμορφώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα. Τα ερωτήματα αυτά αποτελούν τον βασικό άξονα της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης και καθοδηγούν τόσο τη διαδικασία επιλογής και αξιολόγησης των επιστημονικών πηγών όσο και τη θεματική ανάλυση και σύνθεση των ευρημάτων.

Ερευνητικό Ερώτημα 1 (RQ1)

Ποιες είναι οι κυριότερες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και σε ποιους τομείς του Construction Project Management παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ερευνητική και πρακτική ανάπτυξη;

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα επικεντρώνεται στην καταγραφή, την ταξινόμηση και την ανάλυση των σημαντικότερων εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στους βασικούς τομείς του Construction Project Management. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζονται, μεταξύ άλλων, ο χρονικός προγραμματισμός, η διαχείριση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου των έργων, η διασφάλιση της ποιότητας, η υγεία και η ασφάλεια στα εργοτάξια, η διαχείριση πόρων, η διαχείριση εγγράφων και η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων.

Ερευνητικό Ερώτημα 2 (RQ2)

Ποια είναι τα σημαντικότερα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και με ποιον τρόπο επηρεάζουν την απόδοση των έργων;

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα εξετάζει τη συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη βελτίωση της παραγωγικότητας, στην αύξηση της ακρίβειας των προβλέψεων, στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων και των κινδύνων, καθώς και στην ενίσχυση της ποιότητας των αποφάσεων. Παράλληλα, διερευνάται ο βαθμός

στον οποίο οι εφαρμογές της ΑΙ μπορούν να συμβάλουν στη συνολική βελτίωση της απόδοσης των τεχνικών έργων.

Ερευνητικό Ερώτημα 3 (RQ3)

Ποιες είναι οι κυριότερες προκλήσεις, οι περιορισμοί και οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης από οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου;

Η διερεύνηση του τρίτου ερευνητικού ερωτήματος στρέφεται στους τεχνολογικούς, οργανωσιακούς, ανθρώπινους, οικονομικούς και κανονιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την αποδοχή όσο και την αποτελεσματική ενσωμάτωση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων αυτών και στον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνουν τη διαδικασία υιοθέτησης της ΑΙ.

Ερευνητικό Ερώτημα 4 (RQ4)

Πώς μπορούν να συντεθούν και να οργανωθούν τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να αναδειχθούν οι βασικές διαστάσεις που επηρεάζουν την αξιοποίηση και την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στο Construction Project Management;

Το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα αφορά τη σύνθεση και την εννοιολογική οργάνωση των ευρημάτων της βιβλιογραφίας, με στόχο την ανάδειξη των βασικών διαστάσεων που επηρεάζουν την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Παράλληλα, επιδιώκεται η πληρέστερη κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, ώστε να διαμορφωθεί μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα του γνωστικού πεδίου.

Ερευνητικό Ερώτημα 5 (RQ5)

Ποιες κατευθύνσεις και προτεραιότητες για μελλοντική έρευνα αναδεικνύονται μέσα από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων;

Το πέμπτο ερευνητικό ερώτημα εστιάζει στον εντοπισμό των σημαντικότερων ερευνητικών κενών και των προοπτικών περαιτέρω ανάπτυξης του επιστημονικού πεδίου. Μέσα από την κριτική αξιολόγηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας επιδιώκεται η ανάδειξη θεματικών περιοχών που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση, καθώς και η διατύπωση προτάσεων που μπορούν να υποστηρίξουν τόσο τη μελλοντική επιστημονική έρευνα όσο και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.

1.5 Ερευνητικοί στόχοι

Οι ερευνητικοί στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας απορρέουν από το ερευνητικό πρόβλημα, τον σκοπό της μελέτης και τα ερευνητικά ερωτήματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Η διατύπωσή τους προσδιορίζει με σαφήνεια τις επιμέρους επιδιώξεις της έρευνας και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τη Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, τη διαδικασία αξιολόγησης της διεθνούς βιβλιογραφίας και τη σύνθεση των ερευνητικών ευρημάτων.

Κεντρικός στόχος της εργασίας είναι η συστηματική διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) αξιοποιείται στη διαχείριση τεχνικών έργων, μέσα από την κριτική ανάλυση και σύνθεση της διαθέσιμης διεθνούς βιβλιογραφίας. Η έρευνα δεν περιορίζεται στην καταγραφή των εφαρμογών της AI, αλλά επιδιώκει να εξετάσει συνολικά τα οφέλη, τις προκλήσεις και τις προϋποθέσεις που συνοδεύουν την ενσωμάτωσή της στο Construction Project Management.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου τίθενται οι ακόλουθοι επιμέρους στόχοι:

- Να καταγραφούν, να ταξινομηθούν και να αναλυθούν οι σημαντικότερες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στους βασικούς τομείς του Construction Project Management.

- Να διερευνηθούν τα κυριότερα οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίηση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης και να αξιολογηθεί η συμβολή τους στη βελτίωση της απόδοσης των τεχνικών έργων.
- Να αναγνωριστούν και να αξιολογηθούν οι σημαντικότερες προκλήσεις, οι περιορισμοί και οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης από οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου.
- Να εντοπιστούν και να αποτιμηθούν τα βασικά ερευνητικά κενά που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την εφαρμογή της ΑΙ στο Construction Project Management.
- Να διερευνηθεί η επίδραση των τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων στην αποτελεσματική ενσωμάτωση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων.
- Να οργανωθούν και να συντεθούν τα διαθέσιμα ερευνητικά ευρήματα, ώστε να αναδειχθούν οι βασικές διαστάσεις που διαμορφώνουν την αξιοποίηση και την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.
- Να διατυπωθούν προτάσεις για μελλοντική επιστημονική έρευνα και να αναδειχθούν κατευθύνσεις που μπορούν να υποστηρίξουν την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Οι παραπάνω στόχοι διαμορφώνουν ένα συνεκτικό πλαίσιο για την ανάπτυξη της έρευνας και συνδέονται άμεσα με τα ερευνητικά ερωτήματα που έχουν τεθεί. Η αντιστοίχιση αυτή διασφαλίζει τη συνοχή μεταξύ του ερευνητικού προβλήματος, του σκοπού της μελέτης, των ερευνητικών ερωτημάτων και της μεθοδολογίας που ακολουθείται, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα στάδια της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης υπηρετούν έναν κοινό ερευνητικό προσανατολισμό.

Παράλληλα, οι ερευνητικοί στόχοι αποτυπώνουν και τη βασική επιδίωξη της εργασίας: τη συγκέντρωση, την κριτική αξιολόγηση και τη σύνθεση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης σχετικά με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη

διαχείριση τεχνικών έργων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιδιώκεται όχι μόνο η αποτύπωση της σημερινής κατάστασης του γνωστικού πεδίου, αλλά και η ανάδειξη εκείνων των στοιχείων που μπορούν να υποστηρίξουν τόσο τη μελλοντική έρευνα όσο και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των τεχνολογιών ΑΙ στην κατασκευαστική βιομηχανία.

1.6 Αναμενόμενη επιστημονική συνεισφορά της έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στην ενίσχυση της επιστημονικής γνώσης σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων, μέσα από τη συστηματική ανασκόπηση και την κριτική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας. Σε αντίθεση με σημαντικό μέρος των δημοσιευμένων ερευνών, οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στην ανάπτυξη ή στην αξιολόγηση επιμέρους εφαρμογών της ΑΙ, η παρούσα μελέτη προσεγγίζει το αντικείμενο συνολικά, εξετάζοντας τις εφαρμογές, τα οφέλη, τις προκλήσεις, τους περιορισμούς και τις προϋποθέσεις που επηρεάζουν την επιτυχή ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στο Construction Project Management (Abioye et al., 2021; Regona et al., 2022).

Βασικό στοιχείο της συνεισφοράς της αποτελεί η συστηματική οργάνωση και ερμηνεία της διαθέσιμης γνώσης γύρω από την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Η συγκριτική ανάλυση των δημοσιευμένων μελετών επιτρέπει την αποτύπωση των κυρίαρχων θεματικών περιοχών, την ανάδειξη των βασικών ερευνητικών τάσεων και τη χαρτογράφηση των παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτηση των τεχνολογιών ΑΙ στις κατασκευές.

Η αξία της προσέγγισης αυτής δεν περιορίζεται στην καταγραφή των επιμέρους ευρημάτων της βιβλιογραφίας. Μέσα από τη συνδυαστική ερμηνεία διαφορετικών ερευνητικών αποτελεσμάτων επιχειρείται η κατανόηση των σχέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και θεσμικών παραγόντων. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνολογικό ζήτημα, αλλά

διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση πολλών παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν τόσο τη διαδικασία υιοθέτησης όσο και τη μετέπειτα αξιοποίησή της στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η ανάδειξη των ερευνητικών κενών που εξακολουθούν να χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο. Η κριτική αποτίμηση της διεθνούς βιβλιογραφίας καταδεικνύει την ανάγκη για περισσότερες εμπειρικές μελέτες μεγάλης κλίμακας, για συστηματικότερη διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρει η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI), για αξιολόγηση των μακροχρόνιων επιδράσεων της AI στη λειτουργία των οργανισμών, καθώς και για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων πλαισίων υποστήριξης της λήψης αποφάσεων στον κατασκευαστικό κλάδο.

Η επιστημονική συνεισφορά της εργασίας δεν συνίσταται στην ανάπτυξη ενός νέου θεωρητικού μοντέλου ή μιας νέας μεθοδολογικής προσέγγισης. Αντίθετα, εστιάζει στη σύνθεση και στην κριτική αξιολόγηση της υπάρχουσας γνώσης, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της σημερινής κατάστασης του επιστημονικού πεδίου. Η σύνθεση αυτή μπορεί να λειτουργήσει ως σημείο αναφοράς τόσο για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες όσο και για οργανισμούς και επαγγελματίες που επιδιώκουν να αξιοποιήσουν αποτελεσματικότερα τις δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

1.7 Μεθοδολογία της Έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται στη μεθοδολογία της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Systematic Literature Review – SLR), η οποία επιλέχθηκε ως η καταλληλότερη ερευνητική προσέγγιση για τη συγκέντρωση, την αξιολόγηση και την κριτική σύνθεση της διαθέσιμης επιστημονικής γνώσης σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η επιλογή αυτή ανταποκρίνεται στη φύση του υπό εξέταση αντικείμενου, καθώς η AI αποτελεί ένα ιδιαίτερα δυναμικό επιστημονικό πεδίο, στο

οποίο η ερευνητική παραγωγή αυξάνεται διαρκώς και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών προσεγγίσεων και πεδίων εφαρμογής.

Η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση παρέχει ένα δομημένο και διαφανές πλαίσιο για τη μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, επιτρέποντας όχι μόνο τη συγκέντρωση των διαθέσιμων ερευνητικών δεδομένων αλλά και την κριτική αξιολόγηση και σύνθεσή τους. Μέσα από τη διαδικασία αυτή καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των κυριότερων εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης, των σημαντικότερων πλεονεκτημάτων που συνδέονται με την αξιοποίησή της, των προκλήσεων που εξακολουθούν να περιορίζουν την ευρύτερη εφαρμογή της, καθώς και των ερευνητικών κενών που εξακολουθούν να χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο.

Παράλληλα, η συγκεκριμένη μεθοδολογική προσέγγιση διευκολύνει τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διαφορετικών μελετών, επιτρέποντας την εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων και τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας για το υφιστάμενο επίπεδο γνώσης στον τομέα του Construction Project Management.

Ο σχεδιασμός της ερευνητικής διαδικασίας ακολούθησε τις θεμελιώδεις αρχές της συστηματικότητας, της διαφάνειας και της αναπαραγωγιμότητας, οι οποίες αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων Συστηματικών Βιβλιογραφικών Ανασκοπήσεων. Για τον σκοπό αυτό υιοθετήθηκαν οι βασικές κατευθυντήριες οδηγίες της μεθοδολογίας PRISMA 2020, προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες της παρούσας έρευνας και στις απαιτήσεις του γνωστικού πεδίου της μηχανικής και της διαχείρισης τεχνικών έργων.

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε σε διεθνώς αναγνωρισμένες επιστημονικές βάσεις δεδομένων, ενώ η επιλογή των μελετών βασίστηκε σε προκαθορισμένα κριτήρια συνάφειας, επιστημονικής ποιότητας και αξιοπιστίας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι το τελικό δείγμα περιλαμβάνει δημοσιεύσεις οι οποίες ανταποκρίνονται στους στόχους της έρευνας και παρέχουν επαρκή επιστημονική τεκμηρίωση για την ανάλυση του υπό εξέταση αντικειμένου.

Η επεξεργασία των επιλεγμένων μελετών επικεντρώθηκε στις εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στους βασικούς τομείς του Construction Project Management, στα οφέλη που συνδέονται με την αξιοποίησή της, στις προκλήσεις που εξακολουθούν να δυσχεραίνουν την εφαρμογή της, καθώς και στους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή της από τους οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου. Η ανάλυση δεν περιορίστηκε στην περιγραφή των επιμέρους αποτελεσμάτων, αλλά περιέλαβε και συγκριτική αξιολόγηση των δημοσιευμένων ερευνών, με στόχο την αναγνώριση κοινών τάσεων, σημείων διαφοροποίησης και περιοχών όπου εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικά ερευνητικά κενά.

Τα ευρήματα οργανώθηκαν στη συνέχεια σε θεματικές ενότητες, ώστε να αποδοθούν με σαφή και συνεκτικό τρόπο οι βασικές διαστάσεις που συνθέτουν το υπό εξέταση γνωστικό πεδίο. Η θεματική αυτή οργάνωση διευκόλυνε την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης, καθώς και την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις δυνατότητες, τους περιορισμούς και τις προϋποθέσεις αποτελεσματικής εφαρμογής της στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Η αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας, της στρατηγικής αναζήτησης της βιβλιογραφίας, των κριτηρίων επιλογής και αποκλεισμού των δημοσιεύσεων, της διαδικασίας εξαγωγής και ανάλυσης των δεδομένων, καθώς και της μεθόδου σύνθεσης των ερευνητικών ευρημάτων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3, όπου τεκμηριώνεται αναλυτικά κάθε στάδιο της ερευνητικής διαδικασίας.

1.8 Δομή της Διατριβής

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν τη φυσική εξέλιξη της ερευνητικής διαδικασίας. Η δομή της ξεκινά από τη θεωρητική θεμελίωση του αντικειμένου και τη διαμόρφωση του ερευνητικού πλαισίου, συνεχίζει με την παρουσίαση της μεθοδολογικής προσέγγισης και τη συστηματική διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας και ολοκληρώνεται με τη

σύνθεση των ευρημάτων και την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει το αντικείμενο της έρευνας και διαμορφώνει το γενικό πλαίσιο της μελέτης. Παρουσιάζονται το ερευνητικό πρόβλημα, ο σκοπός και οι στόχοι της εργασίας, τα ερευνητικά ερωτήματα, η αναμενόμενη επιστημονική συνεισφορά, η μεθοδολογία που ακολουθείται, καθώς και η συνολική διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό υπόβαθρο της έρευνας. Αρχικά εξετάζονται οι βασικές έννοιες και τεχνολογίες της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις αρχές του Construction Project Management, ο ψηφιακός μετασχηματισμός της κατασκευαστικής βιομηχανίας και το πλαίσιο του Construction 4.0, τα οποία αποτελούν τη θεωρητική βάση της μελέτης.

Κεφάλαιο 3 – Ερευνητική Μεθοδολογία

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της έρευνας. Παρουσιάζονται η διαδικασία της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Systematic Literature Review – SLR), η στρατηγική αναζήτησης της βιβλιογραφίας, τα κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού των δημοσιεύσεων, καθώς και οι διαδικασίες εξαγωγής, ανάλυσης και σύνθεσης των ερευνητικών δεδομένων.

Κεφάλαιο 4 – Σύνθεση και Κριτική Ανάλυση της Βιβλιογραφίας

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί τον βασικό κορμό της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Εξετάζονται οι κυριότερες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη

διαχείριση τεχνικών έργων, συγκρίνονται οι διαφορετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και αναδεικνύονται οι κυρίαρχες ερευνητικές τάσεις. Παράλληλα, πραγματοποιείται κριτική αποτίμηση των διαθέσιμων μελετών και εντοπίζονται τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά.

Κεφάλαιο 5 – Παράγοντες Υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης

Το πέμπτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Αναλύονται οι τεχνολογικές, οργανωσιακές, ανθρώπινες, οικονομικές, ηθικές και κανονιστικές διαστάσεις του ζητήματος και συντίθενται οι βασικές προϋποθέσεις που, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, διευκολύνουν την αποτελεσματική ενσωμάτωση εφαρμογών ΑΙ στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων.

Κεφάλαιο 6 – Σύνθεση των Ευρημάτων της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Το έκτο κεφάλαιο ενοποιεί τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, οργανώνοντας τα ευρήματα σε ένα συνεκτικό εννοιολογικό πλαίσιο. Εξετάζονται οι σχέσεις μεταξύ των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης, αναλύονται οι πρακτικές επιπτώσεις για οργανισμούς και διαχειριστές έργων, ενώ επισημαίνονται οι περιορισμοί της υφιστάμενης βιβλιογραφίας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα

Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και παρουσιάζει τις απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στην αρχή της εργασίας. Επιπλέον, αναδεικνύονται η θεωρητική και η πρακτική συμβολή της έρευνας, συζητούνται οι περιορισμοί της και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση της αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Οι εξελίξεις στις ψηφιακές τεχνολογίες μεταβάλλουν ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, υλοποιούνται και διαχειρίζονται τα σύγχρονα τεχνικά έργα. Η κατασκευαστική βιομηχανία, ένας κλάδος που για πολλά χρόνια χαρακτηριζόταν από σχετικά αργούς ρυθμούς τεχνολογικής ανανέωσης και περιορισμένη αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, διανύει πλέον μια περίοδο έντονου ψηφιακού μετασχηματισμού. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των έργων, η ανάγκη για αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, οι υψηλότερες απαιτήσεις παραγωγικότητας και η συνεχής πίεση για περιορισμό του κόστους και του χρόνου υλοποίησης ενισχύουν τη στροφή προς προηγμένες τεχνολογικές λύσεις, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν ουσιαστικότερα τόσο τη διαχείριση των έργων όσο και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Salah & Alabdullatief, 2025).

Η εξέλιξη αυτή έχει αναδείξει την Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) σε μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις της ψηφιακής εποχής. Η ικανότητά της να επεξεργάζεται μεγάλους όγκους δεδομένων, να αναγνωρίζει σύνθετα πρότυπα, να παράγει προβλέψεις και να υποστηρίζει πολύπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων δημιουργεί νέες δυνατότητες για τον σχεδιασμό, την οργάνωση και τη διοίκηση των τεχνικών έργων.

Οι δυνατότητες αυτές διευρύνονται ακόμη περισσότερο μέσω της ενσωμάτωσης της AI σε τεχνολογίες όπως το Building Information Modelling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), η ρομποτική και τα συστήματα ανάλυσης μεγάλων δεδομένων. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών αυτών ενισχύει σημαντικά τις δυνατότητες του σύγχρονου Construction Project Management και επιταχύνει τη μετάβαση από συμβατικές πρακτικές διαχείρισης σε προσεγγίσεις που βασίζονται στη συστηματική αξιοποίηση δεδομένων και στην ευφυή υποστήριξη της λήψης αποφάσεων (Salah & Alabdullatief, 2025).

Οι πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης έχει πλέον ξεπεράσει το στάδιο των μεμονωμένων ερευνητικών εφαρμογών ή των πιλοτικών έργων και επεκτείνεται σταδιακά σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των τεχνικών έργων. Σύμφωνα με τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Salah και Alabdullatief (2025), οι εφαρμογές της ΑΙ καλύπτουν δραστηριότητες όπως ο σχεδιασμός, ο χρονικός προγραμματισμός, η εκτίμηση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου, η διαχείριση της ασφάλειας, καθώς και η λειτουργία και η συντήρηση των κατασκευών.

Η ανασκόπηση βασίστηκε στην ανάλυση 178 επιστημονικών δημοσιεύσεων της περιόδου 2015–2024, αποτυπώνοντας τη θεαματική αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος κατά την τελευταία δεκαετία. Η τάση αυτή επιβεβαιώνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη εξελίσσεται σε έναν από τους βασικούς μοχλούς του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας (Salah & Alabdullatief, 2025).

Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο, η αποτελεσματική αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ανάπτυξη ολοένα και πιο εξελιγμένων αλγορίθμων. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνολογικές δυνατότητες ενσωματώνονται στις οργανωσιακές διαδικασίες, στη διαχείριση της γνώσης, στην ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων και στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Η τεχνολογική πρόοδος, επομένως, δεν αρκεί από μόνη της για να μετασχηματίσει ουσιαστικά το Construction Project Management· απαιτείται ένα ευρύτερο οργανωσιακό πλαίσιο που να επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση των νέων δυνατοτήτων στην πράξη (Salah & Alabdullatief, 2025).

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της έρευνας. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της Τεχνητής Νοημοσύνης και οι κυριότερες τεχνολογίες που τη συνθέτουν. Στη συνέχεια εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνολογίες αυτές ενσωματώνονται στη διαχείριση τεχνικών έργων, ενώ παράλληλα αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές του Construction Project Management και του Construction 4.0. Στόχος είναι να διαμορφωθεί το απαραίτητο εννοιολογικό πλαίσιο για την κατανόηση των εφαρμογών, των προκλήσεων και των παραγόντων που

επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης και εξετάζονται στις επόμενες ενότητες της εργασίας.

2.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη στον κατασκευαστικό κλάδο

Η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις που συνοδεύουν τον ψηφιακό μετασχηματισμό της βιομηχανίας των κατασκευών. Παρότι η AI έχει ήδη εδραιωθεί σε τομείς όπως η βιομηχανική παραγωγή, η υγεία και οι χρηματοοικονομικές υπηρεσίες, η διείσδυσή της στις κατασκευές πραγματοποιήθηκε με πιο αργούς ρυθμούς. Η ιδιαιτερότητα αυτή συνδέεται κυρίως με τα χαρακτηριστικά του ίδιου του κλάδου, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας, μοναδικότητα κάθε έργου, έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ πολλών εμπλεκομένων φορέων και συνεχή μεταβολή των συνθηκών εκτέλεσης. Οι παράγοντες αυτοί δυσχέραναν επί σειρά ετών την ανάπτυξη και την ευρεία υιοθέτηση ευφών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (Abioye et al., 2021).

Η σταδιακή ψηφιοποίηση των τεχνικών έργων δημιούργησε, ωστόσο, νέες προϋποθέσεις για την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η ευρεία χρήση τεχνολογιών όπως το Building Information Modelling (BIM), τα πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης έργων, οι αισθητήρες Internet of Things (IoT), τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), οι σαρώσεις με λέιζερ και οι ψηφιακές πλατφόρμες διαχείρισης δεδομένων οδήγησε στη συνεχή παραγωγή μεγάλου όγκου πληροφοριών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν πλέον πολύτιμο πόρο, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν για την εξαγωγή γνώσης, την αναγνώριση προτύπων και την υποστήριξη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων (Abioye et al., 2021).

Η αλλαγή αυτή σηματοδοτεί μια ουσιαστική μετατόπιση στη φιλοσοφία της διαχείρισης τεχνικών έργων. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις στηρίζονταν κυρίως στην

εμπειρία των μηχανικών, στην προσωπική τους κρίση και στην εφαρμογή προκαθορισμένων διαδικασιών για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων. Αντίθετα, τα σύγχρονα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης αξιοποιούν δεδομένα πραγματικού χρόνου, εντοπίζουν σύνθετες συσχετίσεις που δύσκολα γίνονται αντιληπτές από τον άνθρωπο και παρέχουν προβλέψεις ή προτάσεις που ενισχύουν τη λήψη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων. Η εξέλιξη αυτή δεν υποκαθιστά τον ρόλο του μηχανικού· μεταβάλλει όμως ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο αξιοποιείται η διαθέσιμη πληροφορία κατά τη διοίκηση και τον έλεγχο των έργων (Abioye et al., 2021).

Η πορεία εξέλιξης της Τεχνητής Νοημοσύνης στις κατασκευές υπήρξε σταδιακή. Οι πρώτες εφαρμογές βασίστηκαν κυρίως στα συστήματα εμπειρογνομόνων (Expert Systems), τα οποία επιχειρούσαν να αναπαραστήσουν τη γνώση έμπειρων μηχανικών μέσω συνόλων προκαθορισμένων κανόνων. Τα συστήματα αυτά αξιοποιήθηκαν σε εφαρμογές όπως η επιλογή κατασκευαστικών μεθόδων, η διάγνωση τεχνικών αστοχιών και η υποστήριξη της εκτίμησης κόστους. Παρότι αποτέλεσαν ένα σημαντικό πρώτο βήμα προς την αξιοποίηση της υπολογιστικής νοημοσύνης στις κατασκευές, παρουσίαζαν σημαντικούς περιορισμούς, καθώς δεν μπορούσαν να προσαρμόζονται σε νέα δεδομένα και απαιτούσαν συνεχή ενημέρωση των βάσεων γνώσης από εξειδικευμένους χρήστες (Abioye et al., 2021).

Η ουσιαστική ανάπτυξη της ΑΙ ξεκίνησε όταν οι εφαρμογές της άρχισαν να βασίζονται περισσότερο στην ανάλυση δεδομένων παρά σε προκαθορισμένους κανόνες. Η μεταβολή αυτή επέτρεψε την ανάπτυξη συστημάτων που είναι σε θέση να αναγνωρίζουν πρότυπα, να πραγματοποιούν προβλέψεις και να βελτιώνουν σταδιακά την απόδοσή τους μέσω της συνεχούς επεξεργασίας νέων πληροφοριών. Όπως επισημαίνουν οι Abioye et al. (2021), η δυνατότητα αυτή διεύρυνε σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης και κατέστησε εφικτή την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, όπως συμβαίνει συνήθως στα τεχνικά έργα.

Σήμερα, η Τεχνητή Νοημοσύνη αξιοποιείται σε ολόκληρο σχεδόν τον κύκλο ζωής των κατασκευαστικών έργων. Οι εφαρμογές της εκτείνονται από τον σχεδιασμό, τον

χρονικό προγραμματισμό και την εκτίμηση κόστους έως τη διαχείριση κινδύνων, την παρακολούθηση της προόδου, τη διασφάλιση της ποιότητας, την ασφάλεια των εργοταξίων, τη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων, αλλά και τη λειτουργία και συντήρηση των υποδομών μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Η εξέλιξη αυτή αποδεικνύει ότι η ΑΙ δεν περιορίζεται πλέον στην επίλυση μεμονωμένων τεχνικών ζητημάτων, αλλά εξελίσσεται σταδιακά σε βασικό εργαλείο ολοκληρωμένης διαχείρισης τεχνικών έργων (Abioye et al., 2021).

Η βιβλιογραφία επισημαίνει, ωστόσο, ότι η επιτυχία των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις δυνατότητες των αλγορίθμων. Εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων, η ύπαρξη κατάλληλων ψηφιακών υποδομών και η οργανωσιακή ετοιμότητα των επιχειρήσεων να ενσωματώσουν τις νέες τεχνολογίες στις καθημερινές τους λειτουργίες. Η Τεχνητή Νοημοσύνη, επομένως, δεν μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως απομονωμένη τεχνολογία, αλλά απαιτεί ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό οικοσύστημα που να υποστηρίζει την αξιόπιστη συλλογή, διαχείριση και αξιοποίηση των δεδομένων (Abioye et al., 2021).

Παράλληλα, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικά εμπόδια που περιορίζουν τη γενικευμένη εφαρμογή της ΑΙ στις κατασκευές. Η ανομοιογένεια των δεδομένων, η έλλειψη κοινών προτύπων, οι δυσκολίες διασύνδεσης διαφορετικών λογισμικών, το υψηλό κόστος επένδυσης και η περιορισμένη εξοικείωση πολλών οργανισμών με τις νέες τεχνολογίες συγκαταλέγονται στους βασικούς ανασταλτικούς παράγοντες. Επιπλέον, η αποτελεσματική αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει την ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων από τους επαγγελματίες του κλάδου, καθώς και την προσαρμογή των οργανωσιακών διαδικασιών σε ένα περισσότερο δεδομενοκεντρικό μοντέλο λειτουργίας (Abioye et al., 2021).

Η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν αποτελεί απλώς μία ακόμη τεχνολογική καινοτομία, αλλά έναν από τους βασικούς πυλώνες του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η συμβολή της δεν περιορίζεται στην αυτοματοποίηση επιμέρους

διαδικασιών· επεκτείνεται στην υποστήριξη στρατηγικών και επιχειρησιακών αποφάσεων, στη βελτίωση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και στη διαμόρφωση ενός περισσότερο ευφυούς και προληπτικού μοντέλου διαχείρισης τεχνικών έργων. Υπό αυτό το πρίσμα, η ΑΙ αναμένεται να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στη διαμόρφωση του Construction 4.0, λειτουργώντας ως ο συνδετικός κρίκος μεταξύ των ψηφιακών τεχνολογιών και της αποτελεσματικότερης διοίκησης των τεχνικών έργων.

2.2.1 Εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) συγκαταλέγεται στις πλέον καθοριστικές τεχνολογικές εξελίξεις του τελευταίου αιώνα, καθώς έχει επηρεάσει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται τα σύγχρονα πληροφοριακά συστήματα και υποστηρίζεται η λήψη αποφάσεων σε πληθώρα επιστημονικών και επαγγελματικών πεδίων. Η εξέλιξή της, ωστόσο, δεν υπήρξε συνεχής ούτε ακολούθησε μια γραμμική πορεία. Αντίθετα, διαμορφώθηκε μέσα από περιόδους έντονης ανάπτυξης, επιβράδυνσης και επαναπροσδιορισμού, οι οποίες επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από την πρόοδο της υπολογιστικής ισχύος, τη διαθεσιμότητα δεδομένων και την εξέλιξη των αλγοριθμικών μεθόδων. Η αναδρομή στα βασικά στάδια αυτής της πορείας βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η ΑΙ οδηγήθηκε από τις πρώτες θεωρητικές προσεγγίσεις στη σημερινή εποχή των ευφύων συστημάτων και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs) (Mundlamuri et al., 2025).

Οι πρώτες βάσεις του επιστημονικού πεδίου τέθηκαν τη δεκαετία του 1950. Σταθμό στην ιστορία της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτέλεσε η Διάσκεψη του Dartmouth το 1956, κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά επίσημα ο όρος *Artificial Intelligence*. Εκείνη την περίοδο κυριάρχησε η αντίληψη ότι οι ανθρώπινες γνωστικές λειτουργίες μπορούσαν να αναπαρασταθούν μέσω συμβόλων και λογικών κανόνων. Η φιλοσοφία αυτή, γνωστή ως Symbolic Artificial Intelligence ή Good Old-Fashioned Artificial Intelligence (GOFAI), επικεντρωνόταν στην ανάπτυξη αλγορίθμων που

επιλύουν προβλήματα μέσω λογικής συλλογιστικής και προκαθορισμένων κανόνων (Mundlamuri et al., 2025).

Καθώς η έρευνα προχωρούσε, η συμβολική προσέγγιση οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων Expert Systems. Στόχος τους ήταν να αποτυπώσουν τη γνώση εξειδικευμένων επιστημόνων μέσα από βάσεις γνώσης και κανόνες τύπου *if-then*, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων σε συγκεκριμένα γνωστικά αντικείμενα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτέλεσαν τα συστήματα DENDRAL και MYCIN, τα οποία απέδειξαν ότι ένας υπολογιστής μπορούσε να επιλύσει πολύπλοκα προβλήματα όταν διέθετε επαρκώς οργανωμένη γνώση. Παρά τη σημασία τους, τα συστήματα αυτά δεν είχαν τη δυνατότητα να μαθαίνουν από νέα δεδομένα ούτε να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Επιπλέον, η διαρκής ενημέρωση των βάσεων γνώσης απαιτούσε σημαντική ανθρώπινη παρέμβαση, γεγονός που περιόριζε σημαντικά την πρακτική αξιοποίησή τους (Mundlamuri et al., 2025).

Παρά τις αρχικές προσδοκίες, η πρόοδος της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν υπήρξε συνεχής. Η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς της εποχής, σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές αδυναμίες των πρώτων συστημάτων να αντιμετωπίσουν σύνθετα προβλήματα πραγματικών εφαρμογών, οδήγησαν σε αισθητή μείωση της χρηματοδότησης και του ερευνητικού ενδιαφέροντος. Η περίοδος αυτή είναι γνωστή ως AI Winter και χαρακτηρίζεται από σημαντική επιβράδυνση της επιστημονικής δραστηριότητας. Ωστόσο, η φάση αυτή δεν ήταν χωρίς αξία, καθώς συνέβαλε στην αναθεώρηση πολλών θεωρητικών παραδοχών και προετοίμασε το έδαφος για τις επόμενες γενιές αλγορίθμων (Mundlamuri et al., 2025).

Νέα δυναμική εμφανίστηκε όταν η έρευνα μετακινήθηκε από τα συστήματα που βασίζονταν σε προκαθορισμένους κανόνες προς προσεγγίσεις που αντλούν γνώση απευθείας από τα δεδομένα. Η μετάβαση αυτή σηματοδότησε την ανάπτυξη της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), σύμφωνα με την οποία οι αλγόριθμοι εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα, ώστε να αναγνωρίζουν πρότυπα και να πραγματοποιούν προβλέψεις, χωρίς να απαιτείται ρητός προγραμματισμός για κάθε πιθανό σενάριο. Η αλλαγή αυτή επέτρεψε την αντιμετώπιση προβλημάτων που δεν μπορούσαν να επιλυθούν αποτελεσματικά μέσω αποκλειστικά συμβολικών

προσεγγίσεων και αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε η σύγχρονη Τεχνητή Νοημοσύνη (Mundlamuri et al., 2025).

Καθοριστική ώθηση στη συνέχεια έδωσε η ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, η αξιοποίηση των επεξεργαστών γραφικών (GPUs), η εκθετική αύξηση των διαθέσιμων δεδομένων (Big Data) και η συνεχής πρόοδος των αλγορίθμων. Από τις αρχές της δεκαετίας του 2010 οι εξελίξεις αυτές οδήγησαν στη ραγδαία ανάπτυξη της Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning). Τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα απέκτησαν τη δυνατότητα να εξάγουν αυτόματα πολύπλοκα χαρακτηριστικά από τα δεδομένα, επιτυγχάνοντας εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια σε εφαρμογές όπως η αναγνώριση εικόνων, η επεξεργασία ομιλίας και η κατανόηση φυσικής γλώσσας. Ορόσημο για τη συγκεκριμένη εξέλιξη θεωρείται η επιτυχία του μοντέλου AlexNet στον διαγωνισμό ImageNet το 2012, η οποία ανέδειξε τις δυνατότητες των βαθιών νευρωνικών δικτύων και επιτάχυνε σημαντικά τη διεθνή ερευνητική δραστηριότητα (Mundlamuri et al., 2025).

Πιο πρόσφατα, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στράφηκε στις αρχιτεκτονικές Transformer, οι οποίες εισήγαγαν νέους μηχανισμούς επεξεργασίας δεδομένων μέσω της τεχνικής της αυτοπροσοχής (*self-attention*). Η εξέλιξη αυτή επέτρεψε τη δημιουργία ιδιαίτερα μεγάλων γλωσσικών μοντέλων, όπως τα BERT, GPT-3 και GPT-4, τα οποία μπορούν να κατανοούν, να παράγουν και να επεξεργάζονται φυσική γλώσσα με επίπεδο ακρίβειας που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν ανέφικτο. Παράλληλα, η ανάπτυξη της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (Generative AI) διεύρυνε σημαντικά το πεδίο εφαρμογών της AI, καθώς πλέον είναι δυνατή όχι μόνο η ανάλυση πληροφοριών αλλά και η παραγωγή νέου περιεχομένου, όπως κείμενα, εικόνες, προγραμματιστικός κώδικας και πολυμεσικό υλικό (Mundlamuri et al., 2025).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ιστορική εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στη βελτίωση των αλγορίθμων. Όπως επισημαίνουν οι Mundlamuri et al. (2025), κάθε σημαντικό τεχνολογικό άλμα συνοδεύτηκε από αντίστοιχη πρόοδο στην υπολογιστική ισχύ, στις δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων και στη διαθεσιμότητα μεγάλων συνόλων εκπαίδευσης. Αντίστοιχα, οι Abioye et al.

(2021) υπογραμμίζουν ότι η αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών ΑΙ σε κλάδους όπως οι κατασκευές κατέστη εφικτή μόνο όταν οι ψηφιακές υποδομές άρχισαν να παράγουν επαρκή και αξιόπιστα δεδομένα μέσω τεχνολογιών όπως το Building Information Modelling (BIM), οι αισθητήρες Internet of Things (IoT) και οι πλατφόρμες διαχείρισης έργων. Η πορεία της ΑΙ συνδέεται, επομένως, άμεσα με τη συνολική εξέλιξη του ψηφιακού οικοσυστήματος μέσα στο οποίο αναπτύσσεται και εφαρμόζεται.

Η ιστορική αυτή διαδρομή αποτυπώνει τη μετάβαση από συστήματα που βασίζονταν αποκλειστικά στη χειροκίνητη αναπαράσταση γνώσης σε ευφυή μοντέλα που μαθαίνουν αυτόνομα από δεδομένα και βελτιώνουν συνεχώς την απόδοσή τους. Σήμερα, η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν αποτελεί πλέον ένα περιορισμένο ερευνητικό αντικείμενο, αλλά μια τεχνολογία γενικής χρήσης με εφαρμογές σχεδόν σε κάθε τομέα της οικονομικής και κοινωνικής δραστηριότητας. Η κατανόηση των βασικών σταδίων αυτής της εξέλιξης αποτελεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την παρουσίαση των επιμέρους τεχνολογιών που συγκροτούν το σύγχρονο οικοσύστημα της ΑΙ και αναλύονται στις επόμενες υποενότητες.

2.2.2 Βασικές τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης

Η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν αποτελεί μία ενιαία τεχνολογία, αλλά ένα ευρύ επιστημονικό πεδίο που περιλαμβάνει διαφορετικές μεθόδους, αλγορίθμους και υπολογιστικές προσεγγίσεις με κοινό στόχο την ανάπτυξη συστημάτων ικανών να προσομοιώνουν ή να υποστηρίζουν ανθρώπινες γνωστικές λειτουργίες, όπως η μάθηση, η λήψη αποφάσεων, η επίλυση προβλημάτων και η αναγνώριση προτύπων. Η σύγχρονη ανάπτυξή της βασίζεται στον συνδυασμό μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, προηγμένων αλγορίθμων και ισχυρών υπολογιστικών υποδομών, γεγονός που έχει διευρύνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της σε πλήθος επιστημονικών και βιομηχανικών τομέων (Zhang & Lu, 2021).

Στο σημερινό οικοσύστημα της ΑΙ διακρίνονται ορισμένες θεμελιώδεις τεχνολογίες που λειτουργούν συμπληρωματικά και συγκροτούν τη βάση ανάπτυξης

των σύγχρονων ευφυών συστημάτων. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται τα Μεγάλα Δεδομένα (Big Data), οι αλγόριθμοι μάθησης, η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), καθώς και οι υπολογιστικές υποδομές υψηλών επιδόσεων που καθιστούν εφικτή την εκπαίδευση ιδιαίτερα σύνθετων μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης (Zhang & Lu, 2021).

Βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων AI είναι η ύπαρξη μεγάλων και αξιόπιστων συνόλων δεδομένων. Η συνεχής ψηφιοποίηση των διαδικασιών, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη αισθητήρων, συστημάτων Internet of Things (IoT), πληροφοριακών συστημάτων και ψηφιακών πλατφορμών, οδηγεί στη δημιουργία τεράστιου όγκου πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των αλγορίθμων. Η ποιότητα, η πληρότητα και η αξιοπιστία αυτών των δεδομένων επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, γεγονός που καθιστά τη διαχείρισή τους έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιτυχούς ανάπτυξης εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης (Zhang & Lu, 2021).

Πυρήνα κάθε εφαρμογής AI αποτελούν οι αλγόριθμοι. Μέσω κατάλληλων μαθηματικών και υπολογιστικών διαδικασιών, επιτρέπουν την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων, την αναγνώριση προτύπων, την πραγματοποίηση προβλέψεων και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η συνεχής πρόοδος των αλγοριθμικών τεχνικών έχει βελτιώσει αισθητά τόσο την ταχύτητα όσο και την αξιοπιστία των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης, διευρύνοντας παράλληλα το εύρος των προβλημάτων που μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά (Zhang & Lu, 2021).

Ξεχωριστή θέση στο οικοσύστημα της AI κατέχει η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning). Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει στα υπολογιστικά συστήματα να μαθαίνουν από τα διαθέσιμα δεδομένα χωρίς να απαιτείται η ρητή διατύπωση όλων των κανόνων λειτουργίας τους. Αντί να εκτελούν αποκλειστικά προκαθορισμένες εντολές, τα μοντέλα Machine Learning εντοπίζουν στατιστικά πρότυπα και βελτιώνουν σταδιακά την απόδοσή τους όσο εμπλουτίζονται με νέα δεδομένα. Η προσέγγιση αυτή έχει καταστήσει δυνατή την ανάπτυξη συστημάτων υψηλής ακρίβειας για προβλέψεις,

ταξινομήσεις και υποστήριξη σύνθετων διαδικασιών λήψης αποφάσεων (Zhang & Lu, 2021).

Επόμενο στάδιο στην εξέλιξη της Μηχανικής Μάθησης αποτέλεσε η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η οποία βασίζεται στη χρήση πολυεπίπεδων τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να εξάγουν αυτόματα πολύπλοκα χαρακτηριστικά από μεγάλους όγκους δεδομένων, χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη επιλογή των μεταβλητών. Η ανάπτυξή τους συνδέθηκε άμεσα με τη σημαντική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και ιδιαίτερα με τη χρήση εξειδικευμένων επεξεργαστών γραφικών (Graphics Processing Units – GPUs), οι οποίοι κατέστησαν δυνατή την εκπαίδευση ιδιαίτερα απαιτητικών μοντέλων. Ως αποτέλεσμα, σημειώθηκε σημαντική πρόοδος σε εφαρμογές όπως η αναγνώριση εικόνων, η ανάλυση βίντεο, η επεξεργασία ομιλίας και η αυτόματη λήψη αποφάσεων (Zhang & Lu, 2021).

Εξίσου καθοριστική είναι η συμβολή της Επεξεργασίας Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP), η οποία επιτρέπει στους υπολογιστές να αναλύουν, να κατανοούν και να επεξεργάζονται την ανθρώπινη γλώσσα. Οι εφαρμογές της εκτείνονται από την αυτόματη μετάφραση και την εξαγωγή πληροφορίας από έγγραφα έως τα συστήματα ερωταπαντήσεων, τις συνομιλιακές εφαρμογές και την επεξεργασία μεγάλου όγκου μη δομημένου κειμένου. Η πρόοδος του συγκεκριμένου τομέα αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των σύγχρονων Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs), τα οποία έχουν μεταβάλει σημαντικά τις δυνατότητες των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης (Zhang & Lu, 2021).

Αντίστοιχα, η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision) δίνει τη δυνατότητα στα συστήματα AI να αναγνωρίζουν, να αναλύουν και να ερμηνεύουν εικόνες και βίντεο με τρόπο που προσεγγίζει την ανθρώπινη όραση. Αξιοποιώντας προηγμένα νευρωνικά δίκτυα, μπορεί να υποστηρίξει λειτουργίες όπως η αναγνώριση αντικειμένων, η ανίχνευση προσώπων, η παρακολούθηση διαδικασιών και η αυτόματη επιθεώρηση εγκαταστάσεων. Για τον λόγο αυτό η τεχνολογία χρησιμοποιείται πλέον ευρέως στη βιομηχανία, στις μεταφορές, στην υγειονομική περίθαλψη και, ολοένα συχνότερα, στον κατασκευαστικό κλάδο (Zhang & Lu, 2021).

Στην πράξη, οι τεχνολογίες αυτές δεν λειτουργούν μεμονωμένα αλλά συνδυάζονται σε ολοκληρωμένα ευφυή συστήματα, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα κάθε προσέγγισης ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει την επεξεργασία τόσο δομημένων όσο και μη δομημένων δεδομένων, την παραγωγή προβλέψεων, την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων και την αυτοματοποίηση πολύπλοκων διαδικασιών. Ειδικά στον κατασκευαστικό κλάδο, η ολοένα ευρύτερη αξιοποίησή τους δημιουργεί τις προϋποθέσεις για περισσότερο ευφυή, δεδομενοκεντρικά και αυτοματοποιημένα μοντέλα διαχείρισης τεχνικών έργων, τα οποία αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στον συνεχιζόμενο ψηφιακό μετασχηματισμό της βιομηχανίας των κατασκευών (Zhang & Lu, 2021).

2.3 Ψηφιακός μετασχηματισμός της κατασκευαστικής βιομηχανίας

Ο ψηφιακός μετασχηματισμός (Digital Transformation – DT) αποτελεί σήμερα έναν από τους βασικότερους παράγοντες που αναδιαμορφώνουν τη λειτουργία της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η έννοιά του δεν περιορίζεται στην υιοθέτηση νέων ψηφιακών εργαλείων ή στην αυτοματοποίηση επιμέρους διαδικασιών. Αντίθετα, περιγράφει μια συνολική διαδικασία οργανωσιακής αλλαγής, κατά την οποία οι ψηφιακές τεχνολογίες μετασχηματίζουν τον τρόπο λειτουργίας των επιχειρήσεων, τις παραγωγικές διαδικασίες, τα επιχειρηματικά μοντέλα και τον τρόπο δημιουργίας αξίας. Υπό αυτή την οπτική, ο ψηφιακός μετασχηματισμός υπερβαίνει την απλή ψηφιοποίηση πληροφοριών και συνδέεται με βαθύτερες στρατηγικές αλλαγές που επηρεάζουν συνολικά τη λειτουργία ενός οργανισμού (Samuelson & Stehn, 2023).

Στον κατασκευαστικό κλάδο, η ανάγκη για έναν τέτοιο μετασχηματισμό είναι ιδιαίτερα έντονη. Σε σύγκριση με άλλους βιομηχανικούς τομείς, οι κατασκευές εμφανίζουν διαχρονικά χαμηλότερα επίπεδα παραγωγικότητας και βραδύτερους ρυθμούς υιοθέτησης νέων τεχνολογιών. Η ιδιαιτερότητα κάθε τεχνικού έργου, η προσωρινή φύση των εργοταξιακών οργανώσεων, η συμμετοχή πολλών διαφορετικών εμπλεκομένων και η κατακερματισμένη δομή της αγοράς δημιουργούν ένα σύνθετο περιβάλλον, μέσα στο οποίο η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών είναι συχνά δυσκολότερη σε σχέση με άλλους παραγωγικούς κλάδους (Samuelson & Stehn, 2023).

Την ίδια στιγμή, οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για βελτίωση της παραγωγικότητας, περιορισμό του κόστους, ενίσχυση της βιωσιμότητας και αποτελεσματικότερη διαχείριση των έργων καθιστούν τον ψηφιακό μετασχηματισμό στρατηγική επιλογή και όχι απλώς τεχνολογική αναβάθμιση. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η επιτυχία του δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την εισαγωγή νέων ψηφιακών εργαλείων, αλλά από την ικανότητα των οργανισμών να αναδιαμορφώσουν τις επιχειρησιακές τους διαδικασίες, τις σχέσεις συνεργασίας και τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται, διακινείται και αξιοποιείται η πληροφορία. Παράλληλα, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν η ύπαρξη σαφούς στρατηγικής, η ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων, η οργανωσιακή κουλτούρα και η δυνατότητα προσαρμογής στις συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις (Samuelson & Stehn, 2023).

Καταλυτική συμβολή στη διαδικασία αυτή έχουν οι σύγχρονες ψηφιακές τεχνολογίες. Εφαρμογές όπως το Building Information Modelling (BIM), το Internet of Things (IoT), οι Digital Twins, το Cloud Computing, τα Big Data, η ρομποτική και η Τεχνητή Νοημοσύνη διαμορφώνουν ένα ολοένα πιο διασυνδεδεμένο ψηφιακό οικοσύστημα, στο οποίο η πληροφορία παράγεται, ανταλλάσσεται και αξιοποιείται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Η πραγματική τους αξία δεν προκύπτει από τη μεμονωμένη χρήση κάθε τεχνολογίας, αλλά από τη δυνατότητα συνδυασμού τους σε ένα ενιαίο περιβάλλον που υποστηρίζει αποτελεσματικότερα τη διαχείριση των έργων και τη λήψη αποφάσεων (Samuelson & Stehn, 2023).

Παρότι οι τεχνολογικές λύσεις εξελίσσονται με ταχύ ρυθμό, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι οι σημαντικότερες δυσκολίες του ψηφιακού μετασχηματισμού δεν είναι κυρίως τεχνολογικής φύσης. Αντίθετα, συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με οργανωσιακούς παράγοντες. Η κατακερματισμένη δομή της κατασκευαστικής βιομηχανίας, η προσωρινή συνεργασία των εμπλεκομένων σε κάθε έργο, η περιορισμένη μεταφορά γνώσης από έργο σε έργο και η απουσία ενιαίων προτύπων δυσχεραίνουν την αξιοποίηση των διαθέσιμων ψηφιακών τεχνολογιών. Στους ανασταλτικούς παράγοντες προστίθενται ακόμη η αντίσταση στην αλλαγή, η έλλειψη ψηφιακών δεξιοτήτων, η περιορισμένη διαθεσιμότητα εξειδικευμένου

προσωπικού και η αβεβαιότητα σχετικά με την απόδοση των σχετικών επενδύσεων (Samuelson & Stehn, 2023).

Παρά τα εμπόδια αυτά, τα οφέλη που αποδίδονται στον ψηφιακό μετασχηματισμό είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η αύξηση της παραγωγικότητας, η βελτίωση της ποιότητας των κατασκευών, η ενίσχυση της ασφάλειας στα εργοτάξια, η αποτελεσματικότερη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκομένων, η ορθότερη διαχείριση της πληροφορίας, η μείωση των σφαλμάτων και των επαναλαμβανόμενων εργασιών, καθώς και η αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Παράλληλα, δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για περισσότερο βιώσιμες κατασκευές, καλύτερη αξιοποίηση των δεδομένων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των έργων και ουσιαστικότερη υποστήριξη της λήψης αποφάσεων τόσο σε επιχειρησιακό όσο και σε στρατηγικό επίπεδο (Samuelson & Stehn, 2023).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η άποψη των Samuelson και Stehn (2023), σύμφωνα με την οποία ο ψηφιακός μετασχηματισμός δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα αμιγώς τεχνολογικό εγχείρημα. Η επιτυχία του προϋποθέτει μια πολυδιάστατη προσέγγιση που συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία με τον οργανωσιακό μετασχηματισμό, τη στρατηγική διοίκηση, την ανάπτυξη ανθρώπινου δυναμικού και τη δημιουργία νέων μορφών συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκομένων. Με άλλα λόγια, η πραγματική προστιθέμενη αξία δεν προκύπτει από την απόκτηση νέων ψηφιακών εργαλείων, αλλά από την ικανότητα των οργανισμών να ανασχεδιάζουν τις διαδικασίες τους και να αξιοποιούν την τεχνολογία για τη δημιουργία νέας επιχειρησιακής αξίας.

Στο πλαίσιο αυτό, η Τεχνητή Νοημοσύνη καταλαμβάνει πλέον κεντρική θέση στον ψηφιακό μετασχηματισμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Αξιοποιώντας τα δεδομένα που παράγονται από τα σύγχρονα ψηφιακά οικοσυστήματα, συμβάλλει στην πρόβλεψη, στη βελτιστοποίηση διαδικασιών και στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η κατανόηση του ψηφιακού μετασχηματισμού αποτελεί, επομένως, βασική θεωρητική προϋπόθεση για την ερμηνεία του ρόλου που διαδραματίζει η ΑΙ στη διαχείριση τεχνικών έργων. Όπως θα αναλυθεί στις επόμενες ενότητες, η αποτελεσματική αξιοποίηση των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ώριμου ψηφιακού περιβάλλοντος, στο οποίο οι κατάλληλες υποδομές, τα

αξιόπιστα δεδομένα και η οργανωσιακή ετοιμότητα λειτουργούν ως αλληλένδετοι παράγοντες επιτυχούς υιοθέτησης.

2.3.1 Construction 4.0

Η έννοια του Construction 4.0 εκφράζει την προσαρμογή των αρχών της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης (Industry 4.0) στις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Σε αντίθεση με προηγούμενα στάδια τεχνολογικής εξέλιξης, τα οποία επικεντρώνονταν κυρίως στη μηχανοποίηση ή στην αυτοματοποίηση επιμέρους εργασιών, το Construction 4.0 βασίζεται στη διασύνδεση ανθρώπων, διαδικασιών, εξοπλισμού και πληροφοριακών συστημάτων μέσα σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον. Σε αυτό το περιβάλλον η πληροφορία παράγεται, ανταλλάσσεται και αξιοποιείται συνεχώς σε όλο τον κύκλο ζωής ενός τεχνικού έργου. Όπως επισημαίνουν οι Forcael et al. (2020), το Construction 4.0 δεν αποτελεί απλώς μεταφορά τεχνολογιών από τη βιομηχανική παραγωγή στις κατασκευές, αλλά ένα νέο πρότυπο οργάνωσης που συνδυάζει την ψηφιοποίηση των πληροφοριών με τον εκσυγχρονισμό των κατασκευαστικών διαδικασιών.

Η ανάγκη για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου προέκυψε από τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν τα σύγχρονα τεχνικά έργα. Η αυξημένη πολυπλοκότητα, οι αυστηροί χρονικοί και οικονομικοί περιορισμοί, οι υψηλές απαιτήσεις σε θέματα ποιότητας και βιωσιμότητας, αλλά και η συμμετοχή πολλών διαφορετικών εμπλεκομένων δημιουργούν ένα ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον διαχείρισης. Μέσα σε αυτές τις συνθήκες, οι παραδοσιακές πρακτικές, οι οποίες στηρίζονταν σε αποσπασματικά πληροφοριακά συστήματα και στην εμπειρική λήψη αποφάσεων, αποδείχθηκαν ανεπαρκείς για την αποτελεσματική αξιοποίηση του ολοένα μεγαλύτερου όγκου δεδομένων που παράγεται κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία ενός έργου.

Η εξέλιξη αυτή ανέδειξε την ανάγκη για ένα νέο μοντέλο διαχείρισης, ικανό να αξιοποιεί τις δυνατότητες των ψηφιακών τεχνολογιών προκειμένου να ενισχύσει τη συνεργασία, τη διαφάνεια και την αποδοτικότητα των έργων.

Για τον λόγο αυτό, το Construction 4.0 δεν ταυτίζεται με κάποια μεμονωμένη τεχνολογία. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό οικοσύστημα, στο οποίο διαφορετικές τεχνολογίες λειτουργούν συνδυαστικά. Σύμφωνα με τους Forcael et al. (2020), το μοντέλο αυτό στηρίζεται σε δύο βασικούς πυλώνες: την ψηφιοποίηση (digitization), που αφορά τη συλλογή, διαχείριση και αξιοποίηση των δεδομένων, και τη βιομηχανοποίηση (industrialization), η οποία περιλαμβάνει την αυτοματοποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών, τη χρήση ρομποτικών συστημάτων, προκατασκευασμένων στοιχείων και προηγμένων τεχνολογιών παραγωγής.

Στο οικοσύστημα αυτό εντάσσονται τεχνολογίες όπως το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), οι Digital Twins, το Cloud Computing, τα Big Data, η ρομποτική, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), καθώς και οι εφαρμογές επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας (AR/VR). Όλες αυτές οι τεχνολογίες λειτουργούν συμπληρωματικά, επιτρέποντας τη συνεχή συλλογή, αποθήκευση, ανταλλαγή και αξιοποίηση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Η πραγματική αξία του Construction 4.0 δεν προκύπτει από την ανεξάρτητη χρήση κάθε τεχνολογίας, αλλά από τη διασύνδεσή τους σε ένα ενιαίο περιβάλλον διαχείρισης των έργων.

Σε αυτό το ψηφιακό οικοσύστημα, η Τεχνητή Νοημοσύνη κατέχει ιδιαίτερα σημαντική θέση. Ενώ τεχνολογίες όπως το BIM και το IoT παράγουν και ενημερώνουν διαρκώς μεγάλες ποσότητες δεδομένων, η ΑΙ αναλαμβάνει να τα επεξεργαστεί, να εντοπίσει πρότυπα, να προβλέψει πιθανές αποκλίσεις και να υποστηρίξει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Έτσι, η διαχείριση των τεχνικών έργων μεταβαίνει σταδιακά από μια αντιδραστική λογική, όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται μετά την εμφάνιση ενός προβλήματος, σε μια περισσότερο προγνωστική και προληπτική προσέγγιση που επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση κινδύνων και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών πριν εκδηλωθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή του Construction 4.0 δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές δυνατότητες. Απαιτείται παράλληλα η αναδιοργάνωση των επιχειρησιακών διαδικασιών, η ανάπτυξη νέων ψηφιακών δεξιοτήτων, η ενίσχυση της

συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκομένων και η καλλιέργεια μιας οργανωσιακής κουλτούρας που βασίζεται στη συστηματική αξιοποίηση των δεδομένων. Με άλλα λόγια, ο ψηφιακός μετασχηματισμός συνιστά ταυτόχρονα τεχνολογική και οργανωσιακή πρόκληση.

Παράλληλα, η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση του Construction 4.0. Η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων, οι αυξημένες απαιτήσεις κυβερνοασφάλειας, η απουσία κοινών προτύπων, αλλά και η ανάγκη συνεχούς ανάπτυξης νέων ψηφιακών δεξιοτήτων εξακολουθούν να αποτελούν βασικούς περιοριστικούς παράγοντες για την εφαρμογή του (Forcael et al., 2020).

Συνεπώς, το Construction 4.0 αποτελεί το τεχνολογικό και οργανωσιακό υπόβαθρο πάνω στο οποίο αναπτύσσονται οι σύγχρονες εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης στις κατασκευές. Η κατανόηση των τεχνολογιών που συγκροτούν αυτό το οικοσύστημα είναι απαραίτητη για να ερμηνευθεί ο τρόπος με τον οποίο η ΑΙ ενσωματώνεται στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων και συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσής τους. Όπως προκύπτει από τη σχετική βιβλιογραφία, το Construction 4.0 δεν αποτελεί έναν τελικό στόχο, αλλά μια διαρκή διαδικασία τεχνολογικής και οργανωσιακής εξέλιξης, η οποία αναμένεται να συνεχίσει να μεταβάλλει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, υλοποιούνται και διαχειρίζονται τα τεχνικά έργα τα επόμενα χρόνια (Forcael et al., 2020). Στην επόμενη υποενότητα εξετάζεται το Building Information Modeling (BIM), μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες του Construction 4.0 και βασικός πυλώνας του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας.

2.3.2 Building Information Modeling (BIM)

Το Building Information Modeling (BIM) συγκαταλέγεται στις σημαντικότερες τεχνολογικές καινοτομίες που εισήχθησαν τα τελευταία χρόνια στον κατασκευαστικό κλάδο και θεωρείται βασικός άξονας του ψηφιακού μετασχηματισμού της βιομηχανίας των κατασκευών. Όπως προκύπτει από τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Kaur et al. (2025), το BIM έχει εξελιχθεί από ένα εργαλείο τρισδιάστατης

μοντελοποίησης σε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία διαχείρισης πληροφοριών, η οποία υποστηρίζει όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός τεχνικού έργου, από τον αρχικό σχεδιασμό έως τη λειτουργία και τη συντήρησή του. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού, που βασίζονταν κυρίως σε δισδιάστατα σχέδια και κατακερματισμένη διαχείριση πληροφοριών, το BIM προσφέρει ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον μέσα στο οποίο συγκεντρώνονται, οργανώνονται και διαχειρίζονται όλα τα δεδομένα που αφορούν το έργο (Kaur et al., 2025).

Η αξία του BIM δεν περιορίζεται στην τρισδιάστατη απεικόνιση των κατασκευών. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης γεωμετρικών, τεχνικών, λειτουργικών, χρονικών και οικονομικών πληροφοριών σε ένα κοινό πληροφοριακό μοντέλο. Κάθε στοιχείο συνοδεύεται από δομημένα δεδομένα που περιγράφουν τις ιδιότητές του και τις σχέσεις του με τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής. Έτσι, το BIM λειτουργεί ως κοινή βάση δεδομένων, διευκολύνοντας την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων και ενισχύοντας τη συνεργασία σε όλη τη διάρκεια του έργου. Σύμφωνα με τους Kaur et al. (2025), η προσέγγιση αυτή συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των σφαλμάτων, στη βελτίωση του συντονισμού των μελετών και στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των κατασκευαστικών διαδικασιών.

Καθώς η τεχνολογία εξελισσόταν, οι δυνατότητες του BIM επεκτάθηκαν σημαντικά πέρα από την τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Εκτός από το 3D BIM, το οποίο αποτυπώνει τη γεωμετρία του έργου, αναπτύχθηκαν το 4D BIM, όπου το μοντέλο συνδέεται με το χρονοδιάγραμμα των εργασιών, και το 5D BIM, που ενσωματώνει δεδομένα κόστους και ποσοτήτων. Αντίστοιχα, τα επίπεδα 6D και 7D BIM εμπλουτίζουν το μοντέλο με πληροφορίες σχετικές με τη βιωσιμότητα, την ενεργειακή απόδοση, τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων. Οι επεκτάσεις αυτές καταδεικνύουν ότι το BIM έχει εξελιχθεί σε ένα πολυδιάστατο εργαλείο που υποστηρίζει συνολικά τη διαχείριση των τεχνικών έργων (Kaur et al., 2025).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά το BIM και για την ανάπτυξη εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι αλγόριθμοι ΑΙ απαιτούν μεγάλα σύνολα αξιόπιστων και καλά

οργανωμένων δεδομένων προκειμένου να εκπαιδευτούν, να αναγνωρίσουν πρότυπα και να παράγουν αξιόπιστες προβλέψεις. Το BIM προσφέρει ακριβώς αυτό το πληροφοριακό υπόβαθρο, μετατρέποντας το ψηφιακό μοντέλο του έργου σε μια δυναμική πηγή δεδομένων, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί από εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης, Βαθιάς Μάθησης και άλλες τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης.

Οι δυνατότητες αυτές ενισχύονται ακόμη περισσότερο όταν το BIM συνδυάζεται με άλλες τεχνολογίες του οικοσυστήματος του Construction 4.0, όπως το Internet of Things (IoT), οι Digital Twins, οι πλατφόρμες Cloud Computing και τα Big Data. Η συνεχής τροφοδότηση του ψηφιακού μοντέλου με δεδομένα πραγματικού χρόνου από αισθητήρες, συστήματα παρακολούθησης και εργοταξιακές εφαρμογές μετατρέπει το BIM από ένα στατικό εργαλείο σχεδιασμού σε μια δυναμική πλατφόρμα διαχείρισης πληροφοριών. Έτσι καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της προόδου των εργασιών, η έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων, η αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων και η συνεχής αξιολόγηση της απόδοσης του έργου. Όπως επισημαίνουν οι Kaur et al. (2025), η ολοένα στενότερη διασύνδεση του BIM με τις υπόλοιπες ψηφιακές τεχνολογίες αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τάσεις του σύγχρονου ψηφιακού μετασχηματισμού των κατασκευών.

Η ενσωμάτωση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης στο περιβάλλον BIM διευρύνει ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες του συστήματος. Τα δεδομένα του ψηφιακού μοντέλου μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόβλεψη καθυστερήσεων, την εκτίμηση του κόστους, την αξιολόγηση κινδύνων, την αυτόματη ανίχνευση συγκρούσεων (clash detection), τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των εργασιών και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνικών Υπολογιστικής Όρασης και Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης επιτρέπει την αυτοματοποιημένη ενημέρωση των μοντέλων, την παραγωγή τεχνικής τεκμηρίωσης και τη διαχείριση μεγάλου όγκου πληροφοριών με σημαντικά μικρότερη ανθρώπινη παρέμβαση.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει, η εφαρμογή του BIM εξακολουθεί να συνοδεύεται από προκλήσεις. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση των Kaur et al. (2025) επισημαίνει ότι η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών λογισμικών, η ετερογένεια των μορφών δεδομένων, το υψηλό αρχικό κόστος

εφαρμογής, η ανάγκη εξειδικευμένης εκπαίδευσης του προσωπικού και η αντίσταση στην οργανωσιακή αλλαγή εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικά εμπόδια για την ευρύτερη υιοθέτησή του. Παράλληλα, η ποιότητα και η πληρότητα των πληροφοριών που περιλαμβάνονται στα μοντέλα BIM επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης που βασίζονται σε αυτά, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της σωστής διαχείρισης των δεδομένων ήδη από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού.

Στο σύγχρονο περιβάλλον των κατασκευών, επομένως, το Building Information Modeling δεν αποτελεί απλώς ένα προηγμένο εργαλείο ψηφιακού σχεδιασμού. Αποτελεί τη βασική πληροφοριακή υποδομή πάνω στην οποία αναπτύσσονται οι περισσότερες εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Όπως καταλήγουν οι Kaur et al. (2025), η συνεχής εξέλιξη του BIM και η ολοένα στενότερη διασύνδεσή του με τεχνολογίες όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη, το Internet of Things και οι Digital Twins αναμένεται να διαμορφώσουν το επόμενο στάδιο του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η δυνατότητα δημιουργίας ενός ενιαίου, αξιόπιστου και διαρκώς ενημερωμένου ψηφιακού περιβάλλοντος καθιστά το BIM βασικό καταλύτη για την υλοποίηση των αρχών του Construction 4.0 και για την ανάπτυξη περισσότερο ευφυών, συνεργατικών και δεδομενοκεντρικών συστημάτων διαχείρισης τεχνικών έργων.

2.3.3 Internet of Things (IoT)

Το Internet of Things (IoT) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες που υποστηρίζουν το οικοσύστημα του Construction 4.0, καθώς καθιστά δυνατή τη συνεχή συλλογή, ανταλλαγή και αξιοποίηση δεδομένων από φυσικές συσκευές, αισθητήρες και μηχανήματα που λειτουργούν στο περιβάλλον ενός τεχνικού έργου. Σύμφωνα με τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al. (2022), το IoT μπορεί να οριστεί ως ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αντικειμένων με δυνατότητα αναγνώρισης, επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών μέσω του διαδικτύου, επιτρέποντας την παρακολούθηση και τον έλεγχο πραγματικών συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας διαρκής

σύνδεσμος μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού περιβάλλοντος, ο οποίος αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη περισσότερο ευφυών και αυτοματοποιημένων μοντέλων διαχείρισης έργων.

Η λειτουργία του IoT βασίζεται στη συνεργασία πολλών τεχνολογικών επιπέδων. Αισθητήρες, συσκευές συλλογής δεδομένων, δίκτυα επικοινωνίας, υπολογιστικές πλατφόρμες και εφαρμογές ανάλυσης πληροφοριών λειτουργούν συνδυαστικά, ώστε να καταγράφουν και να επεξεργάζονται δεδομένα που σχετίζονται με τη λειτουργία του εξοπλισμού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τη θέση υλικών και μηχανημάτων ή ακόμη και τη δραστηριότητα των εργαζομένων. Τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται σε πληροφοριακά συστήματα, όπου αποθηκεύονται και αξιοποιούνται για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Όπως επισημαίνουν οι Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al. (2022), η συνεχής ροή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί το IoT από τις παραδοσιακές μεθόδους παρακολούθησης των τεχνικών έργων.

Τα τελευταία χρόνια, οι εφαρμογές του Internet of Things στον κατασκευαστικό κλάδο έχουν διευρυνθεί σημαντικά. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι οι τεχνολογίες IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της προόδου των εργασιών, τη διαχείριση εξοπλισμού και μηχανημάτων, τον εντοπισμό υλικών, τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών στο εργοτάξιο, τη διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά και την ενίσχυση της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων μέσω συστημάτων συνεχούς επιτήρησης. Η αξιοποίηση αισθητήρων, τεχνολογιών RFID, συσκευών GPS και ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) επιτρέπει την αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία, περιορίζοντας παράλληλα την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al., 2022).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στενή σχέση του IoT με το Building Information Modeling (BIM). Σύμφωνα με τους Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al. (2022), το BIM λειτουργεί ως το βασικό πληροφοριακό μοντέλο του έργου, ενώ το IoT το εμπλουτίζει διαρκώς με δεδομένα που συλλέγονται από το εργοτάξιο σε πραγματικό χρόνο. Η αλληλεπίδραση των δύο τεχνολογιών επιτρέπει τη συνεχή ενημέρωση του

ψηφιακού μοντέλου, τη σύγκριση της πραγματικής εξέλιξης του έργου με τον αρχικό σχεδιασμό και την έγκαιρη αναγνώριση πιθανών αποκλίσεων. Έτσι, το BIM παύει να αποτελεί μια στατική βάση δεδομένων και εξελίσσεται σε ένα δυναμικό σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης του έργου.

Η συνεργασία αυτή αποτελεί και τη βάση για την ανάπτυξη των Digital Twins, τα οποία αντιπροσωπεύουν την επόμενη γενιά ψηφιακών συστημάτων διαχείρισης τεχνικών έργων. Στην περίπτωση αυτή, το IoT αναλαμβάνει τη συνεχή συλλογή δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον, το BIM παρέχει το πληροφοριακό μοντέλο του έργου και το Digital Twin λειτουργεί ως μια δυναμική ψηφιακή αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος, η οποία ενημερώνεται διαρκώς μέσω των δεδομένων των αισθητήρων. Η στενή συνεργασία των τριών τεχνολογιών δημιουργεί τις προϋποθέσεις για συνεχή παρακολούθηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al., 2022).

Η σημασία του IoT γίνεται ακόμη μεγαλύτερη όταν συνδυάζεται με εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης. Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που παράγεται από αισθητήρες και έξυπνες συσκευές αποτελεί την απαραίτητη βάση για την ανάπτυξη αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης και Βαθιάς Μάθησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να αναγνωρίζουν πρότυπα λειτουργίας, να προβλέπουν πιθανές αστοχίες εξοπλισμού, να εντοπίζουν κινδύνους για την ασφάλεια των εργαζομένων, να βελτιστοποιούν τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων και να υποστηρίζουν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις. Όπως αναδεικνύεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al. (2022), η πραγματική αξία του IoT δεν βρίσκεται μόνο στη συλλογή πληροφοριών, αλλά κυρίως στην ικανότητα αξιοποίησής τους μέσω προηγμένων τεχνικών ανάλυσης και εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητές του, το IoT εξακολουθεί να αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις ως προς την ευρεία εφαρμογή του στις κατασκευές. Ζητήματα όπως η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και πλατφορμών, η ασφάλεια και η προστασία των δεδομένων, η διαχείριση του ιδιαίτερα μεγάλου όγκου πληροφοριών που παράγεται, αλλά και η ανάγκη υιοθέτησης κοινών προτύπων επικοινωνίας εξακολουθούν να αποτελούν βασικά εμπόδια. Επιπλέον, η επιτυχής

αξιοποίηση της τεχνολογίας απαιτεί επενδύσεις σε ψηφιακές υποδομές, οργανωσιακές προσαρμογές και ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων από το ανθρώπινο δυναμικό, γεγονός που καθιστά την υιοθέτησή της όχι μόνο τεχνολογική αλλά και διοικητική πρόκληση (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al., 2022).

Επομένως, το Internet of Things αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις τεχνολογίες του Construction 4.0, καθώς διασυνδέει σε πραγματικό χρόνο το φυσικό και το ψηφιακό περιβάλλον των τεχνικών έργων. Η ολοένα στενότερη ενσωμάτωσή του με το BIM, τα Digital Twins και τις εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης διαμορφώνει ένα νέο μοντέλο ευφυούς διαχείρισης, στο οποίο οι αποφάσεις βασίζονται σε συνεχή ροή δεδομένων, προγνωστική ανάλυση και προηγμένα συστήματα υποστήριξης της διοίκησης. Όπως καταλήγουν οι Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al. (2022), η εξέλιξη αυτή αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους σημαντικότερους μοχλούς του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας τα επόμενα χρόνια.

2.3.4 Digital Twins

Τα Digital Twins (Ψηφιακά Δίδυμα) αποτελούν μία από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες του οικοσυστήματος του Construction 4.0 και σηματοδοτούν τη μετάβαση από τη στατική ψηφιακή αναπαράσταση ενός έργου σε ένα δυναμικό πληροφοριακό σύστημα που ενημερώνεται διαρκώς με δεδομένα πραγματικού χρόνου. Σύμφωνα με τους Sacks et al. (2020), ένα Digital Twin δεν περιορίζεται σε ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο, αλλά συνιστά ένα ολοκληρωμένο πληροφοριακό σύστημα το οποίο διατηρεί συνεχή σύνδεση με το φυσικό έργο, επιτρέποντας την αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού περιβάλλοντος. Έτσι, το ψηφιακό μοντέλο εξελίσσεται παράλληλα με το πραγματικό έργο, αποτυπώνοντας διαρκώς την πραγματική του κατάσταση.

Στη διεθνή βιβλιογραφία επισημαίνεται συχνά ότι το Building Information Modeling (BIM) και τα Digital Twins συγχέονται, παρότι πρόκειται για δύο διαφορετικές έννοιες. Όπως εξηγούν οι Sacks et al. (2020), το BIM αποτελεί τη βασική

πληροφοριακή υποδομή ενός έργου, στην οποία καταγράφονται τα γεωμετρικά, τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του. Το Digital Twin, αντίθετα, αξιοποιεί το μοντέλο BIM ως αφετηρία και το εμπλουτίζει συνεχώς με δεδομένα που προέρχονται από αισθητήρες, συστήματα Internet of Things (IoT), εργοταξιακό εξοπλισμό και άλλες ψηφιακές πηγές. Με άλλα λόγια, ενώ το BIM περιγράφει το έργο όπως έχει σχεδιαστεί, το Digital Twin αποτυπώνει την πραγματική του λειτουργία και την εξέλιξή του σε πραγματικό χρόνο.

Η λειτουργία ενός Digital Twin στηρίζεται στη συνεχή ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στο φυσικό έργο και το ψηφιακό του αντίγραφο. Δεδομένα που αφορούν τη λειτουργία του εξοπλισμού, την πρόοδο των εργασιών, τις περιβαλλοντικές συνθήκες ή την κατάσταση των κατασκευαστικών στοιχείων συλλέγονται μέσω αισθητήρων και μεταφέρονται στο ψηφιακό μοντέλο, όπου αναλύονται και αξιοποιούνται για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Όπως επισημαίνουν οι Sacks et al. (2020), η συνεχής αυτή ανατροφοδότηση μετατρέπει το Digital Twin σε ένα «ζωντανό» πληροφοριακό σύστημα, το οποίο εξελίσσεται ταυτόχρονα με το πραγματικό έργο.

Η αξία των Digital Twins δεν περιορίζεται στην παρακολούθηση της υφιστάμενης κατάστασης ενός έργου. Αντίθετα, υποστηρίζουν έναν διαρκή κύκλο συλλογής δεδομένων, ανάλυσης, αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων. Οι Sacks et al. (2020) συνδέουν τη λειτουργία αυτή με τον κύκλο συνεχούς βελτίωσης Plan–Do–Check–Act (PDCA), κατά τον οποίο τα δεδομένα που συλλέγονται από το φυσικό έργο αξιοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης, τον εντοπισμό αποκλίσεων και τον σχεδιασμό διορθωτικών παρεμβάσεων. Κατά συνέπεια, το Digital Twin λειτουργεί όχι μόνο ως εργαλείο παρακολούθησης αλλά και ως μηχανισμός συνεχούς βελτίωσης των διαδικασιών διαχείρισης.

Η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας αυτής αυξάνεται σημαντικά όταν συνδυάζεται με εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης. Τα δεδομένα που παράγονται διαρκώς από αισθητήρες και συστήματα IoT αποκτούν ουσιαστική αξία όταν αναλύονται από αλγορίθμους Μηχανικής Μάθησης και άλλες τεχνικές AI, οι οποίοι μπορούν να αναγνωρίζουν πρότυπα λειτουργίας, να προβλέπουν πιθανές αστοχίες, να εντοπίζουν αποκλίσεις από τον προγραμματισμό και να υποστηρίζουν περισσότερο

τεκμηριωμένες αποφάσεις. Όπως επισημαίνουν οι Sacks et al. (2020), η Τεχνητή Νοημοσύνη είναι εκείνη που μετατρέπει τον μεγάλο όγκο των διαθέσιμων δεδομένων σε αξιοποιήσιμη γνώση για τη διοίκηση των έργων.

Η αξιοποίηση των Digital Twins δεν περιορίζεται σε μία μόνο φάση του κύκλου ζωής ενός έργου. Αντίθετα, η τεχνολογία εφαρμόζεται από τον σχεδιασμό και την κατασκευή έως τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η συνεχής παρακολούθηση της προόδου, η αξιολόγηση της απόδοσης των υποδομών, η διαχείριση του εξοπλισμού, η πρόβλεψη αναγκών συντήρησης και η βελτιστοποίηση της συνολικής λειτουργίας του έργου. Η προσέγγιση αυτή σηματοδοτεί μια διαφορετική φιλοσοφία διαχείρισης, όπου οι αποφάσεις βασίζονται σε συνεχή ροή αξιόπιστων δεδομένων και όχι αποκλειστικά στην εμπειρία των στελεχών (Sacks et al., 2020).

Παρά τις σημαντικές δυνατότητές τους, τα Digital Twins εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν ορισμένες προκλήσεις ως προς την ευρεία εφαρμογή τους. Ζητήματα όπως η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων, η διασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων, η ανάγκη υιοθέτησης κοινών προτύπων ανταλλαγής πληροφοριών, η κυβερνοασφάλεια και οι οργανωσιακές αλλαγές που απαιτούνται για την ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών εξακολουθούν να αποτελούν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας. Επιπλέον, οι Sacks et al. (2020) τονίζουν ότι η επιτυχής ανάπτυξη ενός Digital Twin προϋποθέτει στενή συνεργασία μεταξύ μηχανικών, ειδικών πληροφορικής, επιστημόνων δεδομένων και στελεχών διοίκησης έργων, γεγονός που αναδεικνύει τον έντονα διεπιστημονικό χαρακτήρα της τεχνολογίας.

Συνεπώς, τα Digital Twins αντιπροσωπεύουν το επόμενο στάδιο του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας, συνδυάζοντας σε ένα ενιαίο πληροφοριακό οικοσύστημα τις δυνατότητες του BIM, του Internet of Things και της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού περιβάλλοντος δημιουργεί νέες δυνατότητες για προγνωστική διαχείριση, βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών και λήψη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων. Όπως καταλήγουν οι Sacks et al. (2020), τα Digital Twins

αναμένεται να διαδραματίσουν πρωταγωνιστικό ρόλο στη διαμόρφωση περισσότερο ευφυών, διασυνδεδεμένων και δεδομενοκεντρικών μοντέλων διαχείρισης τεχνικών έργων.

2.3.5 Big Data

Η ραγδαία ψηφιοποίηση της κατασκευαστικής βιομηχανίας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ολοένα και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός τεχνικού έργου. Πληροφορίες προέρχονται πλέον από συστήματα Building Information Modeling (BIM), αισθητήρες Internet of Things (IoT), μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), σαρωτές laser, λογισμικά διαχείρισης έργων, συστήματα παρακολούθησης εργοταξίων και πολλές ακόμη ψηφιακές εφαρμογές. Μέσα σε αυτό το περιβάλλον, τα Big Data αναδεικνύονται σε βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης και την υποστήριξη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων στη διαχείριση κατασκευαστικών έργων (Munawar et al., 2022).

Παρότι η διαθεσιμότητα δεδομένων έχει αυξηθεί θεαματικά τα τελευταία χρόνια, η αξιοποίησή τους στον κατασκευαστικό κλάδο εξακολουθεί να υπολείπεται άλλων βιομηχανικών τομέων. Όπως επισημαίνουν οι Munawar et al. (2022), τεχνολογίες όπως το CAD και κυρίως το BIM παράγουν τεράστιες ποσότητες πληροφοριών, όμως η ουσιαστική αξιοποίησή τους συχνά δυσχεραίνεται από την ετερογένεια των δεδομένων, τη δυσκολία ενοποίησης πληροφοριών που προέρχονται από διαφορετικά συστήματα και την απουσία ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης δεδομένων.

Η αξία των Big Data δεν εξαρτάται μόνο από τη συλλογή των πληροφοριών αλλά και από τη δυνατότητα αποτελεσματικής αποθήκευσης, επεξεργασίας και ανάλυσής τους. Στο πλαίσιο αυτό, οι Munawar et al. (2022) παρουσιάζουν την έννοια του Big Data Engineering (BDE), η οποία περιλαμβάνει τεχνολογίες επεξεργασίας μεγάλων δεδομένων, όπως τα MapReduce και Directed Acyclic Graph (DAG), κατανομημένα συστήματα αποθήκευσης, βάσεις δεδομένων NoSQL και προηγμένες μεθόδους ανάλυσης. Παράλληλα, τεχνικές όπως η στατιστική ανάλυση, η εξόρυξη δεδομένων (data mining), οι μέθοδοι παλινδρόμησης και οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

αποτελούν βασικά εργαλεία για τη μετατροπή των μεγάλων όγκων πληροφοριών σε αξιοποιήσιμη γνώση.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στα χαρακτηριστικά των Big Data, τα οποία είναι γνωστά στη βιβλιογραφία ως 10Vs. Σύμφωνα με τους Munawar et al. (2022), τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν τον όγκο (Volume), την ταχύτητα παραγωγής (Velocity), την ποικιλία μορφών (Variety), την αξιοπιστία (Veracity), την αξία (Value), τη μεταβλητότητα (Variability), την εγκυρότητα (Validity), τη διάρκεια ζωής των δεδομένων (Volatility), την ασφάλεια και προστασία (Vulnerability) και την οπτικοποίηση (Visualization). Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπει στους οργανισμούς να οργανώνουν αποτελεσματικότερα τη διαχείριση των δεδομένων και να αντιμετωπίζουν τις τεχνικές και οργανωσιακές προκλήσεις που προκύπτουν από τον συνεχώς αυξανόμενο όγκο πληροφοριών.

Στα τεχνικά έργα, τα Big Data εμφανίζονται με πολλές και διαφορετικές μορφές. Εκτός από αριθμητικά δεδομένα, περιλαμβάνουν τεχνικά σχέδια, τρισδιάστατα μοντέλα, φωτογραφίες, βίντεο, αναφορές προόδου και δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες και έξυπνες συσκευές. Η πολυμορφία αυτή δημιουργεί σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση του προγραμματισμού, της παρακολούθησης της προόδου, της διαχείρισης των πόρων και της λήψης αποφάσεων. Ταυτόχρονα, όμως, καθιστά αναγκαία τη χρήση προηγμένων τεχνικών ενοποίησης και οπτικοποίησης, ώστε οι πληροφορίες να μετατρέπονται σε χρήσιμη γνώση για τα στελέχη που διαχειρίζονται τα έργα (Munawar et al., 2022).

Εξίσου κρίσιμη είναι και η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων. Οι Munawar et al. (2022) επισημαίνουν ότι η αξιοπιστία (Veracity) και η εγκυρότητα (Validity) αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την επιτυχή αξιοποίηση των Big Data στις κατασκευές. Ο μεγάλος όγκος πληροφοριών δεν εγγυάται από μόνος του αξιόπιστα αποτελέσματα· αντίθετα, απαιτείται συστηματικός έλεγχος της ποιότητας των πηγών, κατάλληλη επεξεργασία και καθαρισμός των δεδομένων πριν αυτά χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα πρόβλεψης ή σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων.

Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει επίσης σημαντικές προοπτικές για τη μελλοντική αξιοποίηση των Big Data στον κατασκευαστικό τομέα. Μεταξύ των

σημαντικότερων εφαρμογών περιλαμβάνονται η πρόβλεψη κινδύνων και ατυχημάτων, η βελτίωση της ασφάλειας των εργοταξίων, η αποτελεσματικότερη οργάνωση των εργοταξιακών δραστηριοτήτων, η προγνωστική συντήρηση υποδομών, η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς, η μείωση των κατασκευαστικών αποβλήτων και η συνολική βελτίωση της ποιότητας και της αποδοτικότητας των έργων μέσω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης. Όπως καταλήγουν οι Munawar et al. (2022), η αποτελεσματική αξιοποίηση των Big Data αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους βασικότερους μοχλούς του ψηφιακού μετασχηματισμού της διαχείρισης κατασκευαστικών έργων τα επόμενα χρόνια.

2.3.6 Cloud Computing

Το Cloud Computing (Υπολογιστικό Νέφος) αποτελεί μία από τις τεχνολογίες που έχουν συμβάλει καθοριστικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό των επιχειρήσεων, αλλάζοντας τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύονται, διαχειρίζονται και αξιοποιούνται οι υπολογιστικοί πόροι. Στον κατασκευαστικό κλάδο, όπου καθημερινά παράγεται μεγάλος όγκος ετερογενών δεδομένων από όλες τις φάσεις ενός έργου, το Cloud Computing προσφέρει ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον συνεργασίας, μέσα στο οποίο οι πληροφορίες μπορούν να αποθηκεύονται, να επεξεργάζονται και να διαμοιράζονται σε πραγματικό χρόνο μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων μερών (Bello et al., 2021).

Σύμφωνα με τον ορισμό του National Institute of Standards and Technology (NIST), τον οποίο παραθέτουν οι Bello et al. (2021), το Cloud Computing αποτελεί ένα μοντέλο παροχής υπηρεσιών που επιτρέπει την κατ' απαίτηση πρόσβαση, μέσω δικτύου, σε ένα κοινό σύνολο παραμετροποιήσιμων υπολογιστικών πόρων, όπως διακομιστές, αποθηκευτικός χώρος, εφαρμογές και υπηρεσίες. Οι πόροι αυτοί μπορούν να διατίθενται ή να αποδεσμεύονται γρήγορα, με ελάχιστη διαχειριστική παρέμβαση. Η προσέγγιση αυτή δίνει στις επιχειρήσεις τη δυνατότητα να αξιοποιούν σημαντική υπολογιστική ισχύ χωρίς να απαιτούνται μεγάλες επενδύσεις σε φυσικές υποδομές, περιορίζοντας παράλληλα το κόστος συντήρησης των πληροφοριακών τους συστημάτων.

Η αποτελεσματικότητα του Cloud Computing στηρίζεται σε ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που το διαφοροποιούν από τις παραδοσιακές υπολογιστικές υποδομές. Όπως αναφέρουν οι Bello et al. (2021), η ευρεία δικτυακή πρόσβαση (broad network access) επιτρέπει τη χρήση των υπηρεσιών από διαφορετικές τοποθεσίες και συσκευές, διευκολύνοντας τη συνεργασία των ομάδων έργου. Η κοινή δεξαμενή υπολογιστικών πόρων (resource pooling) δίνει τη δυνατότητα σε πολλούς χρήστες να αξιοποιούν την ίδια υποδομή με ασφαλή τρόπο, ενώ η ταχεία επεκτασιμότητα (rapid elasticity) επιτρέπει την άμεση προσαρμογή των διαθέσιμων πόρων ανάλογα με τις ανάγκες κάθε έργου. Επιπλέον, η αυτοεξυπηρέτηση κατ' απαίτηση (on-demand self-service) επιτρέπει την ενεργοποίηση υπηρεσιών χωρίς παρέμβαση του παρόχου και το μοντέλο χρέωσης βάσει χρήσης (measured service ή pay-as-you-go) εξασφαλίζει ότι οι οργανισμοί πληρώνουν μόνο για τους πόρους που πραγματικά χρησιμοποιούν. Τα χαρακτηριστικά αυτά προσφέρουν ιδιαίτερη ευελιξία στις κατασκευαστικές επιχειρήσεις, των οποίων οι απαιτήσεις μεταβάλλονται συνεχώς κατά την εξέλιξη ενός έργου.

Η αρχιτεκτονική του Cloud Computing οργανώνεται γύρω από τρία βασικά μοντέλα παροχής υπηρεσιών. Το Infrastructure as a Service (IaaS) προσφέρει εικονικούς διακομιστές και αποθηκευτικό χώρο, επιτρέποντας την αξιοποίηση υπολογιστικών πόρων χωρίς επένδυση σε φυσικό εξοπλισμό. Το Platform as a Service (PaaS) παρέχει περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών και διευκολύνει την ενσωμάτωση δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές ενός έργου. Τέλος, το Software as a Service (SaaS) αφορά εφαρμογές που διατίθενται μέσω διαδικτύου με συνδρομητικό μοντέλο, όπως τα BIM 360, Primavera, Procore και Oracle Financials, μειώνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος απόκτησης, εγκατάστασης και συντήρησης λογισμικού (Bello et al., 2021).

Πέρα από τα μοντέλα υπηρεσιών, οι υποδομές Cloud μπορούν να υλοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε οργανισμού. Οι Bello et al. (2021) διακρίνουν τέσσερα βασικά μοντέλα ανάπτυξης: το Public Cloud, το Private Cloud, το Community Cloud και το Hybrid Cloud. Το δημόσιο νέφος χρησιμοποιείται κυρίως από μικρομεσαίες επιχειρήσεις, καθώς παρέχει οικονομική πρόσβαση σε

κοινόχρηστες υποδομές μέσω του διαδικτύου. Το ιδιωτικό νέφος επιλέγεται όταν απαιτούνται υψηλά επίπεδα ασφάλειας και προστασίας ευαίσθητων πληροφοριών, ενώ το κοινοτικό νέφος επιτρέπει την κοινή αξιοποίηση υποδομών από οργανισμούς με κοινές ανάγκες. Το υβριδικό μοντέλο συνδυάζει στοιχεία διαφορετικών προσεγγίσεων, διατηρώντας κρίσιμα δεδομένα σε ιδιωτικό περιβάλλον και μεταφέροντας λιγότερο ευαίσθητες εφαρμογές στο δημόσιο νέφος. Η ευελιξία αυτή το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για σύνθετα κατασκευαστικά έργα με διαφορετικές απαιτήσεις ασφάλειας και συνεργασίας.

Στον κατασκευαστικό κλάδο, τα σημαντικότερα οφέλη του Cloud Computing σχετίζονται με τη μείωση του κόστους και την ευκολότερη πρόσβαση σε προηγμένες υπολογιστικές δυνατότητες. Όπως επισημαίνουν οι Bello et al. (2021), τα περιορισμένα περιθώρια κέρδους που χαρακτηρίζουν πολλές κατασκευαστικές επιχειρήσεις δυσχεραίνουν την επένδυση σε δαπανηρές πληροφοριακές υποδομές. Μέσω του μοντέλου pay-as-you-go, ακόμη και μικρότεροι οργανισμοί μπορούν να αξιοποιήσουν σύγχρονες υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους, περιορίζοντας τόσο το αρχικό κόστος εγκατάστασης όσο και τις λειτουργικές δαπάνες. Παράλληλα, η δυνατότητα δυναμικής κλιμάκωσης των υπολογιστικών πόρων επιτρέπει την προσαρμογή της διαθέσιμης ισχύος στις πραγματικές απαιτήσεις κάθε έργου.

Εξίσου σημαντική είναι η συμβολή του Cloud Computing στη βελτίωση της συνεργασίας και της διαχείρισης της πληροφορίας. Οι σύγχρονοι πάροχοι υπηρεσιών Cloud εφαρμόζουν προηγμένους μηχανισμούς κυβερνοασφάλειας, κρυπτογράφησης και διασφάλισης της διαθεσιμότητας των δεδομένων, παρέχοντας επίπεδα προστασίας που είναι δύσκολο να επιτευχθούν από μεμονωμένες επιχειρήσεις. Παράλληλα, η δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων πληροφοριών καθιστά εφικτή τη διαχείριση δεδομένων που προέρχονται από μοντέλα BIM, αισθητήρες IoT, εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας και τρισδιάστατες σαρώσεις. Το σημαντικότερο, όμως, πλεονέκτημα είναι ότι όλα τα μέλη της ομάδας έργου έχουν πρόσβαση στην ίδια, συνεχώς ενημερωμένη πληροφορία, γεγονός που περιορίζει τα σφάλματα συντονισμού και διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Bello et al. (2021), η οποία βασίστηκε στην εξέταση 92 επιστημονικών δημοσιεύσεων, καταδεικνύει ότι το Cloud Computing υπερβαίνει τον ρόλο μιας απλής τεχνολογίας αποθήκευσης δεδομένων. Αντίθετα, λειτουργεί ως θεμελιώδης υποδομή που επιτρέπει την αξιοποίηση άλλων ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), η Εικονική και Επαυξημένη Πραγματικότητα (VR/AR), οι κινητές εφαρμογές και τα Big Data. Οι εφαρμογές του εντοπίζονται στη διαχείριση έργων, στην παρακολούθηση της προόδου, στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στην υγεία και ασφάλεια, στη διαχείριση της ενέργειας, στη μείωση των κατασκευαστικών αποβλήτων και στη βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Κατά συνέπεια, το Cloud Computing αποτελεί βασικό πυλώνα του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας και θεμελιώδη υποδομή για την ανάπτυξη και την αποτελεσματική αξιοποίηση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

2.3.7 Ο ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης στο ψηφιακό οικοσύστημα

Η μετάβαση της κατασκευαστικής βιομηχανίας στην ψηφιακή εποχή δεν στηρίζεται πλέον στην υιοθέτηση μεμονωμένων τεχνολογιών, αλλά στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού οικοσυστήματος, μέσα στο οποίο διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις συνεργάζονται για την υποστήριξη όλων των φάσεων του κύκλου ζωής ενός έργου. Σε αυτό το περιβάλλον, η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς μετατρέπει τον μεγάλο όγκο των διαθέσιμων δεδομένων σε αξιοποιήσιμη γνώση, υποστηρίζοντας τη λήψη αποφάσεων, την αυτοματοποίηση διαδικασιών και τη δυναμική διαχείριση των κατασκευαστικών έργων (Berlato et al., 2025).

Η μεταβολή αυτή αποτυπώνεται και στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Μέσα από τη συστηματική ανασκόπηση 125 επιστημονικών δημοσιεύσεων, οι Berlato et al. (2025) υποστηρίζουν ότι ο τομέας των Architecture, Engineering and Construction (AEC) εγκαταλείπει σταδιακά την αποσπασματική αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων και προσανατολίζεται στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων ψηφιακών πλατφορμών, οι οποίες

λειτουργούν ως κοινωνικοτεχνικά οικοσυστήματα (socio-technical ecosystems). Οι πλατφόρμες αυτές ενοποιούν δεδομένα, τεχνολογίες, διαδικασίες και εμπλεκόμενους φορείς, δημιουργώντας ένα ενιαίο περιβάλλον συνεχούς ανταλλαγής πληροφοριών και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων σε όλα τα στάδια του έργου.

Μέσα σε αυτό το ψηφιακό οικοσύστημα, η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν αποτελεί μία ακόμη επιμέρους τεχνολογία αλλά τον «νοητικό πυρήνα» που αξιοποιεί τα δεδομένα τα οποία παράγουν οι υπόλοιπες ψηφιακές υποδομές. Τεχνολογίες όπως το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), τα Digital Twins, τα συστήματα GIS και οι υπηρεσίες Cloud Computing εξασφαλίζουν τη συλλογή, την αποθήκευση και τη διαχείριση τεράστιων ποσοτήτων πληροφοριών. Η AI αναλαμβάνει στη συνέχεια να επεξεργαστεί αυτά τα δεδομένα, να αναγνωρίσει πρότυπα, να πραγματοποιήσει προβλέψεις και να υποστηρίξει περισσότερο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των έργων (Berlato et al., 2025).

Η λειτουργία αυτή διαφοροποιεί ουσιαστικά την Τεχνητή Νοημοσύνη από τις υπόλοιπες τεχνολογίες του Construction 4.0. Το BIM οργανώνει τις πληροφορίες που περιγράφουν το έργο, το IoT συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες και εξοπλισμό πεδίου, ενώ τα Digital Twins αποτυπώνουν διαρκώς την πραγματική κατάσταση των υποδομών. Η πραγματική αξιοποίηση, όμως, αυτού του πληροφοριακού πλούτου επιτυγχάνεται μόνο όταν εφαρμόζονται αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι μπορούν να εντοπίζουν συσχετίσεις, να προβλέπουν μελλοντικές εξελίξεις και να υποστηρίζουν τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων (Abioye et al., 2021· Berlato et al., 2025).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ψηφιακές πλατφόρμες που έχουν σχεδιαστεί εξ αρχής με δυνατότητες τεχνητής νοημοσύνης (AI-enabled digital platforms). Σύμφωνα με τους Berlato et al. (2025), στις πλατφόρμες αυτές η AI δεν λειτουργεί ως συμπληρωματική εφαρμογή αλλά αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της αρχιτεκτονικής τους. Μέσω τεχνικών όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), τα νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks) και η προγνωστική ανάλυση (Predictive Analytics), οι πλατφόρμες αυτές μπορούν να υποστηρίξουν τον

σχεδιασμό, τη διαχείριση κινδύνων, την κατανομή πόρων, την παρακολούθηση της προόδου και τη συνολική βελτιστοποίηση της απόδοσης των έργων.

Η συμβολή της ΑΙ είναι ιδιαίτερα εμφανής και στον τομέα της υγείας και ασφάλειας. Η αξιοποίηση τεχνικών Υπολογιστικής Όρασης (Computer Vision) σε συνδυασμό με αλγορίθμους βαθιάς μάθησης επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση των εργοταξίων, την αυτόματη αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων και την έγκαιρη ειδοποίηση των υπευθύνων πριν εκδηλωθούν ατυχήματα. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η συμμόρφωση με τους κανόνες ασφάλειας και μειώνεται ο κίνδυνος εργατικών ατυχημάτων (Berlato et al., 2025). Αντίστοιχα, οι Abioye et al. (2021) επισημαίνουν ότι η διαχείριση κινδύνων και η υγεία και ασφάλεια συγκαταλέγονται στα πλέον ώριμα και επιτυχημένα πεδία εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης στις κατασκευές.

Εκτός από την ασφάλεια, η ΑΙ συμβάλλει ουσιαστικά και στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων, ενισχύοντας παράλληλα τη βιωσιμότητα των έργων. Οι Berlato et al. (2025) αναφέρουν ότι οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να υποστηρίξουν τη βελτιστοποίηση της χρήσης υλικών, τη μείωση των κατασκευαστικών αποβλήτων, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας. Παράλληλα, διευκολύνουν τον συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη διαχείριση και αξιοποίηση της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο.

Παρά τις σημαντικές προοπτικές που δημιουργεί η Τεχνητή Νοημοσύνη, η αξιοποίησή της εξακολουθεί να επηρεάζεται από διαρθρωτικές αδυναμίες του κατασκευαστικού κλάδου. Οι Berlato et al. (2025) επισημαίνουν ότι ο κατακερματισμός των δεδομένων (data fragmentation), η περιορισμένη διαλειτουργικότητα (interoperability) μεταξύ διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων, οι απομονωμένες οργανωτικές δομές (organizational silos) και η σχετικά χαμηλή ψηφιακή ωριμότητα πολλών επιχειρήσεων εξακολουθούν να αποτελούν βασικά εμπόδια για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων ψηφιακών οικοσυστημάτων. Παρόμοια είναι και τα συμπεράσματα των Regona et al. (2022), σύμφωνα με τους οποίους η σημαντικότερη πρόκληση για την εφαρμογή της ΑΙ δεν αφορά τους ίδιους

τους αλγορίθμους, αλλά τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων και επαρκών δεδομένων σε έναν ιδιαίτερα κατακερματισμένο κλάδο όπως οι κατασκευές.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι η περαιτέρω εξέλιξη του ψηφιακού οικοσυστήματος δεν θα εξαρτηθεί αποκλειστικά από την ανάπτυξη ισχυρότερων αλγορίθμων. Εξίσου σημαντική είναι η δημιουργία ολοκληρωμένων, διαλειτουργικών και ανθρωποκεντρικών ψηφιακών πλατφορμών, ικανών να υποστηρίξουν τη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων. Οι Berlato et al. (2025) εκτιμούν ότι οι πλατφόρμες αυτές θα βασίζονται σε τυποποιημένες οντολογίες δεδομένων, Explainable AI, Federated Learning, Large Language Models (LLMs) και συμμετοχικά μοντέλα διακυβέρνησης, ώστε να παρέχουν διαφανή, αξιόπιστη και αποτελεσματική υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής των τεχνικών έργων.

Συνοψίζοντας, η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί τον βασικό παράγοντα που επιτρέπει τη μετάβαση από την απλή ψηφιοποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών στη δημιουργία ευφυών, διασυνδεδεμένων και συνεργατικών ψηφιακών οικοσυστημάτων. Η συνεισφορά της υπερβαίνει την αυτοματοποίηση επιμέρους εργασιών, καθώς επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιοποίηση της γνώσης που παράγεται από όλα τα πληροφοριακά συστήματα του έργου, συμβάλλοντας στη βελτίωση της παραγωγικότητας, της ασφάλειας, της βιωσιμότητας και της συνολικής αποτελεσματικότητας της διαχείρισης κατασκευαστικών έργων (Abioye et al., 2021· Regona et al., 2022· Berlato et al., 2025).

2.4 Η διαχείριση τεχνικών έργων (Construction Project Management)

Η διαχείριση τεχνικών έργων (Construction Project Management – CPM) αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις τομείς της κατασκευαστικής βιομηχανίας, καθώς καλύπτει το σύνολο των διαδικασιών που απαιτούνται για τον σχεδιασμό, την οργάνωση, την υλοποίηση και την ολοκλήρωση ενός έργου. Η συνεχής αύξηση της πολυπλοκότητας των σύγχρονων κατασκευών, η συμμετοχή πολλών εμπλεκόμενων φορέων (stakeholders), οι αυστηρές απαιτήσεις ως προς το κόστος, τον χρόνο, την ποιότητα

και τη βιωσιμότητα, αλλά και η ταχύτατη τεχνολογική εξέλιξη, έχουν αναδείξει τη συστηματική διοίκηση έργων σε καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας (Iheme Mary Jane, 2025).

Μέσα από τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση 92 επιστημονικών δημοσιεύσεων και επαγγελματικών αναφορών της περιόδου 2010–2025, η Iheme Mary Jane (2025) ορίζει τη διαχείριση τεχνικών έργων ως την εφαρμογή γνώσεων, δεξιοτήτων, εργαλείων και τεχνικών για τον σχεδιασμό, την οργάνωση, την εκτέλεση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός έργου, με σκοπό την επίτευξη των προκαθορισμένων στόχων του. Η προσέγγιση αυτή υπερβαίνει τη στενή έννοια της επίβλεψης της κατασκευής, καθώς περιλαμβάνει τον συντονισμό ανθρώπινων, οικονομικών, τεχνικών και πληροφοριακών πόρων, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών και συχνά αντικρουόμενων απαιτήσεων του έργου.

Παραδοσιακά, η επιτυχία ενός τεχνικού έργου αξιολογούνταν με βάση τους τρεις βασικούς περιορισμούς της διοίκησης έργων (Project Management Triple Constraint): τον χρόνο ολοκλήρωσης, το κόστος και την ποιότητα ή τεχνική απόδοση. Σήμερα, ωστόσο, η αξιολόγηση έχει αποκτήσει ευρύτερη διάσταση. Η σύγχρονη βιβλιογραφία επισημαίνει ότι παράγοντες όπως η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνων, η ικανοποίηση των ενδιαφερόμενων μερών, η υγεία και η ασφάλεια, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα και η δημιουργία μακροχρόνιας αξίας αποτελούν πλέον εξίσου σημαντικά κριτήρια επιτυχίας ενός έργου (Iheme Mary Jane, 2025).

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, η διοίκηση ενός τεχνικού έργου στηρίζεται σε ένα σύνολο αλληλένδετων λειτουργιών. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο προγραμματισμός και η χρονοδρομολόγηση των εργασιών (planning and scheduling), η διαχείριση κόστους (cost management), η διαχείριση κινδύνων (risk management), η διασφάλιση ποιότητας (quality management), η διαχείριση της επικοινωνίας (communication management) και ο συντονισμός των ενδιαφερόμενων μερών (stakeholder management). Οι λειτουργίες αυτές δεν εφαρμόζονται μεμονωμένα, αλλά αλληλεπιδρούν συνεχώς κατά τη διάρκεια του έργου, γεγονός που απαιτεί διαρκή παρακολούθηση, αξιολόγηση και αναπροσαρμογή των αποφάσεων. Όπως επισημαίνεται στη σχετική ανασκόπηση, η ολοκληρωμένη εφαρμογή όλων των

γνωστικών αυτών πεδίων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει τα σύγχρονα κατασκευαστικά έργα (Iheme Mary Jane, 2025).

Ξεχωριστή θέση στη διοίκηση έργων κατέχει ο προγραμματισμός, καθώς αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία οργανώνονται όλες οι υπόλοιπες δραστηριότητες. Για τη σύνταξη και την παρακολούθηση των χρονοδιαγραμμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως εργαλεία όπως η Critical Path Method (CPM), τα διαγράμματα Gantt, το Primavera P6 και το Microsoft Project. Παράλληλα, τεχνικές όπως η Earned Value Management (EVM) επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση του κόστους και της προόδου του έργου, διευκολύνοντας τον έγκαιρο εντοπισμό αποκλίσεων μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής εξέλιξης και την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών πριν αυτές αποκτήσουν κρίσιμο χαρακτήρα (Iheme Mary Jane, 2025).

Εξίσου σημαντική είναι η διαχείριση κινδύνων, δεδομένου ότι τα τεχνικά έργα αναπτύσσονται σε ένα περιβάλλον όπου η αβεβαιότητα αποτελεί αναπόσπαστο χαρακτηριστικό. Μεταβολές στις τιμές των υλικών, καθυστερήσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα, δυσμενείς καιρικές συνθήκες, αλλαγές στον σχεδιασμό ή νέες κανονιστικές απαιτήσεις μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την εξέλιξη ενός έργου. Για τον λόγο αυτό, η έγκαιρη αναγνώριση, αξιολόγηση και αντιμετώπιση των πιθανών κινδύνων αποτελεί βασική ευθύνη της ομάδας διοίκησης. Η χρήση εργαλείων όπως τα risk registers και οι προσομοιώσεις Monte Carlo συμβάλλει στην ανάπτυξη περισσότερο προληπτικών στρατηγικών διαχείρισης της αβεβαιότητας (Iheme Mary Jane, 2025).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών έχουν μεταβάλει σημαντικά και τον τρόπο άσκησης του Construction Project Management. Σύγχρονες ψηφιακές τεχνολογίες, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) και τα συστήματα ανάλυσης δεδομένων, υποστηρίζουν πλέον κρίσιμες λειτουργίες της διοίκησης έργων. Μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη καθυστερήσεων, η εκτίμηση κόστους, η παρακολούθηση της προόδου, η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων και η υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Η αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών σηματοδοτεί τη μετάβαση από παραδοσιακές, κυρίως

αντιδραστικές, πρακτικές διαχείρισης σε περισσότερο προγνωστικά και δεδομενοκεντρικά μοντέλα διοίκησης, τα οποία βασίζονται στην ανάλυση πληροφοριών πραγματικού χρόνου και σε προηγμένες μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων (Iheme Mary Jane, 2025).

Παράλληλα, η διαχείριση τεχνικών έργων καλείται να ανταποκριθεί σε μια σειρά από προκλήσεις που υπερβαίνουν τις καθαρά τεχνικές διαστάσεις της κατασκευής. Η συνεχής μεταβολή του φυσικού αντικειμένου των έργων (scope creep), η έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού, οι ολοένα αυστηρότερες απαιτήσεις κανονιστικής συμμόρφωσης και οι δυσκολίες ενσωμάτωσης νέων ψηφιακών τεχνολογιών αυξάνουν την πολυπλοκότητα του σύγχρονου περιβάλλοντος έργων. Οι συνθήκες αυτές αναδεικνύουν την ανάγκη για περισσότερο ευέλικτα, προσαρμοστικά και τεχνολογικά υποστηριζόμενα μοντέλα διοίκησης, ικανά να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις (Iheme Mary Jane, 2025).

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι το Construction Project Management έχει εξελιχθεί σε έναν πολυδιάστατο επιστημονικό κλάδο, ο οποίος συνδυάζει διοικητικές αρχές, τεχνική γνώση και σύγχρονες ψηφιακές τεχνολογίες για την αποτελεσματική υλοποίηση σύνθετων τεχνικών έργων. Η επιτυχής διοίκηση δεν περιορίζεται πλέον στον έλεγχο του χρόνου και του κόστους, αλλά περιλαμβάνει τη στρατηγική λήψη αποφάσεων, την αξιοποίηση δεδομένων και τη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών. Μέσα σε αυτό το εξελισσόμενο πλαίσιο, η Τεχνητή Νοημοσύνη αποκτά ολοένα σημαντικότερο ρόλο ως εργαλείο υποστήριξης της διοίκησης έργων, θέμα που αναλύεται στις επόμενες ενότητες της παρούσας εργασίας.

2.4.1 Βασικές λειτουργίες της διαχείρισης έργων

Η επιτυχής διαχείριση ενός τεχνικού έργου προϋποθέτει τον συντονισμό ενός μεγάλου αριθμού αλληλοεξαρτώμενων διαδικασιών, οι οποίες εκτείνονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου, από τον αρχικό σχεδιασμό έως την ολοκλήρωση και την παράδοσή του. Οι διαδικασίες αυτές συγκροτούν τις βασικές λειτουργίες της

διοίκησης έργων και αποτελούν το πλαίσιο μέσα στο οποίο οργανώνονται, παρακολουθούνται και ελέγχονται όλες οι δραστηριότητες που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων του έργου. Η ορθή εφαρμογή τους συμβάλλει στη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, στον περιορισμό της αβεβαιότητας και στη διασφάλιση της επιτυχούς έκβασης του έργου.

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Chen et al. (2023) βασίζεται στις Project Management Knowledge Areas (PMKAs), όπως αυτές περιγράφονται στον οδηγό Project Management Body of Knowledge (PMBOK). Οι γνωστικές αυτές περιοχές συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διοίκησης, το οποίο καλύπτει τόσο τις τεχνικές όσο και τις οργανωσιακές διαστάσεις ενός έργου. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι καμία από τις επιμέρους λειτουργίες δεν δρα ανεξάρτητα· αντίθετα, όλες αλληλοσυμπληρώνονται και λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα, του οποίου η συνολική αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τον σωστό συντονισμό όλων των επιμέρους στοιχείων.

Κεντρική θέση στο πλαίσιο αυτό κατέχει η διαχείριση ολοκλήρωσης του έργου (Project Integration Management). Η συγκεκριμένη λειτουργία διασφαλίζει ότι όλες οι διαδικασίες του έργου παραμένουν συντονισμένες και ευθυγραμμισμένες με τους συνολικούς στόχους. Περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, την εκπόνηση του σχεδίου διαχείρισης, την παρακολούθηση της προόδου, τον έλεγχο των αλλαγών και τον συντονισμό των επιμέρους γνωστικών περιοχών. Όπως επισημαίνουν οι Chen et al. (2023), η διαχείριση ολοκλήρωσης αποτελεί τον βασικό μηχανισμό που συνδέει όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες της διοίκησης έργων.

Εξίσου καθοριστική είναι η διαχείριση του φυσικού αντικείμενου του έργου (Project Scope Management), η οποία εξασφαλίζει ότι το έργο περιλαμβάνει μόνο τις εργασίες που απαιτούνται για την επίτευξη των συμφωνημένων στόχων. Η σαφής οριοθέτηση του αντικείμενου συμβάλλει στον περιορισμό του φαινομένου του *scope creep*, δηλαδή της ανεξέλεγκτης επέκτασης του αντικείμενου του έργου, η οποία αποτελεί μία από τις συνηθέστερες αιτίες υπερβάσεων κόστους και καθυστερήσεων στα κατασκευαστικά έργα.

Αναπόσπαστο στοιχείο της διοίκησης έργων αποτελεί επίσης η διαχείριση του χρονοδιαγράμματος (Project Schedule Management). Η λειτουργία αυτή αφορά τον προγραμματισμό, την αλληλουχία, την παρακολούθηση και τον έλεγχο των δραστηριοτήτων, ώστε το έργο να ολοκληρωθεί εντός των προκαθορισμένων χρονικών ορίων. Η αποτελεσματική διαχείριση του χρόνου επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα, τη διαθεσιμότητα των πόρων και τη συνολική απόδοση του έργου. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιούνται εργαλεία όπως τα διαγράμματα Gantt, η Critical Path Method (CPM) και εξειδικευμένα λογισμικά προγραμματισμού, τα οποία διευκολύνουν την παρακολούθηση της προόδου και την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων (Chen et al., 2023).

Παράλληλα, η διαχείριση κόστους (Project Cost Management) επικεντρώνεται στον προγραμματισμό, την εκτίμηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο των οικονομικών πόρων του έργου. Στόχος της είναι η διατήρηση των συνολικών δαπανών εντός του εγκεκριμένου προϋπολογισμού, καθώς και η υποστήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Σύμφωνα με τους Chen et al. (2023), η αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων, όπως το Building Information Modeling (BIM), ενισχύει σημαντικά την ακρίβεια των οικονομικών εκτιμήσεων και διευκολύνει τον συνεχή οικονομικό έλεγχο καθ' όλη τη διάρκεια του έργου.

Η διαχείριση ποιότητας (Project Quality Management) διασφαλίζει ότι τα παραδοτέα ανταποκρίνονται στις τεχνικές προδιαγραφές, στις συμβατικές απαιτήσεις και στα ισχύοντα πρότυπα. Η συστηματική εφαρμογή διαδικασιών ποιοτικού ελέγχου περιορίζει τις αστοχίες, μειώνει την ανάγκη επανεκτέλεσης εργασιών και συμβάλλει στη συνολική βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του έργου.

Αντίστοιχα, η διαχείριση πόρων (Project Resource Management) αφορά τον σχεδιασμό και τη βέλτιστη αξιοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού, του εξοπλισμού, των μηχανημάτων και των υλικών που απαιτούνται για την εκτέλεση των εργασιών. Η αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων επηρεάζει άμεσα τόσο τη διάρκεια όσο και το κόστος του έργου, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διατήρηση υψηλού επιπέδου παραγωγικότητας και ασφαλών συνθηκών εργασίας.

Ιδιαίτερα κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει και η διαχείριση επικοινωνίας (Project Communication Management). Η ομαλή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων μερών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον αποτελεσματικό συντονισμό του έργου. Όπως επισημαίνουν οι Chen et al. (2023), η ανεπαρκής επικοινωνία συγκαταλέγεται στις συχνότερες αιτίες λαθών, καθυστερήσεων και συγκρούσεων κατά την εκτέλεση των έργων. Η αξιοποίηση του BIM και άλλων ψηφιακών πλατφορμών διευκολύνει τη διαχείριση της πληροφορίας και ενισχύει τη συνεργασία μεταξύ των συμμετεχόντων.

Σημαντική θέση μεταξύ των γνωστικών περιοχών κατέχει επίσης η διαχείριση κινδύνων (Project Risk Management). Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει τον συστηματικό εντοπισμό, την αξιολόγηση και την αντιμετώπιση γεγονότων που ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την εξέλιξη του έργου. Δεδομένου ότι τα τεχνικά έργα υλοποιούνται σε περιβάλλον υψηλής αβεβαιότητας, η προληπτική διαχείριση των κινδύνων συμβάλλει στον περιορισμό των επιπτώσεων από καθυστερήσεις, τεχνικές αστοχίες, οικονομικές αποκλίσεις και εξωτερικούς παράγοντες.

Στενά συνδεδεμένη με την επιτυχή υλοποίηση των εργασιών είναι και η διαχείριση προμηθειών (Project Procurement Management). Η συγκεκριμένη λειτουργία αφορά τον προγραμματισμό, την ανάθεση, την προμήθεια και τον έλεγχο όλων των αγαθών και υπηρεσιών που απαιτούνται για την εκτέλεση του έργου. Η έγκαιρη διαθεσιμότητα υλικών, εξοπλισμού και εξωτερικών υπηρεσιών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την απρόσκοπτη εξέλιξη των εργασιών, ιδιαίτερα σε μεγάλα και σύνθετα κατασκευαστικά έργα.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη διαχείριση των ενδιαφερόμενων μερών (Project Stakeholder Management), η οποία επικεντρώνεται στον εντοπισμό, την κατανόηση και την αποτελεσματική διαχείριση των αναγκών όλων όσων επηρεάζουν ή επηρεάζονται από το έργο, όπως ο κύριος του έργου, οι μελετητές, οι εργολάβοι, οι προμηθευτές, οι δημόσιες αρχές και οι τελικοί χρήστες. Σύμφωνα με τους Chen et al. (2023), η ενεργός συμμετοχή και η αποτελεσματική συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την ομαλή λήψη αποφάσεων και την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου.

Οι λειτουργίες αυτές δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητες διοικητικές διαδικασίες. Αντίθετα, συγκροτούν ένα ολοκληρωμένο και αλληλένδετο σύστημα, στο οποίο κάθε γνωστική περιοχή επηρεάζει και υποστηρίζει τις υπόλοιπες. Η αποτελεσματικότητα του Construction Project Management, όπως επισημαίνουν οι Chen et al. (2023), εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σωστό συντονισμό όλων αυτών των λειτουργιών και από την αξιοποίηση σύγχρονων ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το Building Information Modeling (BIM), οι οποίες διευκολύνουν τη συλλογή, τη διαχείριση και την αξιοποίηση της πληροφορίας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του έργου. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την ολοένα μεγαλύτερη ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στις επιμέρους λειτουργίες της διοίκησης έργων, ζήτημα που εξετάζεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

2.4.2 Κύκλος ζωής τεχνικού έργου

Ο κύκλος ζωής ενός τεχνικού έργου (Construction Project Life Cycle) αποτελεί το βασικό πλαίσιο μέσα στο οποίο οργανώνονται και εξελίσσονται όλες οι δραστηριότητες που απαιτούνται για την υλοποίησή του. Περιγράφει τη διαδοχική πορεία του έργου, από τη διαμόρφωση της αρχικής ιδέας έως την ολοκλήρωση και την παράδοσή του στον κύριο του έργου, προσδιορίζοντας τις επιμέρους φάσεις, τις διαδικασίες που υλοποιούνται σε καθεμία από αυτές, τους εμπλεκόμενους φορείς και τα αντίστοιχα παραδοτέα. Η κατανόηση του κύκλου ζωής είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς διευκολύνει την ορθολογική κατανομή των πόρων, την παρακολούθηση της προόδου, τη διαχείριση των κινδύνων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε όλη τη διάρκεια του έργου.

Σύμφωνα με το Project Management Institute (PMI, 2021), κάθε έργο εξελίσσεται μέσα από μια αλληλουχία διακριτών φάσεων, οι οποίες εκτείνονται από την έναρξη έως την ολοκλήρωσή του. Παρότι η ορολογία και η διάρθρωση αυτών των φάσεων μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με το πρότυπο ή τον οργανισμό που εφαρμόζεται, η βασική λογική παραμένει κοινή. Όπως επισημαίνουν οι Wang και Chen

(2023), οι περισσότερες προσεγγίσεις συγκλίνουν σε τέσσερις κύριες φάσεις: την έναρξη (Starting), την προετοιμασία και τον σχεδιασμό (Preparing), την εκτέλεση (Carrying Out) και την ολοκλήρωση (Ending). Προσαρμόζοντας το γενικό αυτό μοντέλο στα κατασκευαστικά έργα, οι συγγραφείς το συσχετίζουν με το RIBA Plan of Work, το οποίο αναλύει τον κύκλο ζωής σε επιμέρους στάδια που καλύπτουν την προετοιμασία, τον σχεδιασμό, τον τεχνικό συντονισμό, την κατασκευή και την παράδοση του έργου.

Η πρώτη φάση αφορά την έναρξη του έργου και τη διαμόρφωση του βασικού πλαισίου υλοποίησής του. Σε αυτό το στάδιο εξετάζεται η σκοπιμότητα της επένδυσης, προσδιορίζονται οι επιχειρησιακές ανάγκες, καθορίζονται οι βασικοί στόχοι και αναγνωρίζονται τα ενδιαφερόμενα μέρη (stakeholders). Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αρχικές απαιτήσεις του κυρίου του έργου και τίθενται οι γενικές προδιαγραφές που θα καθοδηγήσουν την εξέλιξη των επόμενων φάσεων. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται κατά την έναρξη έχουν στρατηγικό χαρακτήρα και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συνολική πορεία του έργου.

Μετά την έναρξη ακολουθεί η φάση της προετοιμασίας και του σχεδιασμού, κατά την οποία εξειδικεύεται το φυσικό αντικείμενο και οργανώνεται η συνολική στρατηγική υλοποίησης. Στο στάδιο αυτό εκπονούνται οι απαιτούμενες μελέτες, αναπτύσσονται τα τεχνικά σχέδια, καταρτίζονται τα χρονοδιαγράμματα, πραγματοποιούνται οι εκτιμήσεις κόστους και εντοπίζονται οι βασικοί κίνδυνοι του έργου. Παράλληλα, καθορίζονται οι στρατηγικές προμηθειών και συμβάσεων που θα εφαρμοστούν κατά την κατασκευή. Σύμφωνα με τους Wang και Chen (2023), η συγκεκριμένη φάση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς οι περισσότερες αποφάσεις που λαμβάνονται σε αυτό το στάδιο επηρεάζουν καθοριστικά το τελικό κόστος, τη διάρκεια και την ποιότητα του έργου. Επιπλέον, κατά τη διάρκειά της αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό το Building Information Modeling (BIM) για την ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων και τον αποτελεσματικό συντονισμό των μελετών.

Το μεγαλύτερο μέρος των διαθέσιμων πόρων καταναλώνεται στη φάση της εκτέλεσης και της κατασκευής. Πρόκειται για το στάδιο κατά το οποίο υλοποιούνται οι εργασίες που έχουν προβλεφθεί στον σχεδιασμό, πραγματοποιούνται οι προμήθειες,

κινητοποιούνται το προσωπικό και ο εξοπλισμός και κατασκευάζονται τα επιμέρους στοιχεία του έργου. Παράλληλα, εφαρμόζονται διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου, παρακολουθείται συνεχώς η πρόοδος των εργασιών και αξιολογείται η τήρηση του χρονοδιαγράμματος, του προϋπολογισμού και των απαιτήσεων ασφάλειας. Καθ' όλη τη διάρκεια της φάσης αυτής απαιτείται επίσης αποτελεσματική διαχείριση των αλλαγών και των αποκλίσεων που ενδέχεται να προκύψουν. Η επιτυχία της κατασκευής εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα της προετοιμασίας που έχει προηγηθεί, αλλά και από την ικανότητα συνεχούς ενημέρωσης και αξιοποίησης των πληροφοριών που υποστηρίζουν τη διοίκηση του έργου.

Με την ολοκλήρωση των κατασκευαστικών εργασιών το έργο εισέρχεται στην τελική του φάση, η οποία περιλαμβάνει τους τελικούς ελέγχους, τις δοκιμές λειτουργίας, την αποκατάσταση τυχόν εκκρεμοτήτων και την παράδοση των παραδοτέων στον κύριο του έργου. Στο στάδιο αυτό ολοκληρώνεται επίσης η οικονομική τακτοποίηση των συμβατικών υποχρεώσεων, παραδίδεται η απαραίτητη τεχνική τεκμηρίωση και καταγράφεται η εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την υλοποίηση του έργου, ώστε να αξιοποιηθεί σε μελλοντικές εφαρμογές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και η λειτουργία και η συντήρηση των εγκαταστάσεων αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του συνολικού κύκλου ζωής ενός κατασκευασμένου έργου (Building Life Cycle), από την οπτική του Construction Project Management ο κύκλος ζωής ολοκληρώνεται με την παράδοση του έργου στον κύριο του έργου. Όπως διευκρινίζουν οι Wang και Chen (2023), οι δραστηριότητες που ακολουθούν, όπως η λειτουργία, η συντήρηση ή η μελλοντική ανακατασκευή των εγκαταστάσεων, εντάσσονται στο πεδίο της διαχείρισης λειτουργίας (Operation Management) και δεν αποτελούν μέρος της συμβατικής διοίκησης του κατασκευαστικού έργου.

Η σύγχρονη αντίληψη για τον κύκλο ζωής των τεχνικών έργων διαφοροποιείται αισθητά από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις, καθώς δεν αντιμετωπίζει τις επιμέρους φάσεις ως ανεξάρτητα και απομονωμένα στάδια. Αντίθετα, δίνεται έμφαση στη συνεχή ροή πληροφοριών μεταξύ όλων των φάσεων, έτσι ώστε οι αποφάσεις που λαμβάνονται στα αρχικά στάδια να υποστηρίζονται από δεδομένα που εμπλουτίζονται διαρκώς κατά την εξέλιξη του έργου. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η συνεχής βελτίωση

του σχεδιασμού, της παρακολούθησης και του ελέγχου των εργασιών. Όπως υποστηρίζουν οι Wang και Chen (2023), η ουσιαστική συμβολή του ψηφιακού μετασχηματισμού έγκειται ακριβώς στη δυνατότητα διατήρησης και αξιοποίησης της πληροφορίας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου, ενισχύοντας τη συνεργασία μεταξύ όλων των εμπλεκομένων.

Η προσέγγιση αυτή υποστηρίζεται από την ολοένα μεγαλύτερη ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT) και η Τεχνητή Νοημοσύνη. Το BIM λειτουργεί ως η βασική πληροφοριακή υποδομή που συγκεντρώνει και οργανώνει τα δεδομένα κάθε φάσης, ενώ οι υπόλοιπες τεχνολογίες εμπλουτίζουν συνεχώς το πληροφοριακό αυτό περιβάλλον με νέα δεδομένα και δυνατότητες ανάλυσης. Μέσω της αξιοποίησης των πληροφοριών αυτών, εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να προβλέπουν πιθανές αποκλίσεις, να υποστηρίζουν τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών και να διευκολύνουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Κατά συνέπεια, ο κύκλος ζωής ενός τεχνικού έργου δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως μια απλή ακολουθία διαδοχικών σταδίων, αλλά ως ένα δυναμικό και διασυνδεδεμένο σύστημα διαχείρισης, το οποίο αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη των σύγχρονων εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.

2.4.3 Λήψη αποφάσεων στη διαχείριση έργων

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων, καθώς επηρεάζει άμεσα την επιτυχή υλοποίηση κάθε φάσης του κύκλου ζωής ενός έργου. Από τον αρχικό σχεδιασμό και την επιλογή των κατάλληλων τεχνικών λύσεων έως τη διαχείριση κινδύνων, την κατανομή των πόρων και τον έλεγχο της προόδου, οι διαχειριστές έργων καλούνται καθημερινά να λαμβάνουν αποφάσεις σε συνθήκες πολυπλοκότητας, αβεβαιότητας και, συχνά, περιορισμένης πληροφόρησης. Η ποιότητα των αποφάσεων αυτών επηρεάζει άμεσα τον χρόνο ολοκλήρωσης, το συνολικό κόστος, την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος και, τελικά, την επιτυχία του έργου.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, η λήψη αποφάσεων ορίζεται ως η διαδικασία επιλογής της καταλληλότερης εναλλακτικής λύσης μεταξύ πολλών πιθανών επιλογών, βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων αξιολόγησης. Όπως αναφέρουν οι Sundarrajan και Prabakaran (2023), η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του προβλήματος, τη διαμόρφωση εναλλακτικών λύσεων, την αξιολόγηση των πιθανών συνεπειών κάθε επιλογής και, τελικά, την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Στα κατασκευαστικά έργα, ωστόσο, η διαδικασία αυτή καθίσταται ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς επηρεάζεται από παράγοντες όπως η αβεβαιότητα, ο κίνδυνος, οι μεταβαλλόμενες συνθήκες του έργου και η περιορισμένη διαθεσιμότητα αξιόπιστων πληροφοριών.

Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται κυρίως στον πολυκριτηριακό χαρακτήρα των τεχνικών έργων. Στην πράξη, κάθε σημαντική απόφαση πρέπει να συνεκτιμά ταυτόχρονα τεχνικές, οικονομικές, χρονικές, περιβαλλοντικές και οργανωσιακές παραμέτρους, οι οποίες συχνά οδηγούν σε αντικρουόμενες απαιτήσεις. Για παράδειγμα, μία επιλογή που μειώνει το κόστος μπορεί να αυξήσει τον χρόνο ολοκλήρωσης ή να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του έργου. Κατά συνέπεια, οι διαχειριστές έργων καλούνται να σταθμίζουν συνεχώς τους απαραίτητους συμβιβασμούς (trade-offs), επιδιώκοντας τη συνολική βελτιστοποίηση της απόδοσης του έργου (Sundarrajan & Prabakaran, 2023).

Μέσα σε αυτό το σύνθετο περιβάλλον, ιδιαίτερη σημασία έχουν αποκτήσει οι μέθοδοι πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM). Η βιβλιογραφική ανασκόπηση των Sundarrajan και Prabakaran (2023) δείχνει ότι οι μέθοδοι αυτές προσφέρουν ένα οργανωμένο πλαίσιο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων, επιτρέποντας στους διαχειριστές έργων να συνεκτιμούν πολλαπλά κριτήρια και να λαμβάνουν περισσότερο αντικειμενικές και τεκμηριωμένες αποφάσεις. Η εφαρμογή τους έχει διευρυνθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει μία μοναδική ή προφανής βέλτιστη επιλογή.

Ανάμεσα στις πλέον διαδεδομένες προσεγγίσεις συγκαταλέγεται η μέθοδος Analytic Hierarchy Process (AHP), η οποία βασίζεται στη σύγκριση κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων ανά ζεύγη, ώστε να προκύψει η ιεράρχησή τους. Παράλληλα,

ιδιαίτερα διαδεδομένες είναι οι τεχνικές Fuzzy Logic, οι οποίες επιτρέπουν την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας και της υποκειμενικής κρίσης των ειδικών στη διαδικασία αξιολόγησης. Οι Sundarrajan και Prabakaran (2023) αναφέρονται επίσης στις προσεγγίσεις Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (Fuzzy MCDM), οι οποίες συνδυάζουν την πολυκριτηριακή αξιολόγηση με την ασαφή λογική, προσφέροντας αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων λήψης αποφάσεων.

Οι τεχνικές αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών της διαχείρισης τεχνικών έργων. Ενδεικτικά, χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση κινδύνων, την επιλογή κατάλληλων κατασκευαστικών μεθόδων, τη διαχείριση προμηθειών, την υποστήριξη βιώσιμων κατασκευών και την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης ενός έργου. Παράλληλα, οι Sundarrajan και Prabakaran (2023) παρουσιάζουν εφαρμογές των πολυκριτηριακών μεθόδων στην επιλογή βιώσιμων δομικών υλικών, στη διαχείριση πράσινων κτιρίων και στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών προμηθειών, επιβεβαιώνοντας τη σημαντική συμβολή τους στη λήψη περισσότερου τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Σημαντική συμβολή στη διαδικασία λήψης αποφάσεων προσφέρουν επίσης τα πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης έργων (Project Management Information Systems – PMIS). Μέσω αυτών, οι διαχειριστές έργων αποκτούν άμεση πρόσβαση σε επικαιροποιημένα δεδομένα σχετικά με την πρόοδο, το κόστος, τους διαθέσιμους πόρους και τους κινδύνους του έργου. Όπως επισημαίνουν οι Sundarrajan και Prabakaran (2023), η διαθεσιμότητα αξιόπιστης πληροφορίας περιορίζει την αβεβαιότητα και ενισχύει την ικανότητα λήψης ορθολογικών αποφάσεων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου εκτελούνται ταυτόχρονα πολλαπλά έργα.

Εξίσου σημαντικός είναι και ο ρόλος του Building Information Modeling (BIM) στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η αξιοποίηση των ψηφιακών μοντέλων σε συνδυασμό με τις μεθόδους MCDM επιτρέπει την αποτελεσματικότερη αξιολόγηση κινδύνων, τη σαφέστερη οπτικοποίηση των τεχνικών εναλλακτικών και την επιλογή καταλληλότερων στρατηγικών διαχείρισης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο συνδυάζει τα

γεωμετρικά και τεχνικά δεδομένα του BIM με προηγμένες μεθόδους αξιολόγησης (Sundarrajan & Prabakaran, 2023).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση συνοψίζει τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων σε οκτώ βασικές κατηγορίες: ικανοποίηση του πελάτη (Customer Satisfaction), ιεράρχηση προτεραιοτήτων (Hierarchy), διαχείριση πόρων (Resources), κερδοφορία (Profitability), διαχείριση κινδύνων (Risk), ποιότητα (Quality), καθυστερήσεις (Delay) και κόστος (Cost). Η ταυτόχρονη συνεκτίμηση όλων αυτών των παραγόντων επιτρέπει μια περισσότερο ολιστική αξιολόγηση των διαθέσιμων επιλογών και αυξάνει τις πιθανότητες επιτυχούς έκβασης του έργου.

Η σύγχρονη βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι η λήψη αποφάσεων αποτελεί μία από τις πλέον κρίσιμες λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων, καθώς επηρεάζει άμεσα όλους τους βασικούς δείκτες απόδοσης ενός έργου. Όπως καταλήγουν οι Sundarrajan και Prabakaran (2023), η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων κατασκευαστικών έργων καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση δομημένων μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων και προηγμένων πληροφοριακών εργαλείων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την ευρύτερη ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης, η οποία, αξιοποιώντας μεγάλα σύνολα δεδομένων και προηγμένους αλγορίθμους ανάλυσης, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια, την ταχύτητα και την αξιοπιστία της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στη διαχείριση τεχνικών έργων.

2.5 Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων

Η συνεχής εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) έχει μεταβάλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, οργανώνονται και διαχειρίζονται τα σύγχρονα τεχνικά έργα. Από ένα εργαλείο που χρησιμοποιούνταν κυρίως για την αυτοματοποίηση επιμέρους υπολογιστικών διαδικασιών, η AI εξελίσσεται σταδιακά σε βασικό μηχανισμό υποστήριξης της διοίκησης έργων, αξιοποιώντας προηγμένους αλγορίθμους για την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων,

την πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα ψηφιακών δεδομένων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη τεχνολογιών όπως το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), τα Digital Twins και οι πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους, έχει δημιουργήσει τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την ευρεία αξιοποίηση εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης στη διαχείριση κατασκευαστικών έργων.

Το αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο αντικείμενο αποτυπώνεται στη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Adebayo et al. (2025). Αναλύοντας 135 επιστημονικές δημοσιεύσεις της περιόδου 1985–2024, οι συγγραφείς διαπιστώνουν ότι η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης έχει εξελιχθεί από αποσπασματικές και πειραματικές προσεγγίσεις σε ολοκληρωμένα συστήματα υποστήριξης της διαχείρισης έργων, τα οποία επηρεάζουν πλέον σχεδόν όλες τις βασικές λειτουργίες του Construction Project Management.

Η αξιοποίηση της ΑΙ εκτείνεται σήμερα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός τεχνικού έργου. Ήδη από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων, την εκτίμηση του κόστους και την πρόβλεψη πιθανών κινδύνων. Κατά τη φάση της κατασκευής συμβάλλει στην παρακολούθηση της προόδου, στη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων, στη διαχείριση της ασφάλειας και στον ποιοτικό έλεγχο, ενώ μετά την ολοκλήρωση του έργου αξιοποιείται σε εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης, ενεργειακής βελτιστοποίησης και διαχείρισης υποδομών μέσω της ανάλυσης δεδομένων πραγματικού χρόνου (Adebayo et al., 2025).

Καθοριστικό στοιχείο της συμβολής της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι η δυνατότητά της να μετατρέπει τα διαθέσιμα δεδομένα σε αξιοποιήσιμη γνώση. Παρότι τα πληροφοριακά συστήματα των έργων παράγουν καθημερινά τεράστιες ποσότητες πληροφοριών, η πραγματική τους αξία αναδεικνύεται μόνο όταν υποβάλλονται σε κατάλληλη ανάλυση και αξιοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων. Στο πλαίσιο αυτό, αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning), Επεξεργασίας Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP) και τεχνικές βελτιστοποίησης επιτρέπουν την αναγνώριση προτύπων, την πρόβλεψη

πιθανών αποκλίσεων και την υποστήριξη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων, περιορίζοντας την αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τα κατασκευαστικά έργα (Adebayo et al., 2025).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της ΑΙ είναι ότι μετατοπίζει τη διοίκηση έργων από μια αντιδραστική σε μια περισσότερο προγνωστική και προληπτική λογική. Αντί οι παρεμβάσεις να πραγματοποιούνται μόνο μετά την εμφάνιση αποκλίσεων, οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπουν την έγκαιρη αναγνώριση πιθανών προβλημάτων, την πρόβλεψη καθυστερήσεων, την εκτίμηση οικονομικών υπερβάσεων και την αξιολόγηση πιθανών κινδύνων πριν αυτοί επηρεάσουν ουσιαστικά την εξέλιξη του έργου. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της λήψης αποφάσεων και επιτρέπει στους οργανισμούς να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του έργου (Adebayo et al., 2025).

Ιδιαίτερα έντονη είναι η παρουσία της Τεχνητής Νοημοσύνης στις λειτουργίες που σχετίζονται με τον προγραμματισμό και την παρακολούθηση των έργων. Όπως αναφέρουν οι Adebayo et al. (2025), η πρόβλεψη της διάρκειας των δραστηριοτήτων, η βελτιστοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων, η διαχείριση κόστους, η κατανομή των πόρων και η παρακολούθηση της προόδου αποτελούν τα πεδία στα οποία η ΑΙ παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ερευνητική και πρακτική ωριμότητα. Παράλληλα, αυξανόμενο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν εφαρμογές που σχετίζονται με τη διαχείριση κινδύνων, την ασφάλεια των εργοταξίων, τη βιωσιμότητα των κατασκευών και την υποστήριξη σύνθετων διοικητικών αποφάσεων.

Βέβαια, η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων που παράγονται από το ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα των έργων. Η ανάπτυξη του BIM, των αισθητήρων IoT, των Digital Twins και των πλατφορμών Cloud Computing έχει δημιουργήσει ένα περιβάλλον συνεχούς συλλογής και ανταλλαγής πληροφοριών, το οποίο επιτρέπει στους αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης να λειτουργούν με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Υπό αυτή την έννοια, η ΑΙ δεν αποτελεί μια απομονωμένη τεχνολογία,

αλλά τον μηχανισμό που ενοποιεί τα δεδομένα όλων των ψηφιακών συστημάτων και τα μετατρέπει σε γνώση χρήσιμη για τη διοίκηση του έργου.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει, η ευρεία εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης εξακολουθεί να συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Η έλλειψη ποιοτικών δεδομένων, η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων, η απουσία κοινών προτύπων ανταλλαγής πληροφοριών και η ανάγκη ανάπτυξης νέων ψηφιακών δεξιοτήτων αποτελούν, σύμφωνα με τους Adebayo et al. (2025), βασικούς ανασταλτικούς παράγοντες για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων της ΑΙ στον κατασκευαστικό κλάδο. Επιπλέον, ζητήματα όπως η διαφάνεια των αλγορίθμων, η προστασία των δεδομένων και η αποδοχή των νέων τεχνολογιών από τους επαγγελματίες του χώρου εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη έχει πλέον αναδειχθεί σε έναν από τους σημαντικότερους καταλύτες του ψηφιακού μετασχηματισμού της διαχείρισης τεχνικών έργων. Η ικανότητά της να επεξεργάζεται σύνθετα δεδομένα, να υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων και να βελτιστοποιεί κρίσιμες λειτουργίες του Construction Project Management δημιουργεί νέες δυνατότητες για την αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση της ποιότητας και την αποτελεσματικότερη διαχείριση των κινδύνων. Στις επόμενες υποενότητες εξετάζονται αναλυτικά οι σημαντικότερες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στις επιμέρους λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων και ο τρόπος με τον οποίο οι σύγχρονες τεχνολογίες ΑΙ μετασχηματίζουν τη διοίκηση και την υλοποίηση των κατασκευαστικών έργων.

2.5.1 Χρονικός προγραμματισμός

Ο χρονικός προγραμματισμός αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων, καθώς καθορίζει τη χρονική αλληλουχία των δραστηριοτήτων, τη διάρκειά τους, τις μεταξύ τους εξαρτήσεις και τον συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Η αποτελεσματικότητα ενός χρονοδιαγράμματος επηρεάζει άμεσα την αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, την τήρηση των συμβατικών

προθεσμιών, τον έλεγχο του κόστους και, τελικά, τη συνολική επιτυχία του έργου. Παρότι μέθοδοι όπως η Critical Path Method (CPM) και τα διαγράμματα Gantt εξακολουθούν να αποτελούν τη βάση του προγραμματισμού στις κατασκευές, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων έργων αναδεικνύει ολοένα περισσότερο τους περιορισμούς των παραδοσιακών προσεγγίσεων, ιδιαίτερα όταν απαιτείται η διαχείριση μεγάλου όγκου αλληλεξαρτώμενων δεδομένων και η συνεχής προσαρμογή του χρονοδιαγράμματος στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του εργοταξίου.

Οι σύγχρονες εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης μεταβάλλουν ουσιαστικά τη φιλοσοφία του χρονικού προγραμματισμού, μετατοπίζοντας το ενδιαφέρον από τον στατικό σχεδιασμό στη δυναμική και προγνωστική διαχείριση του έργου. Αξιοποιώντας ιστορικά δεδομένα, πληροφορίες πραγματικού χρόνου και προηγμένους αλγόριθμους, τα συστήματα AI μπορούν να αναγνωρίζουν επαναλαμβανόμενα πρότυπα, να προβλέπουν πιθανές καθυστερήσεις και να υποστηρίζουν αποφάσεις που αφορούν την ανακατανομή πόρων ή την αναθεώρηση του χρονοδιαγράμματος πριν ακόμη εμφανιστούν σημαντικές αποκλίσεις. Όπως επισημαίνουν οι Adebayo et al. (2025), η δυνατότητα αυτή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες συνεισφορές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη σύγχρονη διαχείριση τεχνικών έργων, καθώς επιτρέπει τη μετάβαση από την αντιδραστική αντιμετώπιση προβλημάτων σε μια περισσότερο προληπτική και προγνωστική προσέγγιση.

Καθοριστική είναι, επίσης, η συμβολή της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) και της Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) στην πρόβλεψη της διάρκειας των δραστηριοτήτων και της συνολικής εξέλιξης ενός έργου. Μέσω της εκπαίδευσης των μοντέλων σε δεδομένα προηγούμενων έργων, οι αλγόριθμοι μπορούν να εκτιμήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη διάρκεια των εργασιών, να εντοπίσουν κρίσιμες δραστηριότητες που ενδέχεται να προκαλέσουν καθυστερήσεις και να αξιολογήσουν εναλλακτικά σενάρια υλοποίησης. Παράλληλα, τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και η ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning), αξιοποιούνται για τη δημιουργία αποδοτικότερων χρονοδιαγραμμάτων, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα πόρων, τις τεχνικές αλληλεξαρτήσεις και τις συμβατικές απαιτήσεις.

Ενδεικτική εφαρμογή των παραπάνω προσεγγίσεων παρουσιάζεται στη μελέτη των Obianyo, Udeala και Alaneme (2023), οι οποίοι ανέπτυξαν μοντέλα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks – ANN) και Προσαρμοστικών Νευρο-Ασαφών Συστημάτων Συμπερασμού (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems – ANFIS) για την πρόβλεψη της χρονικής απόδοσης κατασκευαστικών έργων. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους έδειξαν ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν να αποτυπώσουν αποτελεσματικά τις πολύπλοκες και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών ενός έργου, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια στις προβλέψεις της προόδου και της χρονικής απόδοσης. Επιπλέον, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίησή τους μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τις διαδικασίες επαναπρογραμματισμού (rescheduling), ανακατανομής πόρων και παρακολούθησης της προόδου, συμβάλλοντας στη μείωση τόσο των καθυστερήσεων όσο και των υπερβάσεων κόστους.

Εξίσου σημαντική είναι η δυνατότητα διασύνδεσης της Τεχνητής Νοημοσύνης με άλλα ψηφιακά συστήματα διαχείρισης πληροφοριών, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT) και τα συστήματα Earned Value Management (EVM). Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει τη συνεχή ενημέρωση του χρονοδιαγράμματος με πραγματικά δεδομένα από το εργοτάξιο, την αυτόματη αναγνώριση αποκλίσεων μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής προόδου, καθώς και την παραγωγή αξιόπιστων προβλέψεων σχετικά με την ημερομηνία ολοκλήρωσης του έργου. Ως αποτέλεσμα, ο χρονικός προγραμματισμός παύει να αποτελεί ένα στατικό εργαλείο σχεδιασμού και μετατρέπεται σε μια δυναμική διαδικασία συνεχούς παρακολούθησης και προσαρμογής.

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον συγκεκριμένο τομέα συνοδεύεται, ωστόσο, και από ορισμένες σημαντικές προκλήσεις. Η αξιοπιστία των προβλέψεων εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα, την πληρότητα και τη συνέπεια των διαθέσιμων δεδομένων, ενώ η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων προϋποθέτει κατάλληλες ψηφιακές υποδομές και εξειδικευμένη τεχνογνωσία. Παράλληλα, οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να υποκαταστήσουν πλήρως την εμπειρία και την επαγγελματική κρίση του μηχανικού ή

του Project Manager. Αντίθετα, λειτουργούν ως εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων, ενισχύοντας την ανθρώπινη αξιολόγηση και διευκολύνοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε περιβάλλοντα αυξημένης αβεβαιότητας.

Αναφορικά με τον χρονικό προγραμματισμό, η Τεχνητή Νοημοσύνη μετασχηματίζει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, παρακολουθούνται και αναθεωρούνται τα τεχνικά έργα. Η πρόβλεψη πιθανών καθυστερήσεων, η δυναμική αναπροσαρμογή των χρονοδιαγραμμάτων και η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων καθιστούν την ΑΙ έναν από τους βασικούς μοχλούς εξέλιξης της σύγχρονης διαχείρισης τεχνικών έργων, συμβάλλοντας τόσο στη βελτίωση του προγραμματισμού όσο και στη συνολική απόδοση των έργων.

2.5.2 Εκτίμηση και διαχείριση κόστους

Η εκτίμηση κόστους αποτελεί έναν από τους βασικότερους άξονες της διοίκησης τεχνικών έργων, καθώς επηρεάζει άμεσα τη λήψη αποφάσεων, τον προγραμματισμό των πόρων, τη διαμόρφωση του προϋπολογισμού και, τελικά, την οικονομική επιτυχία του έργου. Η ακρίβεια των αρχικών εκτιμήσεων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα ενός οργανισμού να διατηρήσει το έργο εντός των προβλεπόμενων οικονομικών ορίων, ενώ αποκλίσεις στα πρώτα στάδια οδηγούν συχνά σε υπερβάσεις κόστους, καθυστερήσεις και μείωση της συνολικής απόδοσης του έργου.

Για πολλά χρόνια, η εκτίμηση κόστους βασιζόταν κυρίως στην εμπειρία των μηχανικών και των διαχειριστών έργων, στην αξιοποίηση ιστορικών στοιχείων από παρόμοια έργα και σε μεθόδους όπως η αναλογική εκτίμηση (analogous estimating), η παραμετρική εκτίμηση (parametric estimating) και η αναλυτική προσέγγιση bottom-up. Παρότι οι τεχνικές αυτές εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως, εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς, ιδιαίτερα σε μεγάλα και σύνθετα έργα όπου οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αλληλεπιδρούν με ιδιαίτερα πολύπλοκο τρόπο και μεταβάλλονται διαρκώς κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου. Επιπλέον, η έντονη εξάρτησή τους από την ανθρώπινη εμπειρία και κρίση αυξάνει την πιθανότητα σφαλμάτων και υποκειμενικών αποκλίσεων.

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης έχει αλλάξει σημαντικά τη φιλοσοφία της εκτίμησης και της διαχείρισης κόστους. Σε αντίθεση με τις συμβατικές προσεγγίσεις, τα σύγχρονα συστήματα ΑΙ επεξεργάζονται μεγάλους όγκους ιστορικών αλλά και δεδομένων πραγματικού χρόνου, αναγνωρίζοντας σύνθετα πρότυπα και μη γραμμικές σχέσεις που δύσκολα μπορούν να εντοπιστούν με τις παραδοσιακές στατιστικές μεθόδους. Έτσι, καθίσταται εφικτή η παραγωγή ακριβέστερων προβλέψεων, αλλά και η συνεχής επικαιροποίηση των εκτιμήσεων καθώς το έργο εξελίσσεται και μεταβάλλονται οι εξωτερικές συνθήκες.

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση των Shamim et al. (2025) δείχνει ότι οι περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές βασίζονται σε τεχνικές Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) και υβριδικά μοντέλα, τα οποία εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης. Από την ανάλυση 39 επιστημονικών μελετών προέκυψε ότι περίπου το 70% των εφαρμογών αξιοποιεί αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, ενώ τα μοντέλα βαθιάς μάθησης επιτυγχάνουν μέση ακρίβεια πρόβλεψης μεταξύ 85% και 90%. Αντίστοιχα, τα υβριδικά μοντέλα, τα οποία συνδυάζουν διαφορετικές υπολογιστικές προσεγγίσεις, παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή απόδοση σε έργα που χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα και μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

Μεταξύ των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται συχνότερα περιλαμβάνονται τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANN), οι Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines – SVM), τα Δέντρα Αποφάσεων (Decision Trees), οι αλγόριθμοι Random Forest και XGBoost, καθώς και τα Συνελικτικά (CNN) και Αναδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα (RNN/LSTM). Τα ANN εξακολουθούν να αποτελούν την πιο διαδεδομένη προσέγγιση, καθώς μπορούν να μοντελοποιήσουν σύνθετες και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν το κόστος, ενώ τα δίκτυα LSTM εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή αποτελεσματικότητα στην πρόβλεψη χρονικών σειρών και στην παρακολούθηση της εξέλιξης του κόστους κατά τη διάρκεια υλοποίησης του έργου.

Η συνεισφορά της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν περιορίζεται στην αρχική διαμόρφωση του προϋπολογισμού, αλλά εκτείνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του

έργου. Σύγχρονα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων αξιοποιούν δεδομένα προηγούμενων έργων, πληροφορίες της αγοράς, τιμές πρώτων υλών, στοιχεία σχετικά με τη διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού και οικονομικούς δείκτες, προκειμένου να προβλέψουν δυναμικά την εξέλιξη του κόστους. Παράλληλα, μπορούν να αξιολογούν εναλλακτικά σενάρια, να εκτιμούν τον οικονομικό αντίκτυπο πιθανών κινδύνων και να προτείνουν αποδοτικότερες στρατηγικές κατανομής των πόρων, συμβάλλοντας στον περιορισμό των υπερβάσεων κόστους και στη βελτίωση της συνολικής οικονομικής απόδοσης του έργου. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ΑΙ είναι η δυνατότητα συνεχούς επικαιροποίησης των προβλέψεων, καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες της αγοράς ή οι απαιτήσεις του έργου.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στην οικονομική διαχείριση υπερβαίνουν την απλή πρόβλεψη του κόστους. Η αξιοποίησή τους επεκτείνεται στη διαχείριση ταμειακών ροών (cash flow forecasting), στη βελτιστοποίηση της κατανομής των διαθέσιμων πόρων, στην υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων και στην έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων μεταξύ προϋπολογισμένου και πραγματικού κόστους. Οι λειτουργίες αυτές εφαρμόζονται κυρίως κατά τις φάσεις του προγραμματισμού και της παρακολούθησης-ελέγχου, όπου η έγκαιρη και αξιόπιστη πληροφόρηση επηρεάζει καθοριστικά την πορεία του έργου.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει, η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην εκτίμηση κόστους εξακολουθεί να συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς. Η απόδοση των αλγορίθμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα, την πληρότητα και την αξιοπιστία των διαθέσιμων δεδομένων, ενώ αρκετά μοντέλα απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλους όγκους πληροφοριών και σημαντική υπολογιστική ισχύ για την εκπαίδευσή τους. Επιπλέον, πολλές τεχνικές βαθιάς μάθησης λειτουργούν ως «μαύρα κουτιά» (black-box models), γεγονός που δυσχεραίνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και περιορίζει την εμπιστοσύνη των διαχειριστών έργων στις παραγόμενες προβλέψεις. Παράλληλα, αρκετές εφαρμογές έχουν αξιολογηθεί σε περιορισμένα σύνολα δεδομένων ή σε εξειδικευμένους τομείς των κατασκευών, γεγονός που δυσκολεύει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων σε διαφορετικούς τύπους έργων.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη σύγχρονη βιβλιογραφία είναι ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη μετασχηματίζει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η εκτίμηση και η διαχείριση κόστους στα κατασκευαστικά έργα. Η αξιοποίηση προηγμένων αλγορίθμων επιτρέπει την παραγωγή ακριβέστερων προβλέψεων, τη δυναμική αναπροσαρμογή του προϋπολογισμού, τη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων και την αποτελεσματικότερη διαχείριση των οικονομικών κινδύνων. Παρότι εξακολουθούν να υφίστανται τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις, η συνεχής βελτίωση των αλγορίθμων, η αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων και η ενσωμάτωση της ΑΙ στα σύγχρονα πληροφοριακά συστήματα έργων αναμένεται να ενισχύσουν ακόμη περισσότερο τον ρόλο της στη διοίκηση κατασκευαστικών έργων τα επόμενα χρόνια.

2.5.3 Διαχείριση κινδύνων

Η διαχείριση κινδύνων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους γνωστικούς τομείς της διοίκησης κατασκευαστικών έργων, καθώς τα έργα χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, πολυπλοκότητας και αλληλεξάρτησης μεταξύ τεχνικών, οικονομικών και οργανωτικών παραγόντων. Οι κίνδυνοι μπορούν να επηρεάσουν το κόστος, το χρονοδιάγραμμα, την ποιότητα, την ασφάλεια, την εφοδιαστική αλυσίδα και, συνολικά, την επιτυχή ολοκλήρωση ενός έργου. Για τον λόγο αυτό, η αποτελεσματική διαχείρισή τους προϋποθέτει την έγκαιρη αναγνώριση, την αξιολόγηση, την αντιμετώπιση και τη συνεχή παρακολούθησή τους σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου (Tian et al., 2025).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης μεταβάλλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζεται η διαχείριση κινδύνων στον κατασκευαστικό κλάδο. Σύμφωνα με τους Tian et al. (2025), η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων πρόβλεψης, επιτρέπει τη μετάβαση από μια παραδοσιακή, αντιδραστική προσέγγιση σε ένα περισσότερο προληπτικό και δυναμικό μοντέλο λήψης αποφάσεων. Αντί η αξιολόγηση των

κινδύνων να βασίζεται αποκλειστικά στην εμπειρία των στελεχών, τα σύγχρονα συστήματα AI αξιοποιούν ιστορικά δεδομένα, πληροφορίες πραγματικού χρόνου και πρότυπα συμπεριφοράς, ώστε να εκτιμήσουν την πιθανότητα εμφάνισης κινδύνων και να υποστηρίξουν την επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής αντιμετώπισης (Tian et al., 2025).

Από τη σχετική βιβλιογραφία προκύπτει ότι οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης εκτείνονται σε όλα τα βασικά στάδια της διαδικασίας διαχείρισης κινδύνων. Κατά τη φάση της αναγνώρισης αξιοποιούνται τεχνικές εξόρυξης δεδομένων (Data Mining), μηχανικής μάθησης (Machine Learning) και επεξεργασίας φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing – NLP) για την αυτόματη ανίχνευση πιθανών απειλών μέσα από τεχνικά έγγραφα, συμβάσεις, αναφορές έργου, αρχεία ατυχημάτων, ημερολόγια εργοταξίου και ιστορικά δεδομένα προηγούμενων έργων. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η πιθανότητα παράλειψης κρίσιμων κινδύνων, ενώ η διαδικασία εντοπισμού τους ολοκληρώνεται σημαντικά ταχύτερα σε σύγκριση με τις συμβατικές χειροκίνητες προσεγγίσεις (Abioye et al., 2021· Tian et al., 2025).

Κεντρικό ρόλο στη διαδικασία αυτή διαδραματίζουν οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, οι οποίες συμβάλλουν ουσιαστικά στην πρόβλεψη των κινδύνων. Οι σχετικοί αλγόριθμοι εκπαιδεύονται σε ιστορικά δεδομένα έργων και μπορούν να εντοπίζουν πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ μεταβλητών που δύσκολα γίνονται αντιληπτές με τις παραδοσιακές αναλυτικές μεθόδους. Έτσι, καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη πιθανών υπερβάσεων κόστους, καθυστερήσεων στο χρονοδιάγραμμα, προβλημάτων ποιότητας ή ακόμη και αυξημένης πιθανότητας εργατικών ατυχημάτων. Επιπλέον, καθώς τα μοντέλα ενημερώνονται διαρκώς με νέα δεδομένα, η αξιοπιστία των προβλέψεών τους βελτιώνεται κατά την εξέλιξη του έργου, ενισχύοντας τη δυνατότητα έγκαιρης λήψης διορθωτικών ενεργειών (Pan & Zhang, 2021· Tian et al., 2025).

Εξίσου ουσιαστική είναι η αξιοποίηση τεχνικών επεξεργασίας φυσικής γλώσσας, οι οποίες επιτρέπουν την ανάλυση μεγάλου αριθμού αδόμητων εγγράφων που παράγονται κατά την υλοποίηση ενός έργου. Τεχνικές όπως τα Named Entity Recognition (NER), TF-IDF, Word2Vec και τα σύγχρονα γλωσσικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την αυτόματη εξαγωγή πληροφοριών από τεχνικές

προδιαγραφές, συμβάσεις, κανονισμούς, αναφορές επιθεώρησης και αλληλογραφία μεταξύ των εμπλεκομένων. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυτής περιορίζει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο ανάλυσης, μειώνει τα ανθρώπινα λάθη και συμβάλλει στον έγκαιρο εντοπισμό συμβατικών ή κανονιστικών κινδύνων (Abioye et al., 2021· Tian et al., 2025).

Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα γνώσης (Knowledge-Based Reasoning – KBR), τα οποία αξιοποιούν τόσο την εμπειρία ειδικών όσο και ιστορικά δεδομένα προηγούμενων έργων για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Μέσω εργαλείων όπως τα Bayesian Networks, το Case-Based Reasoning και τα Rule-Based Systems καθίσταται δυνατή η διερεύνηση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ διαφορετικών κινδύνων, η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων και η επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής αντιμετώπισης. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα είναι περιορισμένα ή όταν απαιτείται ο συνδυασμός ποσοτικών στοιχείων με την εμπειρική γνώση των ειδικών (Nguyen et al., 2016· Pan & Zhang, 2021· Tian et al., 2025).

Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί και στον τομέα της Υπολογιστικής Όρασης (Computer Vision – CV), η οποία έχει διευρύνει σημαντικά τις δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση κινδύνων. Σύμφωνα με τους Tian et al. (2025), η ανάλυση εικόνων και βίντεο από κάμερες, μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs) και άλλα συστήματα παρακολούθησης επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση επικίνδυνων συνθηκών στο εργοτάξιο, τον έλεγχο της συμμόρφωσης με τα μέτρα ασφαλείας και την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών ατυχημάτων. Αλγόριθμοι όπως ο You Only Look Once (YOLO) χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση εργαζομένων, μέσων ατομικής προστασίας, μηχανημάτων και επικίνδυνων καταστάσεων σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στη μείωση των εργατικών ατυχημάτων και στη βελτίωση του επιπέδου ασφάλειας. Παράλληλα, η συνεχής παρακολούθηση του εργοταξίου επιτρέπει την άμεση ειδοποίηση των υπευθύνων όταν εντοπίζονται αποκλίσεις από τις προβλεπόμενες διαδικασίες ασφαλείας.

Εξίσου σημαντική είναι η αξιοποίηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης (Optimisation Algorithms) για την υποστήριξη σύνθετων αποφάσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση κινδύνων. Οι Tian et al. (2025) αναφέρουν ότι τεχνικές όπως οι Genetic Algorithms (GA), η Particle Swarm Optimisation (PSO) και η Ant Colony Optimisation (ACO) εφαρμόζονται για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων, της χωροθέτησης του εργοταξίου, του προγραμματισμού των εργασιών και της επιλογής κατάλληλων στρατηγικών αντιμετώπισης κινδύνων. Μέσω της προσομοίωσης πολλαπλών εναλλακτικών σεναρίων μπορούν να προτείνονται λύσεις που περιορίζουν την πιθανότητα εμφάνισης κινδύνων, διατηρώντας παράλληλα την αποδοτικότητα του έργου και τον έλεγχο του κόστους.

Πέρα όμως από τους κινδύνους ασφάλειας, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης καλύπτουν ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θεμάτων, όπως οι οικονομικοί κίνδυνοι, οι αποκλίσεις του χρονοδιαγράμματος, τα ζητήματα ποιότητας, η περιβαλλοντική συμμόρφωση, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας και η διαχείριση τεχνικών εγγράφων. Η δυνατότητα ενοποίησης δεδομένων από διαφορετικές πηγές επιτρέπει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μοντέλων πρόβλεψης, τα οποία συνεκτιμούν τόσο τεχνικούς όσο και οργανωτικούς παράγοντες και υποστηρίζουν περισσότερο τεκμηριωμένες αποφάσεις. Όπως επισημαίνουν οι Tian et al. (2025), η σύγχρονη προσέγγιση της διαχείρισης κινδύνων δεν περιορίζεται πλέον στην αντιμετώπιση μεμονωμένων απειλών, αλλά επιδιώκει την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών κινδύνων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου.

Τα οφέλη των παραπάνω εφαρμογών γίνονται ακόμη μεγαλύτερα όταν η Τεχνητή Νοημοσύνη συνδυάζεται με τις υπόλοιπες τεχνολογίες του οικοσυστήματος Construction 4.0. Η διασύνδεση με το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), τα Digital Twins και τις πλατφόρμες Cloud Computing επιτρέπει τη συνεχή τροφοδότηση των αλγορίθμων με δεδομένα πραγματικού χρόνου, βελτιώνοντας την ακρίβεια των προβλέψεων και επιτρέποντας την άμεση προσαρμογή των στρατηγικών διαχείρισης κινδύνων στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του έργου. Με αυτόν τον τρόπο, η διαχείριση κινδύνων μετατρέπεται από μια περιοδική διαδικασία

αξιολόγησης σε ένα δυναμικό σύστημα συνεχούς παρακολούθησης και υποστήριξης αποφάσεων.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει, η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση κινδύνων εξακολουθεί να συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Οι Tian et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ποιότητα και η πληρότητα των διαθέσιμων δεδομένων αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αξιοπιστία των μοντέλων, ενώ η ετερογένεια των πληροφοριακών συστημάτων και η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών δυσχεραίνουν την ανταλλαγή δεδομένων. Επιπλέον, αρκετά μοντέλα μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ερμηνευσιμότητα, γεγονός που δυσκολεύει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο παράγονται οι προβλέψεις και επηρεάζει την εμπιστοσύνη των επαγγελματιών στις προτεινόμενες αποφάσεις. Παράλληλα, η επιτυχής ενσωμάτωση της AI προϋποθέτει την ανάπτυξη νέων ψηφιακών δεξιοτήτων, τη διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού και την προσαρμογή των οργανωσιακών διαδικασιών στις απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής.

Συνοψίζοντας τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί πλέον έναν από τους σημαντικότερους μοχλούς εξέλιξης της διαχείρισης κινδύνων στα κατασκευαστικά έργα. Η δυνατότητά της να επεξεργάζεται μεγάλους όγκους δεδομένων, να αναγνωρίζει πρότυπα συμπεριφοράς, να προβλέπει την εμφάνιση κινδύνων και να υποστηρίζει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων ενισχύει σημαντικά την ανθεκτικότητα και την αποτελεσματικότητα των έργων. Όπως καταλήγουν οι Tian et al. (2025), η μελλοντική έρευνα αναμένεται να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη περισσότερο διαφανών και προσαρμοστικών μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης, καθώς και στη στενότερη διασύνδεσή τους με αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως το blockchain και τα προσαρμοστικά συστήματα διαχείρισης κινδύνων, με στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου, ευφούς και περισσότερο ανθεκτικού πλαισίου διοίκησης τεχνικών έργων.

2.5.4 Διαχείριση πόρων

Η αποτελεσματική διαχείριση των πόρων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή υλοποίηση ενός τεχνικού έργου, καθώς επηρεάζει άμεσα τη διάρκειά του, το συνολικό κόστος, την παραγωγικότητα και, τελικά, την απόδοσή του. Το ανθρώπινο δυναμικό, ο μηχανολογικός εξοπλισμός, τα υλικά και οι οικονομικοί πόροι είναι συνήθως περιορισμένοι, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ορθολογική κατανομή και αξιοποίησή τους. Η διαδικασία αυτή γίνεται ακόμη πιο σύνθετη στα σύγχρονα κατασκευαστικά έργα, όπου οι δραστηριότητες παρουσιάζουν έντονες αλληλεξαρτήσεις και οι συνθήκες του εργοταξίου μεταβάλλονται διαρκώς.

Παραδοσιακά, η διαχείριση των πόρων βασίζεται κυρίως στην εμπειρία των μηχανικών, σε προκαθορισμένους κανόνες και στη χρήση συμβατικών εργαλείων χρονοπρογραμματισμού. Παρότι οι μέθοδοι αυτές εξακολουθούν να εφαρμόζονται ευρέως, παρουσιάζουν περιορισμένη ευελιξία όταν μεταβάλλεται η διαθεσιμότητα προσωπικού, εξοπλισμού ή υλικών. Επιπλέον, η χειροκίνητη ανακατανομή των πόρων είναι συνήθως χρονοβόρα, ενώ η αξιολόγηση πολλών εναλλακτικών σεναρίων καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη σε έργα μεγάλης κλίμακας. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται η πιθανότητα καθυστερήσεων, μειώνεται η παραγωγικότητα και ενδέχεται να προκύψουν υπερβάσεις κόστους (Abishek et al., 2024).

Η Τεχνητή Νοημοσύνη προτείνει μια διαφορετική προσέγγιση στη διαχείριση των πόρων, η οποία βασίζεται στη συνεχή ανάλυση δεδομένων και στη δυναμική υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Αξιοποιώντας αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και τεχνικές βελτιστοποίησης, τα συστήματα ΑΙ μπορούν να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο πληροφοριών σχετικά με τη διαθεσιμότητα προσωπικού, τον εξοπλισμό, τις απαιτήσεις των δραστηριοτήτων και τους χρονικούς περιορισμούς του έργου. Με βάση τα δεδομένα αυτά, προτείνουν κατανομές πόρων που μεγιστοποιούν την παραγωγικότητα και περιορίζουν τον χρόνο αδράνειας. Όπως επισημαίνουν οι Abishek et al. (2024), η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυτής οδηγεί σε περισσότερο τεκμηριωμένες αποφάσεις και επιτρέπει την ταχύτερη προσαρμογή του σχεδιασμού όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες του έργου.

Καθοριστική συμβολή στη διαδικασία αυτή έχουν οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση της καταλληλότερης λύσης μεταξύ πολλών εναλλακτικών σεναρίων κατανομής πόρων. Οι Abishek et al. (2024) αναφέρουν ότι τεχνικές όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO), οι Evolutionary Algorithms και άλλες μεταερευτικές μέθοδοι επιτρέπουν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση αντικρουόμενων στόχων, όπως η μείωση της διάρκειας του έργου, ο περιορισμός του κόστους και η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, οι αλγόριθμοι αυτοί εξετάζουν μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων σε μικρό χρονικό διάστημα, εντοπίζοντας εκείνες που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συνολική αποδοτικότητα.

Η αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης διευρύνει ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες της διαχείρισης πόρων, καθώς επιτρέπει στα συστήματα να αξιοποιούν την εμπειρία προηγούμενων έργων και να βελτιώνουν σταδιακά την απόδοσή τους. Αναλύοντας ιστορικά στοιχεία σχετικά με την παραγωγικότητα των συνεργείων, τη χρήση εξοπλισμού και την κατανάλωση υλικών, τα μοντέλα ΑΙ μπορούν να εκτιμούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές ανάγκες κάθε δραστηριότητας. Έτσι, περιορίζονται τόσο η υπερδέσμευση όσο και η υποαξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε σύνθετα έργα, όπου η αποτελεσματική διαχείριση των πόρων επηρεάζει άμεσα τόσο την τήρηση του χρονοδιαγράμματος όσο και τον έλεγχο του προϋπολογισμού.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι η δυνατότητα δυναμικής ανακατανομής των πόρων κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Σε αντίθεση με τα συμβατικά χρονοδιαγράμματα, τα οποία απαιτούν συνήθως χειροκίνητη αναθεώρηση, τα συστήματα ΑΙ μπορούν να αξιολογούν σε πραγματικό χρόνο τις επιπτώσεις απρόβλεπτων γεγονότων, όπως καθυστερήσεις στις προμήθειες, βλάβες εξοπλισμού ή μεταβολές στη διαθεσιμότητα προσωπικού. Με βάση τις πληροφορίες αυτές, προτείνουν εναλλακτικά σχέδια κατανομής των πόρων, διατηρώντας όσο το δυνατόν υψηλότερο το επίπεδο απόδοσης του έργου. Η προσαρμοστικότητα αυτή

αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ΑΙ σε σχέση με τις συμβατικές προσεγγίσεις διαχείρισης.

Τα οφέλη αυτά ενισχύονται ακόμη περισσότερο όταν η Τεχνητή Νοημοσύνη λειτουργεί σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες τεχνολογίες του οικοσυστήματος Construction 4.0. Η διασύνδεση με το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), τα Digital Twins και τις πλατφόρμες Cloud Computing επιτρέπει τη συνεχή συλλογή δεδομένων σχετικά με τη θέση, τη λειτουργία και την κατάσταση των διαθέσιμων πόρων, δημιουργώντας ένα περιβάλλον συνεχούς παρακολούθησης και βελτιστοποίησης. Όπως επισημαίνουν οι Pan και Zhang (2021), η αξία της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν περιορίζεται μόνο στη δυνατότητα λήψης αποφάσεων, αλλά επεκτείνεται στην ενοποίηση πληροφοριών που προέρχονται από διαφορετικές ψηφιακές πηγές, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης της διοίκησης των έργων.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει, η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση πόρων εξακολουθεί να συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η ανάγκη ύπαρξης αξιόπιστων και διαρκώς επικαιροποιημένων δεδομένων, η ετερογένεια των πληροφοριακών συστημάτων, το κόστος ανάπτυξης και ενσωμάτωσης προηγμένων αλγορίθμων, καθώς και η ανάγκη εξειδικευμένων γνώσεων για την αποτελεσματική αξιοποίησή τους. Παράλληλα, σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται η προσαρμογή των οργανωσιακών διαδικασιών και η ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων από τα στελέχη των έργων, ώστε οι δυνατότητες της ΑΙ να ενσωματωθούν ουσιαστικά στην καθημερινή πρακτική της διοίκησης έργων.

Συνοψίζοντας τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί ένα ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων στα κατασκευαστικά έργα. Η δυνατότητά της να αναλύει μεγάλους όγκους δεδομένων, να προβλέπει μελλοντικές ανάγκες, να υποστηρίζει τη δυναμική ανακατανομή προσωπικού, εξοπλισμού και υλικών και να αξιοποιεί προηγμένους αλγορίθμους βελτιστοποίησης συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της παραγωγικότητας και της συνολικής αποδοτικότητας των έργων. Καθώς οι τεχνολογίες

του ψηφιακού μετασχηματισμού εξελίσσονται, η ολοένα στενότερη ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στις διαδικασίες διαχείρισης πόρων αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους βασικούς παράγοντες που θα διαμορφώσουν το μέλλον της διοίκησης τεχνικών έργων.

2.5.5 Διαχείριση ποιότητας

Η διαχείριση ποιότητας αποτελεί μία από τις βασικές λειτουργίες της διοίκησης τεχνικών έργων, καθώς διασφαλίζει ότι το τελικό αποτέλεσμα ανταποκρίνεται στις τεχνικές προδιαγραφές, στα ισχύοντα πρότυπα, στις συμβατικές απαιτήσεις και στις προσδοκίες του κυρίου του έργου. Ωστόσο, η ποιότητα δεν εξαρτάται μόνο από τον τελικό έλεγχο του κατασκευασμένου έργου. Αντίθετα, αποτελεί μια διαρκή διαδικασία που εκτείνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου και περιλαμβάνει τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τις επιθεωρήσεις, τις δοκιμές, την τεκμηρίωση και τη συνεχή βελτίωση των εφαρμοζόμενων διαδικασιών.

Στις συμβατικές προσεγγίσεις, ο ποιοτικός έλεγχος βασίζεται κυρίως σε επιτόπιες επιθεωρήσεις, δειγματοληπτικούς ελέγχους και στη χειροκίνητη αξιολόγηση μεγάλου όγκου τεχνικών εγγράφων και αναφορών. Η συνεχής όμως αύξηση των δεδομένων που παράγονται στα σύγχρονα κατασκευαστικά έργα καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την έγκαιρη και ολοκληρωμένη επεξεργασία τους. Η χειροκίνητη αξιολόγηση απαιτεί σημαντικό χρόνο και ανθρώπινους πόρους, ενώ παράλληλα αυξάνει την πιθανότητα παραλείψεων ή εσφαλμένων εκτιμήσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερημένο εντοπισμό ποιοτικών προβλημάτων και, κατ' επέκταση, να επηρεάσει αρνητικά τη συνολική απόδοση του έργου (Zhang et al., 2022).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αλλάζει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο οργανώνεται και εφαρμόζεται ο ποιοτικός έλεγχος στα τεχνικά έργα. Μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης (Machine Learning), βαθιάς μάθησης (Deep Learning), υπολογιστικής όρασης (Computer Vision) και επεξεργασίας φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing – NLP), καθίσταται δυνατή η αυτοματοποίηση της συλλογής, της επεξεργασίας και της ανάλυσης δεδομένων ποιότητας. Με τον τρόπο

αυτό μπορούν να εντοπίζονται έγκαιρα αποκλίσεις από τις προδιαγραφές, να αναγνωρίζονται κατασκευαστικά ελαττώματα και να υποστηρίζεται αποτελεσματικότερα η διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιοποίηση τεχνικών επεξεργασίας φυσικής γλώσσας για την ανάλυση των αδόμητων πληροφοριών που παράγονται καθημερινά στα εργοτάξια. Όπως επισημαίνουν οι Zhang et al. (2022), σημαντικό μέρος της πληροφορίας που σχετίζεται με την ποιότητα περιλαμβάνεται σε ημερήσιες αναφορές, δελτία επιθεώρησης, εκθέσεις δοκιμών και άλλα τεχνικά έγγραφα, τα οποία μέχρι σήμερα εξετάζονται κυρίως με χειροκίνητες διαδικασίες. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι συγγραφείς ανέπτυξαν ένα πολυκαναλικό μοντέλο βαθιάς μάθησης (MC-CNN), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μοντέλων BERT, Word2Vec και Convolutional Neural Networks (CNN). Το μοντέλο αυτό πέτυχε αυτόματη ταξινόμηση των ποιοτικών αναφορών με ακρίβεια που ξεπερνά το 92%, επιτρέποντας στους μηχανικούς να εντοπίζουν ταχύτερα κρίσιμα ζητήματα, να τα συσχετίζουν με τις αντίστοιχες τεχνικές προδιαγραφές και να επικεντρώνονται στη λήψη διορθωτικών ενεργειών αντί στη χρονοβόρα επεξεργασία εγγράφων.

Σημαντική συμβολή στη διαχείριση ποιότητας προσφέρουν και οι τεχνολογίες Υπολογιστικής Όρασης. Μέσω αλγορίθμων βαθιάς μάθησης, εικόνες και βίντεο που συλλέγονται από κάμερες, μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) ή φορητές συσκευές μπορούν να αναλυθούν αυτόματα για τον εντοπισμό ρωγμών, αποκλίσεων από τις προδιαγραφές, ελαττωμάτων στο σκυρόδεμα, προβλημάτων στις συγκολλήσεις και άλλων κατασκευαστικών αστοχιών. Η αυτοματοποίηση των επιθεωρήσεων μειώνει σημαντικά τον χρόνο αξιολόγησης, περιορίζει την υποκειμενικότητα των αποτελεσμάτων και ενισχύει τη συνέπεια του ποιοτικού ελέγχου, ιδιαίτερα σε μεγάλα και σύνθετα έργα.

Τα οφέλη των εφαρμογών αυτών γίνονται ακόμη μεγαλύτερα όταν η Τεχνητή Νοημοσύνη λειτουργεί σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες τεχνολογίες του οικοσυστήματος Construction 4.0. Η διασύνδεση με το Building Information Modeling (BIM) επιτρέπει τη σύνδεση των ποιοτικών ευρημάτων με συγκεκριμένα στοιχεία του

ψηφιακού μοντέλου, ενώ η αξιοποίηση αισθητήρων Internet of Things (IoT) και Digital Twins καθιστά δυνατή τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης του έργου και τον άμεσο εντοπισμό αποκλίσεων. Παράλληλα, οι πλατφόρμες Cloud Computing διευκολύνουν τη συγκέντρωση, την αποθήκευση και την ανταλλαγή των σχετικών δεδομένων μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων, δημιουργώντας ένα ενιαίο περιβάλλον διαχείρισης ποιότητας.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει η Τεχνητή Νοημοσύνη, η εφαρμογή της στη διαχείριση ποιότητας εξακολουθεί να συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Η αξιοπιστία των αλγορίθμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα, την πληρότητα και την ομοιογένεια των διαθέσιμων δεδομένων, ενώ η έλλειψη τυποποιημένων μορφών τεκμηρίωσης δυσχεραίνει την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων. Επιπλέον, η αποτελεσματική αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών προϋποθέτει επαρκείς υπολογιστικούς πόρους, εξειδικευμένες γνώσεις και οργανωσιακές αλλαγές, ώστε οι εφαρμογές AI να ενσωματωθούν ουσιαστικά στις καθημερινές διαδικασίες των κατασκευαστικών οργανισμών. Οι Zhang et al. (2022) επισημαίνουν ακόμη ότι η περαιτέρω βελτίωση των συστημάτων απαιτεί μεγαλύτερα σύνολα εκπαιδευτικών δεδομένων και στενότερη διασύνδεση των μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης με διαδικασίες αυτόματου ελέγχου συμμόρφωσης προς τα τεχνικά πρότυπα και τους ισχύοντες κανονισμούς.

Από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη μετασχηματίζει τη διαχείριση ποιότητας από μια διαδικασία που βασίζεται κυρίως σε χειροκίνητες επιθεωρήσεις και εκ των υστέρων ελέγχους σε ένα δυναμικό και προληπτικό σύστημα συνεχούς παρακολούθησης. Η αξιοποίηση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης κειμένου, υπολογιστικής όρασης και μηχανικής μάθησης επιτρέπει τον ταχύτερο εντοπισμό προβλημάτων, ενισχύει την αξιοπιστία των επιθεωρήσεων και βελτιώνει την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Ως αποτέλεσμα, συμβάλλει ουσιαστικά στη διασφάλιση της ποιότητας και στη συνολική βελτίωση της απόδοσης των σύγχρονων τεχνικών έργων.

2.5.6 Υγεία και ασφάλεια

Η υγεία και η ασφάλεια αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της διοίκησης τεχνικών έργων, καθώς ο κατασκευαστικός κλάδος εξακολουθεί να συγκαταλέγεται μεταξύ των επαγγελματικών δραστηριοτήτων με τα υψηλότερα ποσοστά εργατικών ατυχημάτων και επαγγελματικών κινδύνων (Lingard, 2013). Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής κανονισμών ασφαλείας, της εκπαίδευσης του προσωπικού και της υιοθέτησης οργανωμένων συστημάτων διαχείρισης, η αποτελεσματικότητα των παραδοσιακών προσεγγίσεων εξακολουθεί να περιορίζεται από την πολυπλοκότητα των εργοταξίων, τις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες εργασίας και την αδυναμία συνεχούς επιτήρησης όλων των δραστηριοτήτων (Zhou et al., 2015).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προσφέρει μια διαφορετική προσέγγιση στη διαχείριση της ασφάλειας, μετατοπίζοντας το ενδιαφέρον από την αντιμετώπιση των ατυχημάτων μετά την εκδήλωσή τους προς την πρόληψη και την έγκαιρη αναγνώριση των κινδύνων. Μέσω της επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, τα οποία προέρχονται από αναφορές ατυχημάτων, αισθητήρες, κάμερες, επιθεωρήσεις και καθημερινές δραστηριότητες του εργοταξίου, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να εντοπίζουν επαναλαμβανόμενα πρότυπα κινδύνου, να προβλέπουν πιθανές επικίνδυνες καταστάσεις και να υποστηρίζουν τη λήψη προληπτικών μέτρων πριν συμβεί κάποιο ατύχημα (Rabbi & Jeelani, 2024).

Στη συστηματική ανασκόπησή τους, οι Rabbi και Jeelani (2024) ταξινομούν τις εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση της ασφάλειας σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή των δεδομένων που επεξεργάζονται: δεδομένα κειμένου (text data), οπτικά δεδομένα (visual data) και ακουστικά δεδομένα (audio data). Η διάκριση αυτή αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο τα σύγχρονα συστήματα ΑΙ αξιοποιούν διαφορετικές πηγές πληροφόρησης για την αναγνώριση κινδύνων και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σχετικά με την ασφάλεια στο εργοτάξιο.

Από τις παραπάνω κατηγορίες, η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision) αποτελεί σήμερα την πιο διαδεδομένη εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στον τομέα της ασφάλειας των κατασκευών. Αξιοποιώντας κάμερες υψηλής ανάλυσης και

αλγορίθμους βαθιάς μάθησης, τα συστήματα μπορούν να αναγνωρίζουν σε πραγματικό χρόνο εργαζομένους, εξοπλισμό, μηχανήματα και επικίνδυνες ζώνες εργασίας, να ελέγχουν τη σωστή χρήση των Μέσων Ατομικής Προστασίας (PPE), να εντοπίζουν επικίνδυνες συμπεριφορές ή παραβιάσεις των ζωνών ασφαλείας και να ειδοποιούν άμεσα τους υπεύθυνους του έργου (Seo et al., 2015· Fang et al., 2020· Paneru & Jeelani, 2021). Η συνεχής παρακολούθηση του εργοταξίου περιορίζει την αποκλειστική εξάρτηση από τις ανθρώπινες επιθεωρήσεις και επιτρέπει την ταχύτερη αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων.

Εξίσου σημαντική είναι η συμβολή της Επεξεργασίας Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP), η οποία επιτρέπει την ανάλυση μεγάλου όγκου μη δομημένων πληροφοριών, όπως αναφορές ατυχημάτων, δελτία επιθεώρησης, ημερολόγια έργου και αναφορές συμβάντων. Η αυτόματη εξαγωγή γνώσης από αυτά τα δεδομένα συμβάλλει στην αναγνώριση επαναλαμβανόμενων αιτιών ατυχημάτων, στη βελτίωση της διαδικασίας εκτίμησης κινδύνου και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της οργανωσιακής γνώσης που αποκτάται κατά την εκτέλεση των έργων (Ding et al., 2022· Wu et al., 2022). Παράλληλα, η ανάπτυξη των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs) δημιουργεί νέες δυνατότητες για την αυτοματοποίηση της διαχείρισης τεχνικών αναφορών και την ερμηνεία σύνθετης τεχνικής τεκμηρίωσης.

Τα τελευταία χρόνια ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η αξιοποίηση ακουστικών δεδομένων, όπως οι ήχοι μηχανημάτων, συναγερμών και δραστηριοτήτων του εργοταξίου. Αν και το πεδίο αυτό βρίσκεται ακόμη σε σχετικά πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές για την αυτόματη αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων μέσω της ανάλυσης ηχητικών προτύπων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου η οπτική παρακολούθηση είναι περιορισμένη.

Η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών αυτών αυξάνεται όταν η Τεχνητή Νοημοσύνη συνδυάζεται με άλλες τεχνολογίες του οικοσυστήματος Construction 4.0, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), οι φορητοί αισθητήρες (wearables), οι ρομποτικές εφαρμογές και οι τεχνολογίες Internet of Things (IoT). Ο συνδυασμός τους επιτρέπει τη συνεχή συλλογή

δεδομένων από το εργοτάξιο και τη δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης της ασφάλειας, τα οποία παρέχουν ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο και υποστηρίζουν αποτελεσματικότερα τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Abioye et al., 2021· Rabbi & Jeelani, 2024).

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες αυτές, εξακολουθούν να υπάρχουν παράγοντες που περιορίζουν την ευρύτερη εφαρμογή τους. Η αξιοπιστία των αλγορίθμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα ποιοτικών και σωστά επισημασμένων δεδομένων εκπαίδευσης. Επιπλέον, τα συστήματα Υπολογιστικής Όρασης επηρεάζονται από παράγοντες όπως ο φωτισμός, οι αποκρύψεις αντικειμένων, οι διαφορετικές γωνίες λήψης και η ιδιαίτερη πολυπλοκότητα του εργοταξιακού περιβάλλοντος, ενώ τα συστήματα ανάλυσης ήχου δυσκολεύονται να διακρίνουν κρίσιμα ηχητικά γεγονότα μέσα στον έντονο περιβαλλοντικό θόρυβο. Αντίστοιχα, οι εφαρμογές NLP καλούνται να διαχειριστούν την εξειδικευμένη τεχνική ορολογία και τη μεγάλη ανομοιογένεια των εγγράφων που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό κλάδο.

Οι Rabbi και Jeelani (2024) εκτιμούν ότι η μελλοντική έρευνα θα επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων που θα συνδυάζουν ταυτόχρονα δεδομένα κειμένου, εικόνας και ήχου, αξιοποιώντας προηγμένες τεχνικές βαθιάς μάθησης και Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα. Παράλληλα, ιδιαίτερη έμφαση αναμένεται να δοθεί στην ανάπτυξη εφαρμογών προγνωστικής ανάλυσης (predictive analytics), στην αυτοματοποίηση του ελέγχου συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ασφαλείας, καθώς και στην αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με την προστασία προσωπικών δεδομένων και την αλγοριθμική μεροληψία. Η αντιμετώπιση των ζητημάτων αυτών θεωρείται καθοριστική για την ασφαλή, αξιόπιστη και κοινωνικά αποδεκτή ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στα σύγχρονα κατασκευαστικά έργα.

2.5.7 Παρακολούθηση προόδου έργου

Η παρακολούθηση της προόδου αποτελεί μία από τις βασικές λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων, καθώς επιτρέπει τη συνεχή σύγκριση της πραγματικής

εξέλιξης των εργασιών με τον αρχικό σχεδιασμό. Μέσα από τον έγκαιρο εντοπισμό αποκλίσεων, οι διαχειριστές έργων μπορούν να λαμβάνουν διορθωτικές αποφάσεις, να αναπροσαρμόζουν τον προγραμματισμό και να περιορίζουν τις συνέπειες πιθανών καθυστερήσεων ή υπερβάσεων κόστους. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα των σύγχρονων έργων, τόσο δυσκολότερο γίνεται να εξασφαλιστεί έγκαιρη και αντικειμενική εικόνα της πραγματικής προόδου με τις συμβατικές μεθόδους, γεγονός που ενισχύει το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης (Pal et al., 2024).

Στην πράξη, η παρακολούθηση της προόδου βασίζεται κυρίως σε επιτόπιες επιθεωρήσεις, ημερήσιες αναφορές εργασιών και χειροκίνητη ενημέρωση των χρονοδιαγραμμάτων. Παρότι οι πρακτικές αυτές εξακολουθούν να εφαρμόζονται ευρέως, παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς. Η διαδικασία είναι συχνά χρονοβόρα, απαιτεί σημαντική ανθρώπινη συμμετοχή και επηρεάζεται από την υποκειμενική κρίση όσων πραγματοποιούν τις εκτιμήσεις. Επιπλέον, η συλλογή και επεξεργασία των στοιχείων δεν γίνεται πάντοτε με την απαιτούμενη ταχύτητα, γεγονός που δυσχεραίνει την έγκαιρη λήψη αποφάσεων, ιδιαίτερα σε έργα μεγάλης κλίμακας ή αυξημένης πολυπλοκότητας (Pal et al., 2024).

Η Τεχνητή Νοημοσύνη μεταβάλλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο παρακολουθείται η εξέλιξη ενός έργου. Σύγχρονες εφαρμογές αξιοποιούν τεχνικές Υπολογιστικής Όρασης (Computer Vision) και Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) για την αυτόματη ανάλυση εικόνων και βίντεο που συλλέγονται από το εργοτάξιο μέσω καμερών, μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones) ή άλλων συστημάτων καταγραφής. Τα δεδομένα αυτά συνδυάζονται με ψηφιακά μοντέλα Building Information Modeling (BIM), επιτρέποντας τη σύγκριση της πραγματικής κατάστασης με τον αρχικό σχεδιασμό και την αυτόματη ενημέρωση της προόδου, περιορίζοντας σημαντικά την ανάγκη χειροκίνητης καταγραφής (Pal et al., 2024).

Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις που καταγράφονται στη βιβλιογραφία είναι η μετάβαση από την παρακολούθηση σε επίπεδο δομικών στοιχείων (element-level monitoring) στην παρακολούθηση σε επίπεδο επιμέρους δραστηριοτήτων του χρονοδιαγράμματος (activity-level monitoring). Οι παλαιότερες προσεγγίσεις

μπορούσαν συνήθως να διαπιστώσουν μόνο αν ένα δομικό στοιχείο είχε ολοκληρωθεί, χωρίς όμως να αποτυπώνουν το πραγματικό στάδιο εξέλιξης των επιμέρους εργασιών. Αντίθετα, οι σύγχρονες μέθοδοι, οι οποίες αξιοποιούν τεχνικές σημασιολογικής τμηματοποίησης εικόνων (semantic segmentation) και αλγορίθμους βαθιάς μάθησης, επιτρέπουν την εκτίμηση του ποσοστού ολοκλήρωσης συγκεκριμένων δραστηριοτήτων, όπως η τοποθέτηση οπλισμού, η κατασκευή ξυλοτύπων ή οι εργασίες σκυροδέτησης. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε σημαντικά ακριβέστερη αποτύπωση της πραγματικής προόδου του έργου (Pal et al., 2024).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα Activity-Level Progress Monitoring System (ALPMS), το οποίο ανέπτυξαν οι Pal et al. (2024). Το σύστημα συνδυάζει φωτογραφίες εργοταξίου, τετραδιάστατα μοντέλα BIM (4D BIM), τρισδιάστατα νέφη σημείων (point clouds), τεχνικές Υπολογιστικής Όρασης και νευρωνικά δίκτυα βαθιάς μάθησης για την αυτόματη εκτίμηση της προόδου των εργασιών. Μέσω της τρισδιάστατης ανακατασκευής του εργοταξίου, συγκρίνει την υφιστάμενη κατάσταση με το προγραμματισμένο μοντέλο και υπολογίζει το ποσοστό ολοκλήρωσης κάθε δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα προβάλλονται τόσο πάνω στο ψηφιακό μοντέλο BIM όσο και στα νέφη σημείων, διευκολύνοντας την κατανόηση της προόδου από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη.

Η εφαρμογή του συστήματος σε πραγματικά κατασκευαστικά έργα έδειξε ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς το μέσο απόλυτο σφάλμα στην εκτίμηση της προόδου ήταν μικρότερο από 6%, γεγονός που καταδεικνύει την υψηλή ακρίβεια της μεθόδου. Παράλληλα, τα δεδομένα που παράγονται μπορούν να αξιοποιηθούν για την αυτόματη ενημέρωση των χρονοδιαγραμμάτων, την εφαρμογή της μεθόδου Earned Value Management (EVM) και την έγκαιρη πρόβλεψη πιθανών αποκλίσεων από τον αρχικό σχεδιασμό (Pal et al., 2024).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης συμβάλλει, επομένως, στη δημιουργία ενός περισσότερο αυτοματοποιημένου, αντικειμενικού και αξιόπιστου συστήματος παρακολούθησης της προόδου. Η συνεχής συλλογή και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση καθυστερήσεων, την ακριβέστερη αξιολόγηση της απόδοσης των εργασιών και την καλύτερη υποστήριξη

της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σχετικά με την ανακατανομή πόρων ή την αναθεώρηση του προγραμματισμού. Σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως το BIM, η Υπολογιστική Όραση και η Βαθιά Μάθηση, η Τεχνητή Νοημοσύνη διαμορφώνει ένα περισσότερο ψηφιοποιημένο και δυναμικό περιβάλλον παρακολούθησης των κατασκευαστικών έργων, το οποίο αναμένεται να αποτελέσει βασικό χαρακτηριστικό της μελλοντικής πρακτικής στη διοίκηση έργων (Pal et al., 2024).

2.5.8 Διαχείριση εγγράφων και συμβάσεων

Η αποτελεσματική διαχείριση εγγράφων και συμβάσεων αποτελεί βασική λειτουργία της διοίκησης τεχνικών έργων, καθώς επηρεάζει άμεσα την ομαλή εκτέλεση των εργασιών, τη διαχείριση των κινδύνων και την αποφυγή συμβατικών διαφορών. Κατά τη διάρκεια ενός σύγχρονου κατασκευαστικού έργου παράγεται μεγάλος όγκος πληροφοριών, όπως συμβάσεις, τεχνικές προδιαγραφές, αλληλογραφία, αιτήματα πληροφοριών (Requests for Information – RFIs), εντολές αλλαγών (Variation Orders), ημερολόγια έργου, πρακτικά συσκέψεων και πλήθος άλλων διοικητικών εγγράφων. Η επεξεργασία αυτού του υλικού με συμβατικές διαδικασίες είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και αυξάνει την πιθανότητα παραλείψεων ή λανθασμένων ερμηνειών, ιδιαίτερα σε έργα μεγάλης πολυπλοκότητας (Dikmen et al., 2025).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης μετασχηματίζει τον τρόπο διαχείρισης αυτών των πληροφοριών, βασιζόμενη κυρίως σε τεχνικές Επεξεργασίας Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP) και Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning – ML). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπου η αναζήτηση κρίσιμων πληροφοριών πραγματοποιείται χειροκίνητα, τα σύγχρονα συστήματα μπορούν να αναλύουν το περιεχόμενο των εγγράφων, να αναγνωρίζουν σημαντικές συμβατικές διατάξεις και να οργανώνουν αυτόματα τις πληροφορίες ανάλογα με τη σημασία τους. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται αισθητά ο χρόνος επεξεργασίας, ενώ παράλληλα ενισχύονται η συνέπεια και η αξιοπιστία της διαχείρισης της πληροφορίας (Dikmen et al., 2025).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στην ανάλυση των κατασκευαστικών συμβάσεων. Οι συμβάσεις αποτελούν το βασικό νομικό και διοικητικό πλαίσιο κάθε έργου, καθώς καθορίζουν τις υποχρεώσεις και τα δικαιώματα των συμβαλλομένων, την κατανομή των κινδύνων, τις διαδικασίες πληρωμής, τις συμβατικές προθεσμίες και τους μηχανισμούς επίλυσης διαφορών. Η πολυπλοκότητα των κειμένων αυτών, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο που συνήθως διατίθεται κατά την προετοιμασία μιας προσφοράς, καθιστά δύσκολη την πλήρη αξιολόγησή τους αποκλειστικά από ανθρώπους. Η αξιοποίηση τεχνικών NLP επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση συμβατικών όρων που σχετίζονται με υποχρεώσεις, δικαιώματα και κινδύνους, διευκολύνοντας σημαντικά τη διαδικασία αξιολόγησης των συμβάσεων (Dikmen et al., 2025).

Στην έρευνά τους, οι Dikmen et al. (2025) ανέπτυξαν ένα σύστημα αυτοματοποιημένης ανάλυσης συμβάσεων, αξιοποιώντας τεχνικές NLP και Μηχανικής Μάθησης σε πρότυπες συμβάσεις FIDIC αλλά και σε πραγματικές συμβάσεις κατασκευαστικών έργων. Το σύστημα ταξινομεί αυτόματα κάθε πρόταση σε πέντε βασικές κατηγορίες —επικεφαλίδες, ορισμούς, υποχρεώσεις, δικαιώματα και κινδύνους— ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζει το συμβαλλόμενο μέρος στο οποίο αναφέρεται κάθε διάταξη, δηλαδή τον Κύριο του Έργου (Employer), τον Ανάδοχο (Contractor) ή και τα δύο μέρη από κοινού. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η ταχεία εξαγωγή κρίσιμων πληροφοριών που σχετίζονται με τη διαχείριση κινδύνων και την προετοιμασία της προσφοράς, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για την ανασκόπηση των συμβάσεων.

Η μελέτη συγκρίνει διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας φυσικής γλώσσας και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, μεταξύ των οποίων οι Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), Recurrent Neural Networks (RNN) και τα μοντέλα BERT. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι προσεγγίσεις βαθιάς μάθησης και ιδιαίτερα το BERT απέδωσαν καλύτερα στην κατανόηση του συμφραζομένου των συμβατικών κειμένων. Με την εφαρμογή συνδυαστικών τεχνικών ταξινόμησης (ensemble learning), το προτεινόμενο σύστημα πέτυχε ακρίβεια περίπου 89% στην αναγνώριση του τύπου των συμβατικών προτάσεων και περίπου 83% στον προσδιορισμό του συμβαλλόμενου

μέρους στο οποίο αυτές αναφέρονται, επιβεβαιώνοντας ότι οι τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τη διαδικασία ανασκόπησης συμβάσεων (Dikmen et al., 2025).

Οι δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν περιορίζονται μόνο στις συμβάσεις, αλλά επεκτείνονται συνολικά στη διαχείριση της τεκμηρίωσης ενός έργου. Σύγχρονα πληροφοριακά συστήματα μπορούν να ταξινομούν αυτόματα τα εισερχόμενα έγγραφα, να εντοπίζουν σχετική αλληλογραφία, να αναζητούν αντίστοιχες συμβατικές προβλέψεις, να δημιουργούν περιλήψεις εκτενών εγγράφων και να υποστηρίζουν τη σύνταξη τεχνικών επιστολών, αναφορών και συμβατικών απαντήσεων. Οι δυνατότητες αυτές βελτιώνουν την οργάνωση της πληροφορίας και διευκολύνουν την άμεση πρόσβαση στα δεδομένα που απαιτούνται για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρουν οι εφαρμογές αυτές, η πλήρης αυτοματοποίηση της διαχείρισης συμβάσεων εξακολουθεί να παρουσιάζει δυσκολίες. Η πολυπλοκότητα της νομικής γλώσσας, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ διαφορετικών τύπων συμβάσεων και η ανάγκη κατανόησης του ευρύτερου συμβατικού πλαισίου καθιστούν απαραίτητη την ανθρώπινη κρίση σε κρίσιμες αποφάσεις. Οι Dikmen et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα γενικής χρήσης Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs), όταν χρησιμοποιούνται χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση, ενδέχεται να παράγουν ανακριβείς ή παραπλανητικές απαντήσεις (hallucinations). Αντίθετα, μοντέλα όπως το BERT, τα οποία έχουν εκπαιδευτεί ειδικά σε κατασκευαστικές συμβάσεις, εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερη αξιοπιστία στην επεξεργασία τεχνικών και νομικών εγγράφων.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία δείχνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη μεταβάλλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται, αναλύονται και αξιοποιούνται οι πληροφορίες στα τεχνικά έργα. Η αυτοματοποίηση της ανασκόπησης συμβάσεων, η ταχύτερη αναζήτηση κρίσιμων πληροφοριών και η αποτελεσματικότερη αναγνώριση συμβατικών κινδύνων ενισχύουν τη διοίκηση των έργων και υποστηρίζουν περισσότερο τεκμηριωμένες αποφάσεις, καθιστώντας τις

εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για το σύγχρονο Construction Project Management.

2.5.9 Υποστήριξη λήψης αποφάσεων

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί τον πυρήνα της διοίκησης τεχνικών έργων, καθώς επηρεάζει άμεσα την επίτευξη των στόχων ενός έργου ως προς το κόστος, τον χρόνο, την ποιότητα και την ασφάλεια. Σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός έργου, οι διαχειριστές καλούνται να αξιολογούν μεγάλο όγκο πληροφοριών που σχετίζονται με τον προγραμματισμό, τη διαθεσιμότητα των πόρων, τους κινδύνους, τις συμβατικές απαιτήσεις και την πραγματική πρόοδο των εργασιών, λαμβάνοντας αποφάσεις συχνά υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων κατασκευαστικών έργων καθιστά ολοένα δυσκολότερη τη λήψη αποτελεσματικών αποφάσεων αποκλειστικά βάσει της εμπειρίας των στελεχών και των παραδοσιακών εργαλείων διαχείρισης (Soni, 2025).

Η Τεχνητή Νοημοσύνη αλλάζει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο υποστηρίζεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας τη μετάβαση από αντιδραστικές πρακτικές διαχείρισης σε περισσότερο προληπτικές και προσαρμοστικές προσεγγίσεις. Σύμφωνα με τον Soni (2025), τα σύγχρονα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων αξιοποιούν αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, προγνωστικής ανάλυσης (Predictive Analytics) και ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning), ώστε να επεξεργάζονται μεγάλους όγκους δεδομένων και να παρέχουν τεκμηριωμένες προτάσεις για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων. Ως αποτέλεσμα, οι αποφάσεις βασίζονται ολοένα περισσότερο σε αντικειμενικά δεδομένα και λιγότερο σε υποκειμενικές εκτιμήσεις ή στη διαίσθηση των στελεχών.

Καθοριστικό στοιχείο των ευφών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων είναι η δυνατότητά τους να συνδυάζουν πληροφορίες που προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Δεδομένα από συστήματα Building Information Modeling (BIM), αισθητήρες Internet of Things (IoT), πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης έργων (Project Management Information Systems – PMIS), ιστορικά αρχεία προηγούμενων έργων και πληροφορίες πραγματικού χρόνου ενοποιούνται σε ένα ενιαίο πληροφοριακό

περιβάλλον. Η ολοκληρωμένη αυτή εικόνα επιτρέπει στους αλγορίθμους να εντοπίζουν πρότυπα, να προβλέπουν πιθανές αποκλίσεις και να υποστηρίζουν αποφάσεις που αφορούν τον προγραμματισμό, τη διαχείριση κόστους, την κατανομή των πόρων και τη διαχείριση κινδύνων (Soni, 2025).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αξιοποίηση της προγνωστικής ανάλυσης (Predictive Analytics), η οποία δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της πιθανότητας εμφάνισης μελλοντικών γεγονότων πριν αυτά εκδηλωθούν. Μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης, τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης αναλύουν τόσο ιστορικά όσο και τρέχοντα δεδομένα, προκειμένου να προβλέψουν πιθανές καθυστερήσεις, υπερβάσεις κόστους, ελλείψεις πόρων ή άλλες αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιασμό. Οι προβλέψεις αυτές επιτρέπουν στους διαχειριστές να λαμβάνουν έγκαιρα διορθωτικά μέτρα, περιορίζοντας την αβεβαιότητα και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του έργου (Soni, 2025).

Εξίσου σημαντικά είναι τα προσαρμοστικά συστήματα λήψης αποφάσεων (adaptive decision-making systems), τα οποία αναθεωρούν δυναμικά τις προτεινόμενες ενέργειες καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες του έργου. Όπως επισημαίνει ο Soni (2025), οι τεχνικές Reinforcement Learning επιτρέπουν στα συστήματα να μαθαίνουν συνεχώς από τα νέα δεδομένα που παράγονται κατά την υλοποίηση του έργου, προσαρμόζοντας τον προγραμματισμό, την κατανομή των πόρων και τις στρατηγικές διαχείρισης κινδύνων χωρίς να απαιτείται πλήρης ανασχεδιασμός. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει σημαντικά την ευελιξία των οργανισμών απέναντι σε απρόβλεπτες μεταβολές, όπως διακυμάνσεις στις τιμές των υλικών, καθυστερήσεις στις προμήθειες ή αλλαγές στις καιρικές συνθήκες.

Σημαντικό εργαλείο προς αυτή την κατεύθυνση αποτελούν τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support Systems – DSS) που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη. Τα συστήματα αυτά συγκεντρώνουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές, πραγματοποιούν αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο, αξιολογούν εναλλακτικά σενάρια και παρουσιάζουν στους διαχειριστές τεκμηριωμένες επιλογές δράσης. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η ποιότητα των αποφάσεων, περιορίζεται η υποκειμενικότητα

και διευκολύνεται η αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των σύνθετων προβλημάτων που χαρακτηρίζουν τα μεγάλα τεχνικά έργα (Soní, 2025).

Η συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη λήψη αποφάσεων δεν περιορίζεται, ωστόσο, σε μία μόνο λειτουργία της διοίκησης έργων. Αντίθετα, προκύπτει από τον συνδυασμό των πληροφοριών που παράγονται σε όλα τα επιμέρους πεδία διαχείρισης. Δεδομένα που σχετίζονται με τον χρονικό προγραμματισμό, το κόστος, τους κινδύνους, τους πόρους, την ποιότητα, την υγεία και ασφάλεια, την παρακολούθηση της προόδου και τη διαχείριση συμβάσεων συγκεντρώνονται και αναλύονται από τα ευφυή πληροφοριακά συστήματα, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον υποστήριξης αποφάσεων. Η ενοποίηση αυτή αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του ψηφιακού μετασχηματισμού της διοίκησης τεχνικών έργων και ενισχύει σημαντικά την ικανότητα των οργανισμών να λαμβάνουν περισσότερο τεκμηριωμένες και αποτελεσματικές αποφάσεις.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει η Τεχνητή Νοημοσύνη, η αποτελεσματική αξιοποίησή της εξακολουθεί να εξαρτάται από την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, τη διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων και την ερμηνευσιμότητα των αλγορίθμων. Ο Soní (2025) επισημαίνει ότι η επιτυχής εφαρμογή ευφύων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων προϋποθέτει επενδύσεις σε κατάλληλες ψηφιακές υποδομές, ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων από τους επαγγελματίες του κλάδου και οργανωσιακή ετοιμότητα για την ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στις καθημερινές διαδικασίες διοίκησης των έργων.

Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη εξελίσσεται σε στρατηγικό εργαλείο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η συνδυασμένη αξιοποίηση προγνωστικών μοντέλων, προσαρμοστικών αλγορίθμων και ευφύων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων επιτρέπει στους οργανισμούς να διαχειρίζονται αποτελεσματικότερα την αβεβαιότητα, να βελτιστοποιούν τη χρήση των διαθέσιμων πόρων και να λαμβάνουν περισσότερο τεκμηριωμένες αποφάσεις σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός έργου.

2.6 Η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη στα τεχνικά έργα

Η ραγδαία πρόοδος της Τεχνητής Νοημοσύνης τα τελευταία χρόνια οδήγησε στην ανάπτυξη της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (Generative Artificial Intelligence – GenAI), η οποία θεωρείται μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις της σύγχρονης ψηφιακής εποχής. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης, που επικεντρώνονται κυρίως στην ταξινόμηση δεδομένων, την πρόβλεψη ή την αναγνώριση προτύπων, η GenAI έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί νέο περιεχόμενο, όπως κείμενα, εικόνες, βίντεο, λογισμικό και άλλες μορφές ψηφιακής πληροφορίας, αξιοποιώντας τόσο τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και τις οδηγίες που παρέχει ο χρήστης (Taiwo et al., 2025).

Η λειτουργία της βασίζεται κυρίως στα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs), όπως η οικογένεια μοντέλων GPT, τα οποία εκπαιδεύονται σε ιδιαίτερα μεγάλους όγκους δεδομένων και μπορούν να κατανοούν τη φυσική γλώσσα, να εξάγουν πληροφορίες, να συνοψίζουν κείμενα και να παράγουν τεκμηριωμένες απαντήσεις. Παράλληλα, η εξέλιξη της GenAI δεν περιορίζεται πλέον αποκλειστικά στην παραγωγή κειμένου, αλλά επεκτείνεται σε πολυτροπικά (multimodal) συστήματα, τα οποία επεξεργάζονται συνδυαστικά κείμενο, εικόνες, σχέδια, βίντεο και άλλες μορφές δεδομένων, δημιουργώντας νέες δυνατότητες αξιοποίησης στον κατασκευαστικό κλάδο (Taiwo et al., 2025).

Παρότι η εφαρμογή της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης στις κατασκευές βρίσκεται ακόμη σε σχετικά πρώιμο στάδιο, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει το ιδιαίτερα μεγάλο εύρος των δυνατοτήτων της. Οι Taiwo et al. (2025), μέσα από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και έρευνα Delphi με τη συμμετοχή ειδικών του κλάδου, κατέγραψαν συνολικά 76 πιθανές εφαρμογές της GenAI σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός τεχνικού έργου, καθώς και 18 βασικές προκλήσεις που συνδέονται με την υιοθέτησή της. Οι εφαρμογές αυτές εκτείνονται από τη φάση του σχεδιασμού μέχρι την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των έργων.

Κατά τη φάση του προγραμματισμού και του σχεδιασμού, η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να υποστηρίξει την αυτόματη σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών, τη δημιουργία εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων, την παραγωγή τρισδιάστατων

απεικονίσεων, την προετοιμασία παρουσιάσεων και την ανάπτυξη διαδραστικών μοντέλων έργου. Στη φάση της κατασκευής αξιοποιείται για την παραγωγή αναφορών προόδου, τη σύνταξη οδηγιών εργασίας, την τεκμηρίωση θεμάτων ασφάλειας, την οπτικοποίηση της εξέλιξης των εργασιών και τη δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού. Αντίστοιχα, κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων μπορεί να συμβάλει στη σύνταξη οδηγιών λειτουργίας, στην τεκμηρίωση εργασιών συντήρησης, στην παραγωγή αναφορών επιθεώρησης και στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της οργανωσιακής γνώσης (Taiwo et al., 2025).

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της GenAI είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης αξιοποίησης διαφορετικών μορφών δεδομένων. Σύμφωνα με τους Taiwo et al. (2025), τα σύγχρονα μοντέλα μπορούν να μετατρέπουν κείμενο σε εικόνα (text-to-image), εικόνα σε εικόνα (image-to-image), εικόνα σε κείμενο (image-to-text), εικόνα σε βίντεο (image-to-video), καθώς και να υποστηρίζουν πολλούς ακόμη συνδυασμούς εισόδου και εξόδου. Οι δυνατότητες αυτές αξιοποιούνται για τη δημιουργία αρχιτεκτονικών απεικονίσεων, την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων, την οπτικοποίηση της προόδου των εργασιών, την ανάπτυξη εκπαιδευτικών βίντεο και την εξαγωγή πληροφοριών από φωτογραφίες ή σχέδια εργοταξίου, διευκολύνοντας την επικοινωνία και ενισχύοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων κατά την υλοποίηση των έργων.

Ιδιαίτερα σημαντική εφαρμογή της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης αφορά τη διαχείριση της τεχνικής και συμβατικής πληροφορίας. Οι Taiwo et al. (2025) ανέπτυξαν και αξιολόγησαν ένα σύστημα βασισμένο στην τεχνική Retrieval-Augmented Generation (RAG), η οποία συνδυάζει τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα με μηχανισμούς ανάκτησης πληροφοριών από εξειδικευμένες βάσεις γνώσης. Στο πλαίσιο της μελέτης, το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για την αναζήτηση και ερμηνεία όρων συμβάσεων κατασκευαστικών έργων μέσω φυσικής γλώσσας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση της τεχνικής RAG βελτίωσε την ποιότητα των απαντήσεων κατά 5,2%, τη συνάφεια κατά 9,4% και την επαναληψιμότητα κατά 4,8% σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο GPT-4, ενώ παράλληλα περιόρισε την παραγωγή λανθασμένων ή ανυπόστατων πληροφοριών (hallucinations).

Παρά τις σημαντικές δυνατότητές της, η εφαρμογή της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις. Μεταξύ των σημαντικότερων συγκαταλέγονται η αξιοπιστία των παραγόμενων αποτελεσμάτων, η προστασία εμπιστευτικών δεδομένων, η ανάγκη προσαρμογής των μοντέλων στις ιδιαιτερότητες του κατασκευαστικού κλάδου, καθώς και ζητήματα δεοντολογίας, διαφάνειας και αποδοχής από τους επαγγελματίες του χώρου. Για τον λόγο αυτό, οι Taiwo et al. (2025) προτείνουν την ανάπτυξη εξειδικευμένων μοντέλων που εκπαιδεύονται στα δεδομένα κάθε οργανισμού, σε συνδυασμό με διαδικασίες επαλήθευσης των αποτελεσμάτων και την εφαρμογή κατάλληλων μηχανισμών διακυβέρνησης της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη βιβλιογραφία είναι ότι η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους βασικότερους μοχλούς του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η ικανότητά της να δημιουργεί νέο περιεχόμενο, να υποστηρίζει την επεξεργασία σύνθετης τεχνικής πληροφορίας και να αυτοματοποιεί γνωσιακές διαδικασίες δημιουργεί νέες προοπτικές για τη διοίκηση τεχνικών έργων, ενισχύοντας την παραγωγικότητα, τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και τη διαχείριση της γνώσης σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός έργου (Taiwo et al., 2025).

2.6.1 Σύγχρονες εφαρμογές

Η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence – GenAI) μεταβάλλει σταδιακά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και διαχειρίζονται τα τεχνικά έργα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης, οι οποίες εστιάζουν κυρίως στην πρόβλεψη ή στην ταξινόμηση δεδομένων, η GenAI μπορεί να δημιουργεί νέο περιεχόμενο και να υποστηρίζει τη διαχείριση σύνθετης τεχνικής γνώσης, προσφέροντας σημαντικές δυνατότητες αυτοματοποίησης γνωσιακών διαδικασιών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου (Taiwo et al., 2025).

Οι Taiwo et al. (2025) επισημαίνουν ότι οι εφαρμογές της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τόσο με βάση το είδος του παραγόμενου περιεχομένου, όπως κείμενο, εικόνες ή βίντεο, όσο και σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε φάσης ενός τεχνικού έργου. Η ανάπτυξη σύγχρονων πολυτροπικών (multimodal) μοντέλων, τα οποία επεξεργάζονται ταυτόχρονα διαφορετικές μορφές δεδομένων, διευρύνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας, επιτρέποντας τη χρήση της από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού μέχρι τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων.

Κατά τη φάση του σχεδιασμού, η GenAI μπορεί να υποστηρίζει τη σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών, την παραγωγή εκθέσεων και τεχνικών περιγραφών, τη δημιουργία εναλλακτικών σχεδιαστικών λύσεων, καθώς και την ανάπτυξη αρχιτεκτονικών απεικονίσεων, τρισδιάστατων μοντέλων και παρουσιάσεων. Παράλληλα, διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών μέσω της αυτόματης δημιουργίας περιλήψεων συναντήσεων, τεχνικών οδηγιών και αναφορών, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για τη σύνταξη και την επεξεργασία σχετικής τεκμηρίωσης.

Κατά την εκτέλεση του έργου, οι εφαρμογές της επεκτείνονται στην υποστήριξη της διαχείρισης του εργοταξίου και των διοικητικών διαδικασιών. Η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να συντάσσει ημερήσιες και εβδομαδιαίες αναφορές προόδου, να δημιουργεί πρακτικά συναντήσεων, να παράγει οδηγίες εργασίας, να οργανώνει την τεχνική τεκμηρίωση και να αναπτύσσει εκπαιδευτικό υλικό για το προσωπικό. Επιπλέον, αξιοποιείται για την αυτόματη δημιουργία παρουσιάσεων, ενημερωτικών εγγράφων και οπτικοποιήσεων της προόδου, παρέχοντας στη διοίκηση του έργου σαφέστερη και ταχύτερη εικόνα της εξέλιξης των εργασιών.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν οι εφαρμογές που σχετίζονται με τη διαχείριση της τεχνικής γνώσης και των συμβατικών εγγράφων. Τα σύγχρονα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs) επιτρέπουν την αναζήτηση πληροφοριών μέσα σε εκτεταμένες συλλογές τεχνικών προδιαγραφών, συμβάσεων, κανονισμών και προτύπων μέσω ερωτημάτων σε φυσική γλώσσα, περιορίζοντας σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για τον εντοπισμό κρίσιμων πληροφοριών. Η δυνατότητα αυτή αποκτά

ιδιαίτερη σημασία σε σύνθετα τεχνικά έργα, όπου η αποτελεσματική αξιοποίηση της διαθέσιμης γνώσης επηρεάζει άμεσα την ποιότητα των αποφάσεων και συμβάλλει στον περιορισμό συμβατικών σφαλμάτων (Taiwo et al., 2025).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη συστημάτων Retrieval-Augmented Generation (RAG), τα οποία συνδυάζουν τις δυνατότητες των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων με μηχανισμούς ανάκτησης πληροφοριών από εξειδικευμένες βάσεις γνώσης. Στη μελέτη των Taiwo et al. (2025), αναπτύχθηκε ένα τέτοιο σύστημα για την αναζήτηση και ερμηνεία όρων συμβάσεων κατασκευαστικών έργων μέσω φυσικής γλώσσας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα και τη συνάφεια των απαντήσεων, ενώ παράλληλα περιόρισε την εμφάνιση των λεγόμενων «παραισθήσεων» (hallucinations), δηλαδή της παραγωγής πληροφοριών που δεν υποστηρίζονται από τα πραγματικά δεδομένα του έργου.

Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ακόμη ότι οι δυνατότητες της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης εκτείνονται πολύ πέρα από τη διαχείριση εγγράφων. Η ενσωμάτωση πολυτροπικών μοντέλων καθιστά εφικτή την αυτόματη ανάλυση φωτογραφιών εργοταξίου, τη δημιουργία εκπαιδευτικών βίντεο, την οπτικοποίηση κατασκευαστικών διαδικασιών, καθώς και την ανάπτυξη διαδραστικών ψηφιακών βοηθών για μηχανικούς και στελέχη έργων. Οι εφαρμογές αυτές αναμένεται να διευρυνθούν ακόμη περισσότερο τα επόμενα χρόνια, καθώς αυξάνεται η διαθεσιμότητα εξειδικευμένων δεδομένων και αναπτύσσονται μοντέλα προσαρμοσμένα στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της κατασκευαστικής βιομηχανίας (Taiwo et al., 2025).

Η εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη εξελίσσεται από ένα εργαλείο αυτοματοποίησης σε έναν ολοένα πιο ουσιαστικό ψηφιακό συνεργάτη για τη διοίκηση τεχνικών έργων. Η δυνατότητά της να δημιουργεί τεχνικό περιεχόμενο, να υποστηρίζει την αναζήτηση γνώσης, να διευκολύνει την επικοινωνία και να διαχειρίζεται σύνθετες πληροφορίες δημιουργεί νέες προοπτικές για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, της ποιότητας των αποφάσεων και της διαχείρισης της γνώσης σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Παράλληλα, η βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η αξιοποίηση της GenAI λειτουργεί

συμπληρωματικά προς την εμπειρία και την επιστημονική κρίση των μηχανικών και δεν αποσκοπεί στην αντικατάστασή τους (Taiwo et al., 2025).

2.6.2 Δυνατότητες

Η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence – GenAI) δημιουργεί νέες προοπτικές για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της διαχείρισης τεχνικών έργων, διευρύνοντας σημαντικά τις δυνατότητες των παραδοσιακών εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης. Ενώ τα συμβατικά μοντέλα AI χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση δεδομένων, την πρόβλεψη ή την ταξινόμηση πληροφοριών, η GenAI μπορεί να παράγει νέο περιεχόμενο, να αλληλεπιδρά με τους χρήστες μέσω φυσικής γλώσσας και να υποστηρίζει γνωσιακές διαδικασίες υψηλότερου επιπέδου. Η εξέλιξη αυτή μεταβάλλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο παράγεται, οργανώνεται και αξιοποιείται η πληροφορία σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός τεχνικού έργου (Taiwo et al., 2025).

Σύμφωνα με τους Taiwo et al. (2025), μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης αφορά τη διαχείριση της γνώσης (knowledge management). Τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs) έχουν τη δυνατότητα να επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες τεχνικών εγγράφων, προτύπων, κανονισμών και συμβάσεων, να εντοπίζουν τις πληροφορίες που σχετίζονται με το εκάστοτε ερώτημα και να παρέχουν συνοπτικές αλλά τεκμηριωμένες απαντήσεις σε φυσική γλώσσα. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η πρόσβαση στη διαθέσιμη τεχνική γνώση, ενώ μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τον εντοπισμό κρίσιμων πληροφοριών από μηχανικούς και στελέχη διοίκησης έργων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης η συμβολή της GenAI στην αυτοματοποίηση της παραγωγής τεχνικού περιεχομένου. Τα σύγχρονα μοντέλα μπορούν να συντάσσουν τεχνικές εκθέσεις, αναφορές προόδου, πρακτικά συναντήσεων, τεχνικές οδηγίες, παρουσιάσεις και άλλο διοικητικό υλικό, αξιοποιώντας πληροφορίες που είναι ήδη διαθέσιμες στα πληροφοριακά συστήματα του έργου. Η λειτουργία αυτή δεν περιορίζεται στη δημιουργία κειμένου, αλλά περιλαμβάνει και τη σύνθεση πληροφοριών από πολλαπλές πηγές, συμβάλλοντας στη μείωση του διοικητικού

φόρτου και στην ταχύτερη ολοκλήρωση επαναλαμβανόμενων εργασιών (Taiwo et al., 2025).

Μία ακόμη σημαντική εφαρμογή αφορά την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων μέσω διαδραστικής επικοινωνίας. Οι χρήστες μπορούν να διατυπώνουν σύνθετα τεχνικά ερωτήματα σε φυσική γλώσσα και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες απαντήσεις που βασίζονται σε δεδομένα του έργου, τεχνικά πρότυπα ή εξειδικευμένες βάσεις γνώσης. Η προσέγγιση αυτή καθιστά την αλληλεπίδραση με τα πληροφοριακά συστήματα περισσότερο φυσική και άμεση, επιτρέποντας ακόμη και σε χρήστες χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού ή διαχείρισης βάσεων δεδομένων να αξιοποιούν αποτελεσματικά τις διαθέσιμες πληροφορίες.

Οι δυνατότητες αυτές ενισχύονται ακόμη περισσότερο με την ανάπτυξη πολυτροπικών (multimodal) μοντέλων, τα οποία μπορούν να επεξεργάζονται συνδυαστικά διαφορετικές μορφές δεδομένων, όπως κείμενο, εικόνες, σχέδια, τρισδιάστατα μοντέλα και βίντεο. Όπως επισημαίνουν οι Taiwo et al. (2025), η συγκεκριμένη δυνατότητα καθιστά εφικτή την αυτόματη δημιουργία οπτικοποιήσεων, την παραγωγή τεχνικών παρουσιάσεων, την ερμηνεία φωτογραφιών εργοταξίου και τη μετατροπή τεχνικών σχεδίων σε περιγραφικό κείμενο, ενισχύοντας σημαντικά την επικοινωνία και τη συνεργασία μεταξύ όλων των εμπλεκομένων.

Εξίσου σημαντική είναι η ενσωμάτωση της GenAI με άλλες τεχνολογίες του οικοσυστήματος Construction 4.0. Η διασύνδεσή της με συστήματα Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), Digital Twins και πλατφόρμες Cloud Computing επιτρέπει την αξιοποίηση δεδομένων πραγματικού χρόνου για την παραγωγή περισσότερο ακριβών και συνεχώς επικαιροποιημένων αποτελεσμάτων. Η ενοποίηση αυτή δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη ευφών ψηφιακών βοηθών που μπορούν να υποστηρίξουν καθημερινά τη διοίκηση έργων, παρέχοντας εξατομικευμένες πληροφορίες και προτάσεις ανάλογα με την εξέλιξη του έργου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η αξιοποίηση της τεχνικής Retrieval-Augmented Generation (RAG), η οποία αντιμετωπίζει έναν από τους σημαντικότερους

περιορισμούς των γενικών γλωσσικών μοντέλων, δηλαδή την πιθανότητα παραγωγής μη τεκμηριωμένων πληροφοριών. Σύμφωνα με τους Taiwo et al. (2025), η σύνδεση των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων με αξιόπιστες βάσεις γνώσης επιτρέπει την παραγωγή απαντήσεων που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα του έργου, βελτιώνοντας αισθητά την ακρίβεια, τη συνάφεια και τη συνολική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές που σχετίζονται με τη διαχείριση συμβάσεων, την τεχνική τεκμηρίωση και την υποστήριξη κρίσιμων διοικητικών αποφάσεων.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη δεν αποτελεί απλώς ακόμη ένα εργαλείο αυτοματοποίησης, αλλά μια τεχνολογία που διευρύνει ουσιαστικά τις δυνατότητες των πληροφοριακών συστημάτων των τεχνικών έργων. Η ικανότητά της να δημιουργεί νέο περιεχόμενο, να διαχειρίζεται σύνθετη γνώση, να αλληλεπιδρά μέσω φυσικής γλώσσας και να υποστηρίζει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων δημιουργεί νέες προοπτικές για αποτελεσματικότερη διοίκηση των έργων και αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στον περαιτέρω ψηφιακό μετασχηματισμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας (Taiwo et al., 2025).

2.6.3 Περιορισμοί

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence – GenAI), η αξιοποίησή της στα τεχνικά έργα συνοδεύεται από μια σειρά περιορισμών και προκλήσεων, οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ενσωμάτωσή της στις διαδικασίες διοίκησης έργων. Η αποτελεσματική εφαρμογή της δεν εξαρτάται μόνο από τις δυνατότητες των ίδιων των μοντέλων, αλλά και από παράγοντες όπως η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, η οργανωσιακή ετοιμότητα, το κανονιστικό πλαίσιο και η ικανότητα των χρηστών να αξιολογούν με κριτική σκέψη τα αποτελέσματα που παράγονται (Taiwo et al., 2025).

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα αφορά το φαινόμενο των «παραισθήσεων» (hallucinations), κατά το οποίο τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα παράγουν πληροφορίες που εμφανίζονται ως έγκυρες, χωρίς όμως να στηρίζονται σε πραγματικά δεδομένα ή

αξιόπιστες πηγές. Στο περιβάλλον των τεχνικών έργων, όπου οι αποφάσεις βασίζονται σε συμβάσεις, τεχνικές προδιαγραφές, κανονισμούς και πρότυπα, η παροχή ανακριβών πληροφοριών μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες τεχνικές ή συμβατικές αποφάσεις. Για τον λόγο αυτό, οι Taiwo et al. (2025) τονίζουν ότι κάθε πληροφορία που παράγεται από συστήματα GenAI θα πρέπει να ελέγχεται και να επαληθεύεται από εξειδικευμένους μηχανικούς ή άλλα αρμόδια στελέχη πριν αξιοποιηθεί στη λήψη κρίσιμων αποφάσεων.

Εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος της ποιότητας και της διαθεσιμότητας των δεδομένων. Τα μοντέλα Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης αποδίδουν καλύτερα όταν τροφοδοτούνται με αξιόπιστα, πλήρη και σωστά οργανωμένα δεδομένα. Στην πράξη, όμως, οι πληροφορίες που αφορούν ένα τεχνικό έργο βρίσκονται συνήθως καταναμημένες σε διαφορετικά πληροφοριακά συστήματα, ενώ σημαντικό μέρος της τεχνικής γνώσης παραμένει σε μη δομημένη μορφή, όπως σχέδια, τεχνικά έγγραφα, ηλεκτρονική αλληλογραφία ή πρακτικά συναντήσεων. Η ετερογένεια αυτή δυσκολεύει την αποτελεσματική αξιοποίηση των μοντέλων και επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παράγουν (Taiwo et al., 2025).

Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει η προσαρμογή των μοντέλων στις ιδιαιτερότητες του κατασκευαστικού κλάδου. Τα γενικής χρήσης Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα έχουν εκπαιδευτεί σε ευρύ φάσμα δεδομένων και, ως εκ τούτου, δεν διαθέτουν εξειδικευμένη γνώση σχετικά με τεχνικές προδιαγραφές, συμβατικούς όρους, εθνικούς κανονισμούς ή τις ειδικές διαδικασίες που εφαρμόζονται στα τεχνικά έργα. Για τον λόγο αυτό, οι Taiwo et al. (2025) προτείνουν την ανάπτυξη εξειδικευμένων εφαρμογών που αξιοποιούν δεδομένα των ίδιων των οργανισμών, σε συνδυασμό με τεχνικές Retrieval-Augmented Generation (RAG). Μέσω αυτής της προσέγγισης, τα μοντέλα ανακτούν πληροφορίες από αξιόπιστες βάσεις γνώσης πριν δημιουργήσουν τις απαντήσεις τους, γεγονός που βελτιώνει αισθητά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και περιορίζει την πιθανότητα παραγωγής λανθασμένων πληροφοριών.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα αφορά την προστασία των δεδομένων και την ασφάλεια των πληροφοριών. Τα τεχνικά έργα περιλαμβάνουν μεγάλο όγκο ευαίσθητων στοιχείων, όπως συμβάσεις, οικονομικά δεδομένα, τεχνικές μελέτες και εμπορικές πληροφορίες. Η χρήση δημόσιων υπηρεσιών GenAI χωρίς κατάλληλους μηχανισμούς προστασίας μπορεί να δημιουργήσει κινδύνους διαρροής εμπιστευτικών πληροφοριών ή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε κρίσιμα δεδομένα του έργου. Για τον λόγο αυτό, πριν από την ευρεία αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών, απαιτείται η εφαρμογή σαφών πολιτικών διακυβέρνησης δεδομένων και η ανάπτυξη ασφαλών περιβαλλόντων λειτουργίας (Taiwo et al., 2025).

Παράλληλα, ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτούν τα ζητήματα δεοντολογίας και κανονιστικής συμμόρφωσης. Η περιορισμένη διαφάνεια ως προς τον τρόπο με τον οποίο τα μοντέλα παράγουν τις απαντήσεις τους, η δυσκολία ερμηνείας της συλλογιστικής τους, τα ζητήματα πνευματικής ιδιοκτησίας και ο κίνδυνος ενσωμάτωσης αλγοριθμικών μεροληψιών (bias) δημιουργούν νέες προκλήσεις για τους οργανισμούς που επιδιώκουν να αξιοποιήσουν την τεχνολογία. Σύμφωνα με τους Taiwo et al. (2025), η υπεύθυνη χρήση της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει σαφές πλαίσιο διακυβέρνησης, διαδικασίες ελέγχου των αποτελεσμάτων και διατήρηση της ανθρώπινης εποπτείας στις κρίσιμες αποφάσεις.

Προκλήσεις εμφανίζονται και σε οργανωσιακό επίπεδο. Η επιτυχής ενσωμάτωση της GenAI προϋποθέτει επενδύσεις σε σύγχρονες ψηφιακές υποδομές, ανάπτυξη νέων δεξιοτήτων από το ανθρώπινο δυναμικό και προσαρμογή των υφιστάμενων διαδικασιών εργασίας. Ταυτόχρονα, η αποδοχή των νέων τεχνολογιών από τους επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο εμπιστοσύνης που αναπτύσσουν απέναντι στα παραγόμενα αποτελέσματα, αλλά και από την ικανότητά τους να ενσωματώνουν αποτελεσματικά τα νέα εργαλεία στην καθημερινή τους πρακτική.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι οι περιορισμοί της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης δεν μειώνουν τη σημασία των δυνατοτήτων της, αλλά αναδεικνύουν την ανάγκη για υπεύθυνη και ελεγχόμενη αξιοποίησή της. Όπως επισημαίνουν οι Taiwo et al. (2025), η επιτυχής ενσωμάτωσή

της στα τεχνικά έργα προϋποθέτει τον συνδυασμό τεχνολογικής καινοτομίας, εξειδικευμένων δεδομένων, αξιόπιστων διαδικασιών επαλήθευσης και ουσιαστικής ανθρώπινης εποπτείας. Η ισορροπία ανάμεσα στην αυτοματοποίηση και την επιστημονική κρίση αποτελεί βασική προϋπόθεση, ώστε η GenAI να λειτουργεί ως πολύτιμο εργαλείο υποστήριξης των μηχανικών και όχι ως υποκατάστατο της επαγγελματικής τους ευθύνης.

2.7 Οφέλη από την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διοίκηση και διαχείριση τεχνικών έργων αποτελεί έναν από τους βασικότερους μοχλούς του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η αξιοποίηση τεχνολογιών όπως η μηχανική μάθηση (Machine Learning), η βαθιά μάθηση (Deep Learning), η υπολογιστική όραση (Computer Vision), η επεξεργασία φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing – NLP) και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης διεκδικούν σημαντικά τις δυνατότητες αυτοματοποίησης, πρόβλεψης και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι η συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν περιορίζεται στη βελτίωση επιμέρους διαδικασιών, αλλά επηρεάζει συνολικά την απόδοση των έργων, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους και του χρόνου υλοποίησης, στη βελτίωση της ποιότητας, στην ενίσχυση της ασφάλειας και στην προώθηση πιο βιώσιμων κατασκευαστικών πρακτικών (Abioye et al., 2021· Adebayo et al., 2025).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι η ικανότητά της να επεξεργάζεται και να αναλύει πολύ μεγάλους όγκους δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στα σύγχρονα τεχνικά έργα παράγονται καθημερινά πληροφορίες από συστήματα BIM, αισθητήρες IoT, μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones), κάμερες εργοταξίου, χρονοδιαγράμματα, οικονομικά στοιχεία και αναφορές προόδου. Η ανάλυση αυτού του όγκου δεδομένων με συμβατικές μεθόδους είναι ιδιαίτερα απαιτητική και συχνά δεν επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό σύνθετων συσχετίσεων ή τάσεων. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να αναγνωρίζουν

αποκλίσεις, να εντοπίζουν πρότυπα και να παράγουν προβλέψεις με υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια, παρέχοντας στους διαχειριστές έργων αξιόπιστη πληροφόρηση για την υποστήριξη των αποφάσεών τους (Chen et al., 2025· Adebayo et al., 2025).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή της ΑΙ στη βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Η διοίκηση ενός κατασκευαστικού έργου προϋποθέτει τη συνεχή αξιολόγηση μεγάλου αριθμού αλληλεξαρτώμενων παραμέτρων, ενώ οι αποφάσεις λαμβάνονται συχνά υπό συνθήκες αβεβαιότητας και μεταβαλλόμενων δεδομένων. Μέσω της αξιοποίησης ιστορικών στοιχείων και της αξιολόγησης πολλαπλών εναλλακτικών σεναρίων, τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να υποστηρίξουν τους Project Managers στην επιλογή της καταλληλότερης λύσης, περιορίζοντας την αποκλειστική εξάρτηση από εμπειρικές εκτιμήσεις. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη αξία σε έργα μεγάλης κλίμακας, όπου ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τόσο το κόστος όσο και τη συνολική διάρκεια υλοποίησης (Adebayo et al., 2025).

Εξίσου σημαντικό όφελος αποτελεί η αύξηση της παραγωγικότητας. Η αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων και χρονοβόρων διαδικασιών, όπως η συλλογή στοιχείων προόδου, η ενημέρωση χρονοδιαγραμμάτων, η επεξεργασία τεχνικών εγγράφων, ο εντοπισμός αποκλίσεων και η σύνταξη αναφορών, περιορίζει σημαντικά τον διοικητικό φόρτο εργασίας. Έτσι, τα στελέχη των έργων μπορούν να αφιερώνουν περισσότερο χρόνο σε δραστηριότητες που απαιτούν τεχνική κρίση και στρατηγική σκέψη. Παράλληλα, η μείωση των ανθρώπινων σφαλμάτων αυξάνει την αξιοπιστία των διαθέσιμων πληροφοριών και ενισχύει τον αποτελεσματικό έλεγχο της πορείας του έργου (Abioye et al., 2021· Adebayo et al., 2025).

Η Τεχνητή Νοημοσύνη συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων κόστους και χρόνου. Αξιοποιώντας δεδομένα από προηγούμενα έργα, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να αναπτύσσουν μοντέλα πρόβλεψης που λαμβάνουν υπόψη μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως η διαθεσιμότητα των πόρων, οι καιρικές συνθήκες, η παραγωγικότητα των συνεργείων, οι καθυστερήσεις στις προμήθειες και οι τεχνικές ιδιαιτερότητες κάθε έργου. Ως αποτέλεσμα, οι προβλέψεις εμφανίζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με τις παραδοσιακές στατιστικές ή

εμπειρικές μεθόδους, συμβάλλοντας στον περιορισμό τόσο των υπερβάσεων κόστους όσο και των καθυστερήσεων (Abioye et al., 2021· Chen et al., 2025).

Σημαντική είναι και η συμβολή της ΑΙ στη διαχείριση κινδύνων. Μέσω τεχνικών προγνωστικής ανάλυσης (predictive analytics), τα συστήματα μπορούν να εντοπίζουν έγκαιρα ενδείξεις κινδύνων που σχετίζονται με την ασφάλεια, την πρόοδο, τον προϋπολογισμό ή την ποιότητα του έργου. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στους υπεύθυνους του έργου να εφαρμόζουν προληπτικά μέτρα πριν οι αποκλίσεις εξελιχθούν σε σοβαρά προβλήματα, μετατοπίζοντας τη διαχείριση από μια αντιδραστική σε μια περισσότερο προληπτική και δυναμική προσέγγιση (Adebayo et al., 2025).

Ανάλογα σημαντική είναι η συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη βελτίωση της υγείας και της ασφάλειας στα εργοτάξια. Η αξιοποίηση τεχνολογιών υπολογιστικής όρασης σε συνδυασμό με κάμερες, αισθητήρες και άλλα συστήματα παρακολούθησης επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων, τον έλεγχο της χρήσης των μέσων ατομικής προστασίας, την ανίχνευση επικίνδυνων αλληλεπιδράσεων μεταξύ εργαζομένων και μηχανημάτων, καθώς και την άμεση ειδοποίηση των υπευθύνων ασφαλείας. Η συνεχής παρακολούθηση του εργοταξίου ενισχύει την πρόληψη εργατικών ατυχημάτων και συμβάλλει στη διαμόρφωση ισχυρότερης κουλτούρας ασφαλείας (Chen et al., 2025· Abioye et al., 2021).

Παράλληλα, η ΑΙ βελτιώνει σημαντικά τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Μέσα από τη συνεχή ανάλυση δεδομένων μπορεί να προτείνει αποδοτικότερη κατανομή ανθρώπινου δυναμικού, εξοπλισμού και υλικών, περιορίζοντας τις περιόδους αδράνειας, τις επικαλύψεις εργασιών και τις περιττές μετακινήσεις μηχανημάτων. Η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των πόρων οδηγεί τόσο σε μείωση του κόστους όσο και σε αύξηση της συνολικής παραγωγικότητας του έργου (Adebayo et al., 2025).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης συμβάλλει επίσης στην προώθηση της βιωσιμότητας των κατασκευών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι εφαρμογές ΑΙ υποστηρίζουν τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, την αποτελεσματικότερη χρήση των υλικών και

τον περιορισμό των κατασκευαστικών αποβλήτων. Παράλληλα, διευκολύνουν την ανάπτυξη περισσότερο ενεργειακά αποδοτικών σχεδιαστικών λύσεων και την πληρέστερη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενισχύοντας τη μετάβαση προς πιο βιώσιμα πρότυπα κατασκευής (Adebayo et al., 2025).

Τέλος, η υιοθέτηση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης δημιουργεί σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα για τους κατασκευαστικούς οργανισμούς. Οι επιχειρήσεις που επενδύουν σε συστήματα ΑΙ αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα στη λήψη αποφάσεων, αυξημένη ακρίβεια στις προβλέψεις και αποτελεσματικότερο έλεγχο της εξέλιξης των έργων, ενώ παράλληλα βελτιώνουν την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς. Η αποτελεσματικότερη διαχείριση του χρόνου, του κόστους και της ποιότητας ενισχύει την αξιοπιστία τους απέναντι στους πελάτες και συμβάλλει στη βελτίωση της συνολικής ανταγωνιστικότητάς τους (Abioye et al., 2021· Adebayo et al., 2025).

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί πλέον έναν από τους βασικούς καταλύτες του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η δυνατότητά της να επεξεργάζεται σύνθετα δεδομένα, να αυτοματοποιεί διαδικασίες, να υποστηρίζει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και να βελτιστοποιεί την αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των έργων. Παράλληλα, η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων της προϋποθέτει αξιόπιστα δεδομένα, κατάλληλες ψηφιακές υποδομές, οργανωσιακή ετοιμότητα και ανάπτυξη των απαραίτητων δεξιοτήτων από τους επαγγελματίες του κλάδου, ώστε τα τεχνολογικά πλεονεκτήματα να μεταφραστούν σε ουσιαστική επιχειρησιακή αξία (Abioye et al., 2021· Adebayo et al., 2025· Chen et al., 2025).

2.8 Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρά τα σημαντικά οφέλη που προσφέρει η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων, η ευρεία αξιοποίησή της εξακολουθεί να συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Η κατασκευαστική βιομηχανία συγκαταλέγεται διαχρονικά στους κλάδους με σχετικά χαμηλό επίπεδο

ψηφιακής ωριμότητας, γεγονός που δυσχεραίνει την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών στις καθημερινές διαδικασίες των έργων. Η επιτυχής εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν εξαρτάται μόνο από τις δυνατότητες των αλγορίθμων, αλλά προϋποθέτει την ύπαρξη αξιόπιστων δεδομένων, κατάλληλων ψηφιακών υποδομών, οργανωσιακής ετοιμότητας και εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού (Abioye et al., 2021).

Μία από τις βασικότερες προκλήσεις αφορά την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτούν μεγάλους όγκους αξιόπιστων δεδομένων για την εκπαίδευση και τη λειτουργία τους. Στην πράξη, όμως, οι πληροφορίες που παράγονται κατά την εκτέλεση ενός τεχνικού έργου προέρχονται από διαφορετικές πηγές, όπως μοντέλα BIM, αισθητήρες IoT, χρονοδιαγράμματα, οικονομικά πληροφοριακά συστήματα, φωτογραφίες εργοταξίου και τεχνικά έγγραφα. Τα δεδομένα αυτά συχνά εμφανίζουν ασυνέπειες, ελλείψεις ή διαφορετικές μορφές αποθήκευσης, γεγονός που επηρεάζει την αξιοπιστία των προβλέψεων και περιορίζει την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (Abioye et al., 2021).

Εξίσου σημαντική είναι η πρόκληση της διαλειτουργικότητας μεταξύ των πληροφοριακών συστημάτων. Πολλές από τις ψηφιακές πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται στα τεχνικά έργα λειτουργούν ανεξάρτητα, χωρίς να υποστηρίζουν την άμεση ανταλλαγή δεδομένων. Η απουσία κοινών προτύπων και ενιαίων δομών πληροφορίας δυσχεραίνει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης που θα μπορούν να αξιοποιούν δεδομένα από ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η επιτυχής εφαρμογή της AI προϋποθέτει την αποτελεσματική διασύνδεσή της με τεχνολογίες όπως το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), τα Digital Twins και οι πλατφόρμες Cloud Computing (Abioye et al., 2021).

Μία ακόμη σημαντική δυσκολία αφορά το αρχικό κόστος υλοποίησης των σχετικών τεχνολογιών. Η εγκατάσταση αισθητήρων, η προμήθεια εξειδικευμένου λογισμικού, η ανάπτυξη κατάλληλων υπολογιστικών υποδομών και η εκπαίδευση του προσωπικού συνεπάγονται σημαντικές επενδύσεις. Το γεγονός αυτό επηρεάζει ιδιαίτερα τις μικρομεσαίες τεχνικές επιχειρήσεις, οι οποίες συχνά δεν διαθέτουν τους

απαραίτητους οικονομικούς πόρους για την υιοθέτηση προηγμένων λύσεων Τεχνητής Νοημοσύνης. Παρότι το κόστος αυτό εκτιμάται ότι θα μειώνεται σταδιακά με την ευρύτερη διάδοση των σχετικών τεχνολογιών, εξακολουθεί να αποτελεί έναν από τους βασικούς ανασταλτικούς παράγοντες (Abioye et al., 2021).

Παράλληλα, σημαντικό περιορισμό αποτελεί η έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού. Η ανάπτυξη και η αποτελεσματική αξιοποίηση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτούν στελέχη που να συνδυάζουν γνώσεις τόσο στις τεχνολογίες ΑΙ όσο και στη διοίκηση τεχνικών έργων. Ωστόσο, η σύγχρονη βιβλιογραφία επισημαίνει ότι εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη επαγγελματιών με αυτό το διεπιστημονικό υπόβαθρο, γεγονός που δυσχεραίνει την επιτυχή εφαρμογή των σχετικών τεχνολογιών και αναδεικνύει την ανάγκη στενότερης συνεργασίας μεταξύ μηχανικών, επιστημόνων δεδομένων και ειδικών πληροφορικής (Abioye et al., 2021).

Σημαντικές δυσκολίες εμφανίζονται και σε οργανωσιακό επίπεδο. Η κατασκευαστική βιομηχανία εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία των στελεχών και σε καθιερωμένες πρακτικές διοίκησης έργων, γεγονός που συχνά δημιουργεί επιφυλακτικότητα απέναντι στην υιοθέτηση αλγοριθμικών συστημάτων. Η έλλειψη εμπιστοσύνης ενισχύεται όταν ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται οι αποφάσεις από τα μοντέλα δεν είναι εύκολα κατανοητός. Για τον λόγο αυτό, αυξανόμενο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Αναλύσιμη ή Επεξηγήσιμη Τεχνητή Νοημοσύνη (Explainable AI – XAI), η οποία επιδιώκει να καταστήσει περισσότερο διαφανή τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των αλγορίθμων και να ενισχύσει την εμπιστοσύνη των χρηστών στα αποτελέσματά τους (Abioye et al., 2021).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν ζητήματα κυβερνοασφάλειας, προστασίας προσωπικών δεδομένων και ασφάλειας των πληροφοριών. Η συνεχής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ αισθητήρων, πληροφοριακών συστημάτων και διαδικτυακών υπηρεσιών αυξάνει τον κίνδυνο κυβερνοεπιθέσεων, αλλοίωσης πληροφοριών ή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε κρίσιμα δεδομένα του έργου. Η διασφάλιση της ακεραιότητας, της αξιοπιστίας και της εμπιστευτικότητας των δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης, ιδιαίτερα σε έργα κρίσιμων υποδομών (Abioye et al., 2021).

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης εγείρει επίσης σημαντικά ηθικά και νομικά ζητήματα. Η ανάθεση κρίσιμων αποφάσεων σε αλγορίθμους δημιουργεί ερωτήματα σχετικά με την ευθύνη σε περίπτωση λανθασμένων προβλέψεων, την πιθανή ύπαρξη αλγοριθμικών μεροληψιών (algorithmic bias), τη διαφάνεια των αποφάσεων και τη συμμόρφωση με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει ολοένα και περισσότερο τη σημασία της ανάπτυξης ολοκληρωμένων μηχανισμών διακυβέρνησης της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI Governance), ώστε η αξιοποίησή της να πραγματοποιείται με τρόπο ασφαλή, αξιόπιστο και κοινωνικά αποδεκτό (Abioye et al., 2021).

Τέλος, σημαντικοί περιορισμοί σχετίζονται με τις υπολογιστικές απαιτήσεις και τις απαιτούμενες ψηφιακές υποδομές. Πολλά εργοτάξια βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου η πρόσβαση σε αξιόπιστα δίκτυα επικοινωνίας και επαρκή υπολογιστική ισχύ παραμένει περιορισμένη. Η συνεχής λειτουργία εφαρμογών πραγματικού χρόνου, όπως τα συστήματα υπολογιστικής όρασης, οι πλατφόρμες παρακολούθησης εργοταξίου και τα αυτόνομα συστήματα, απαιτεί ισχυρές τηλεπικοινωνιακές και υπολογιστικές υποδομές, οι οποίες δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες σε όλα τα έργα (Abioye et al., 2021).

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι τα σημαντικότερα εμπόδια για την ευρεία αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στα τεχνικά έργα δεν είναι πλέον αποκλειστικά τεχνολογικής φύσης, αλλά συνδέονται κυρίως με οργανωσιακούς, οικονομικούς και θεσμικούς παράγοντες. Η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων, η ενίσχυση της διαλειτουργικότητας των πληροφοριακών συστημάτων, η ανάπτυξη των απαραίτητων ψηφιακών δεξιοτήτων, η αποτελεσματική προστασία των πληροφοριών και η διαμόρφωση σαφούς κανονιστικού πλαισίου αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διοίκηση και διαχείριση τεχνικών έργων (Abioye et al., 2021).

2.9 Ερευνητικά κενά της διεθνούς βιβλιογραφίας

Η διεθνής βιβλιογραφία των τελευταίων ετών δείχνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη εξελίσσεται σε έναν από τους βασικούς μοχλούς του ψηφιακού μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η πρόοδος σε τεχνολογίες όπως η μηχανική μάθηση (Machine Learning), η βαθιά μάθηση (Deep Learning), η υπολογιστική όραση (Computer Vision), τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models) και η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών που υποστηρίζουν τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη διαχείριση τεχνικών έργων. Παράλληλα, οι πρόσφατες βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της παραγωγικότητας, της ποιότητας των αποφάσεων, της διαχείρισης κινδύνων, της ασφάλειας, του προγραμματισμού και, γενικότερα, της συνολικής απόδοσης των έργων (Abioye et al., 2021· Adebayo et al., 2025· Chen et al., 2025).

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί, εξακολουθούν να εντοπίζονται ουσιαστικά ερευνητικά κενά. Ένα από τα σημαντικότερα αφορά τον κατακερματισμό της υπάρχουσας γνώσης. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων μελετών εστιάζει σε επιμέρους λειτουργίες της διοίκησης έργων, όπως ο χρονικός προγραμματισμός, η εκτίμηση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου ή η ασφάλεια στο εργοτάξιο. Αντίθετα, σχετικά περιορισμένος παραμένει ο αριθμός των ερευνών που αντιμετωπίζουν τη διοίκηση τεχνικών έργων ως ένα ενιαίο και αλληλοεξαρτώμενο σύστημα, στο οποίο οι διαφορετικές λειτουργίες επηρεάζουν διαρκώς η μία την άλλη. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη ολοκληρωμένων μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης που να υποστηρίζουν συνολικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των Project Managers εξακολουθεί να αποτελεί ζητούμενο (Abioye et al., 2021· Chen et al., 2025).

Ένα ακόμη σημαντικό κενό αφορά την περιορισμένη αξιολόγηση των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης σε πραγματικές συνθήκες έργου. Παρότι πολλές δημοσιευμένες μελέτες παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις των προτεινόμενων αλγορίθμων, μεγάλο μέρος τους βασίζεται σε ιστορικά σύνολα δεδομένων, προσομοιώσεις ή

εργαστηριακά περιβάλλοντα. Αντίθετα, παραμένουν σχετικά περιορισμένες οι εμπειρικές έρευνες που εξετάζουν την απόδοση των τεχνολογιών αυτών σε ενεργά εργοτάξια και σε πραγματικές συνθήκες διοίκησης τεχνικών έργων. Η ανάγκη για περισσότερες εφαρμογές πεδίου (field studies) αναφέρεται επανειλημμένα στη διεθνή βιβλιογραφία ως βασική προϋπόθεση για την ευρύτερη υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο (Abioye et al., 2021· Chen et al., 2025).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ανάγκη ουσιαστικότερης ενοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης με τις υπόλοιπες τεχνολογίες του οικοσυστήματος Construction 4.0. Αν και η βιβλιογραφία αναγνωρίζει τα σημαντικά οφέλη από τον συνδυασμό της AI με το Building Information Modeling (BIM), το Internet of Things (IoT), τα Digital Twins, τις πλατφόρμες Cloud Computing και τα Big Data, στην πράξη οι περισσότερες εφαρμογές εξακολουθούν να αναπτύσσονται αποσπασματικά και χωρίς ουσιαστική διασύνδεση μεταξύ των επιμέρους πληροφοριακών συστημάτων. Η έλλειψη αυτής της ολοκλήρωσης περιορίζει την αξιοποίηση δεδομένων πραγματικού χρόνου και δυσχεραίνει την ανάπτυξη ενιαίων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων που να καλύπτουν το σύνολο του κύκλου ζωής ενός έργου (Abioye et al., 2021).

Ένα ακόμη πεδίο που βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο αφορά την αξιοποίηση της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης στη διοίκηση τεχνικών έργων. Το μεγαλύτερο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας αφορά εφαρμογές μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης που αναπτύχθηκαν πριν από την ευρεία διάδοση των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων. Αντίθετα, οι μελέτες που εξετάζουν την αξιοποίηση εργαλείων όπως το ChatGPT και άλλων εφαρμογών Generative AI παραμένουν περιορισμένες. Όπως επισημαίνουν οι Taiwo et al. (2025), παρά τις ιδιαίτερα σημαντικές δυνατότητες των τεχνολογιών αυτών στην παραγωγή τεχνικής τεκμηρίωσης, στη διαχείριση συμβάσεων και στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων, απαιτούνται περισσότερες εμπειρικές έρευνες που να αξιολογούν την πραγματική επιχειρησιακή τους αξία και την επίδρασή τους στην απόδοση των τεχνικών έργων.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία αναδεικνύει την ανάγκη μεγαλύτερης εστίασης στους οργανωσιακούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Ζητήματα όπως η οργανωσιακή κουλτούρα, η αποδοχή των νέων

τεχνολογιών από τα στελέχη των έργων, η ανάπτυξη ψηφιακών δεξιοτήτων, η εμπιστοσύνη προς τα αλγοριθμικά συστήματα και ο βαθμός ψηφιακής ωριμότητας των οργανισμών δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί σε επαρκή βαθμό. Οι περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες επικεντρώνονται κυρίως στις τεχνικές δυνατότητες των αλγορίθμων, ενώ οι ανθρώπινοι και οργανωσιακοί παράγοντες που καθορίζουν την πραγματική αξιοποίησή τους στην καθημερινή πρακτική της διοίκησης έργων παραμένουν λιγότερο μελετημένοι (Adebayo et al., 2025· Chen et al., 2025).

Αντίστοιχα, περιορισμένος είναι και ο αριθμός των ερευνών που εξετάζουν τις αντιλήψεις, τις εμπειρίες και τον βαθμό αποδοχής της Τεχνητής Νοημοσύνης από τους ίδιους τους επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου. Παρότι πολλές μελέτες παρουσιάζουν νέους αλγορίθμους και καινοτόμες τεχνολογικές εφαρμογές, λιγότερες διερευνούν τον τρόπο με τον οποίο οι Project Managers, οι Project Controllers, οι επιβλέποντες μηχανικοί και τα υπόλοιπα στελέχη αντιλαμβάνονται τις δυνατότητες, τους περιορισμούς και τις προοπτικές αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στο πραγματικό εργασιακό περιβάλλον. Η έλλειψη αυτή περιορίζει την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την πρακτική υιοθέτηση των σχετικών τεχνολογιών και αναδεικνύει την ανάγκη για περισσότερες εμπειρικές μελέτες που να βασίζονται στις απόψεις και στις εμπειρίες των ίδιων των επαγγελματιών.

Επιπλέον, η ταχύτητα με την οποία εξελίσσονται οι τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης καθιστά αναγκαία τη συνεχή επικαιροποίηση της επιστημονικής γνώσης. Οι δυνατότητες των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων, των πολυτροπικών συστημάτων και της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης διευρύνονται με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς, γεγονός που επιβάλλει τη διαρκή αναθεώρηση των υφιστάμενων συμπερασμάτων και την ανάπτυξη νέων ερευνητικών προσεγγίσεων. Υπό αυτή την έννοια, η σχετική βιβλιογραφία βρίσκεται ακόμη σε φάση διαμόρφωσης και αναμένεται να εμπλουτιστεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια.

Από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι, παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρει η Τεχνητή Νοημοσύνη στη διαχείριση τεχνικών έργων, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για περισσότερο ολοκληρωμένες και εμπειρικά τεκμηριωμένες έρευνες. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η διερεύνηση του βαθμού

υιοθέτησης των σύγχρονων τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης από τους επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου, η αξιολόγηση της πραγματικής προστιθέμενης αξίας τους στη διοίκηση έργων, καθώς και η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την αποτελεσματική ενσωμάτωσή τους στην καθημερινή πρακτική. Στο πλαίσιο αυτό εντάσσεται και η παρούσα έρευνα, η οποία επιδιώκει να συμβάλει στην κάλυψη μέρους των παραπάνω ερευνητικών κενών, διερευνώντας τις αντιλήψεις και τις εμπειρίες επαγγελματιών του κατασκευαστικού κλάδου σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

3.1 Ερευνητικός σχεδιασμός

Η επιλογή της κατάλληλης ερευνητικής μεθοδολογίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιστημονική εγκυρότητα και αξιοπιστία μιας μελέτης, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αναζητούνται, επιλέγονται, αξιολογούνται και συντίθενται τα διαθέσιμα επιστημονικά δεδομένα, ώστε να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα. Για να εξυπηρετεί αποτελεσματικά τον σκοπό της έρευνας, η μεθοδολογία οφείλει να βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το αντικείμενο της μελέτης, τους επιδιωκόμενους στόχους και τα ερευνητικά ερωτήματα που καλείται να διερευνήσει (Snyder, 2019).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ως ερευνητική μέθοδος η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση (Systematic Literature Review – SLR). Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για τη συγκέντρωση, την οργάνωση και την κριτική αποτίμηση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης σε γνωστικά πεδία που εξελίσσονται με γρήγορους ρυθμούς και χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων, όπως συμβαίνει με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων (Tranfield et al., 2003· Snyder, 2019).

Σε αντίθεση με τη συμβατική αφηγηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση, η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση ακολουθεί μια σαφώς οριοθετημένη,

διαφανή και επαναλήψιμη διαδικασία. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον συστηματικό εντοπισμό των σχετικών δημοσιεύσεων, την επιλογή τους βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων, την αξιολόγηση της ποιότητάς τους και, στη συνέχεια, τη σύνθεση των ευρημάτων. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται ο κίνδυνος μεροληψίας κατά την επιλογή των πηγών, ενισχύεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και διαμορφώνεται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της υπάρχουσας επιστημονικής γνώσης (Kitchenham & Charters, 2007· Tranfield et al., 2003).

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου που εξετάζει η παρούσα εργασία. Η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί έναν από τους πλέον δυναμικά εξελισσόμενους επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς, ενώ οι εφαρμογές της στον κατασκευαστικό κλάδο διευρύνονται συνεχώς, καλύπτοντας ολοένα και περισσότερες λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων. Παράλληλα, η διαθέσιμη βιβλιογραφία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία ερευνητικών προσεγγίσεων, διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις και σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τα πεδία εφαρμογής. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση προσφέρει ένα οργανωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που επιτρέπει την κριτική επεξεργασία και τη σύνθεση των διαθέσιμων επιστημονικών ευρημάτων σε ένα ενιαίο και συνεκτικό θεωρητικό υπόβαθρο (Snyder, 2019).

Η έρευνα ακολουθεί ποιοτική προσέγγιση, καθώς βασίζεται αποκλειστικά στην ανάλυση και σύνθεση δευτερογενών δεδομένων που προέρχονται από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, αξιοποιούνται δημοσιευμένα επιστημονικά άρθρα και ερευνητικές μελέτες που εξετάζουν την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων, με σκοπό να αποτυπωθούν οι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, τα κυριότερα πεδία εφαρμογής τους, τα οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίησή τους, οι περιορισμοί που εξακολουθούν να υφίστανται, καθώς και τα ερευνητικά κενά που επισημαίνονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Ο σχεδιασμός της έρευνας διαμορφώθηκε με γνώμονα την απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας. Για

τον σκοπό αυτό ακολουθήθηκε μια δομημένη διαδικασία, η οποία περιλάμβανε τη συστηματική αναζήτηση της βιβλιογραφίας, την εφαρμογή συγκεκριμένων κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού των δημοσιεύσεων, τη θεματική ομαδοποίηση των επιλεγμένων άρθρων, την κριτική αξιολόγηση των ευρημάτων και, τέλος, τη σύνθεσή τους σε επιμέρους θεματικές ενότητες. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε όχι μόνο τη συγκέντρωση και παρουσίαση της υφιστάμενης γνώσης, αλλά και τη συγκριτική εξέταση διαφορετικών ερευνητικών προσεγγίσεων, την ανάδειξη κοινών τάσεων και διαφοροποιήσεων, καθώς και τον εντοπισμό πεδίων στα οποία η υπάρχουσα γνώση παραμένει περιορισμένη.

Η παρούσα εργασία δεν αποσκοπεί μόνο στην περιγραφή των ευρημάτων της διεθνούς βιβλιογραφίας. Βασικός της στόχος είναι η κριτική σύνθεση των διαθέσιμων ερευνητικών δεδομένων, ώστε να αποτυπωθούν οι σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης για τη διαχείριση τεχνικών έργων, να αξιολογηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί των υφιστάμενων τεχνολογικών εφαρμογών και να αναδειχθούν τα κυριότερα ερευνητικά κενά που εξακολουθούν να υπάρχουν. Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιδιώκεται η διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης και τεκμηριωμένης εικόνας της σύγχρονης επιστημονικής γνώσης, η οποία μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο σημείο αναφοράς τόσο για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες όσο και για την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στην πρακτική της διοίκησης τεχνικών έργων.

3.2 Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση (Systematic Literature Review – SLR) συγκαταλέγεται στις πλέον αναγνωρισμένες και επιστημονικά τεκμηριωμένες μεθοδολογικές προσεγγίσεις για τη συγκέντρωση, αξιολόγηση και σύνθεση της υπάρχουσας γνώσης γύρω από ένα συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο. Βασικό της γνώρισμα είναι ότι ακολουθεί μια δομημένη, διαφανή και επαναλήψιμη διαδικασία, μέσα από την οποία οι διαθέσιμες επιστημονικές δημοσιεύσεις εντοπίζονται, επιλέγονται, αξιολογούνται και αναλύονται βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η υποκειμενικότητα κατά την επιλογή της βιβλιογραφίας

και ενισχύεται τόσο η αξιοπιστία όσο και η εγκυρότητα των ερευνητικών συμπερασμάτων (Tranfield et al., 2003· Kitchenham & Charters, 2007).

Σε αντίθεση με την παραδοσιακή αφηγηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση (Narrative Literature Review), η οποία αφήνει μεγαλύτερο περιθώριο στην προσωπική κρίση του ερευνητή ως προς την επιλογή και την παρουσίαση των πηγών, η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στηρίζεται σε ένα συγκεκριμένο ερευνητικό πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει τον σαφή προσδιορισμό του αντικειμένου της έρευνας, τη διαμόρφωση της στρατηγικής αναζήτησης, την εφαρμογή κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, την αξιολόγηση της συνάφειας και της ποιότητας των επιλεγμένων μελετών, καθώς και τη σύνθεση των αποτελεσμάτων με τρόπο που μπορεί να τεκμηριωθεί και να αναπαραχθεί από άλλους ερευνητές (Kitchenham & Charters, 2007· Snyder, 2019).

Τα τελευταία χρόνια η χρήση της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης έχει επεκταθεί σημαντικά σε γνωστικά πεδία όπως η διοίκηση επιχειρήσεων, η μηχανική, τα πληροφοριακά συστήματα και η επιστήμη δεδομένων. Η ευρεία εφαρμογή της οφείλεται στο γεγονός ότι προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της υπάρχουσας γνώσης και διευκολύνει την ανάδειξη νέων ερευνητικών κατευθύνσεων (Tranfield et al., 2003). Η αξία της γίνεται ακόμη μεγαλύτερη σε αντικείμενα που εξελίσσονται με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη και ο ψηφιακός μετασχηματισμός της κατασκευαστικής βιομηχανίας, όπου ο όγκος των διαθέσιμων δημοσιεύσεων αυξάνεται συνεχώς και οι ερευνητικές προσεγγίσεις παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας για την παρούσα διπλωματική εργασία υπαγορεύτηκε από τη φύση του υπό διερεύνηση αντικειμένου και τους στόχους της μελέτης. Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων αποτελεί ένα σύνθετο και πολυδιάστατο πεδίο, στο οποίο συνυπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες, μεθοδολογίες και πρακτικές εφαρμογές. Παράλληλα, η σχετική βιβλιογραφία εμφανίζει σημαντική ετερογένεια τόσο ως προς τις ερευνητικές προσεγγίσεις όσο και ως προς τις μεθόδους αξιολόγησης και τα επιμέρους αντικείμενα που εξετάζονται. Υπό αυτές τις συνθήκες, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση μιας

συστηματικής μεθοδολογίας που να επιτρέπει την οργάνωση, την αξιολόγηση και τη σύνθεση των διαθέσιμων επιστημονικών δεδομένων με συνεκτικό και τεκμηριωμένο τρόπο.

Στην παρούσα εργασία, η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση δεν χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τη συγκέντρωση της σχετικής βιβλιογραφίας. Αποτέλεσε παράλληλα το βασικό εργαλείο κριτικής αξιολόγησης των δημοσιευμένων ερευνών, με στόχο την αναγνώριση των κυριότερων τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης, τη διερεύνηση των εφαρμογών τους στις βασικές λειτουργίες του Construction Project Management, την καταγραφή των σημαντικότερων πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους, καθώς και τον εντοπισμό των ερευνητικών κενών που εξακολουθούν να υφίστανται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στη διαμόρφωση του θεωρητικού πλαισίου που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η ερευνητική διαδικασία οργανώθηκε σε διαδοχικά και αλληλοσυμπληρούμενα στάδια. Αρχικά προσδιορίστηκαν τα ερευνητικά ερωτήματα και σχεδιάστηκε η στρατηγική αναζήτησης της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι κατάλληλες επιστημονικές βάσεις δεδομένων και καθορίστηκαν οι λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναζήτηση. Ακολούθησε η εφαρμογή των προκαθορισμένων κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, η αξιολόγηση της συνάφειας των δημοσιεύσεων, η θεματική ταξινόμηση των επιλεγμένων άρθρων και, τέλος, η συγκριτική ανάλυση και σύνθεση των ερευνητικών ευρημάτων. Η συστηματική αυτή διαδικασία διασφαλίζει τη διαφάνεια της μεθοδολογίας και επιτρέπει την επαναληψιμότητα της έρευνας από άλλους ερευνητές.

Για την περαιτέρω ενίσχυση της διαφάνειας και της συστηματικότητας της μελέτης υιοθετήθηκαν οι βασικές αρχές των διεθνώς αναγνωρισμένων οδηγιών PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Παρότι η παρούσα εργασία δεν περιλαμβάνει μετα-ανάλυση, η αξιοποίηση των κατευθυντήριων οδηγιών PRISMA συνέβαλε στη σαφή τεκμηρίωση της διαδικασίας αναζήτησης, επιλογής και αξιολόγησης της βιβλιογραφίας, ενισχύοντας την επιστημονική τεκμηρίωση και τη διαφάνεια της ερευνητικής διαδικασίας (Page et al., 2021).

Συνοψίζοντας, η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση αποτέλεσε τον βασικό άξονα της μεθοδολογίας της παρούσας έρευνας. Μέσα από την εφαρμογή της κατέστη δυνατή η οργανωμένη συγκέντρωση, η κριτική αποτίμηση και η σύνθεση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Παράλληλα, η συγκεκριμένη μεθοδολογική προσέγγιση επέτρεψε τη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου θεωρητικού υποβάθρου, την ανάδειξη των κυρίαρχων τάσεων της σύγχρονης βιβλιογραφίας και τον εντοπισμό των σημαντικότερων ερευνητικών κενών, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας.

3.3 Στρατηγική αναζήτησης της βιβλιογραφίας

Η στρατηγική αναζήτησης της βιβλιογραφίας διαμορφώθηκε με σκοπό τη συστηματική, ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη συλλογή των επιστημονικών δημοσιεύσεων που σχετίζονται με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η διαδικασία σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις βασικές αρχές της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, δίνοντας έμφαση στη συστηματικότητα, τη διαφάνεια και τη δυνατότητα επανάληψης της έρευνας, ώστε οι πηγές που τελικά επιλέχθηκαν να είναι αξιόπιστες, αντιπροσωπευτικές και άμεσα συνδεδεμένες με το αντικείμενο της μελέτης (Kitchenham & Charters, 2007· Snyder, 2019).

Το ενδιαφέρον της αναζήτησης επικεντρώθηκε σε επιστημονικές μελέτες που εξετάζουν την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στο Construction Project Management, καθώς και στις ψηφιακές τεχνολογίες που συμβάλλουν στον μετασχηματισμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, αναζητήθηκαν εργασίες που αφορούν τεχνολογίες όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing), η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence), τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models), αλλά και τεχνολογίες που αποτελούν βασικά στοιχεία του οικοσυστήματος των σύγχρονων τεχνικών έργων, όπως το

Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και το Cloud Computing.

Η βιβλιογραφική αναζήτηση πραγματοποιήθηκε στις επιστημονικές βάσεις δεδομένων Scopus, Web of Science, ScienceDirect και Google Scholar. Η επιλογή τους βασίστηκε τόσο στην επιστημονική αξιοπιστία τους όσο και στην εκτενή κάλυψη που προσφέρουν σε αντικείμενα όπως η μηχανική, η διοίκηση έργων, τα πληροφοριακά συστήματα και η Τεχνητή Νοημοσύνη. Η αξιοποίηση περισσότερων της μίας βάσεων συνέβαλε στη διεύρυνση της βιβλιογραφικής κάλυψης και στη μείωση της πιθανότητας να παραλειφθούν σημαντικές επιστημονικές δημοσιεύσεις (Tranfield et al., 2003).

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε κυρίως στην αγγλική γλώσσα, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της διεθνούς επιστημονικής παραγωγής στο συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο δημοσιεύεται στα αγγλικά. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν λέξεις-κλειδιά όπως *Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, Generative AI, Large Language Models, Construction Project Management, Construction Industry, Building Information Modeling (BIM), Digital Twin, Internet of Things (IoT), Big Data, Cloud Computing, Project Scheduling, Cost Estimation, Risk Management, Safety Management, Construction Automation* και *Decision Support*. Οι όροι αυτοί συνδυάστηκαν με λογικούς τελεστές (Boolean operators), όπως **AND**, **OR** και **NOT**, ώστε να βελτιωθεί τόσο η ακρίβεια όσο και η πληρότητα των αποτελεσμάτων.

Για να καλυφθεί το σύνολο των θεματικών ενοτήτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, η αναζήτηση δεν περιορίστηκε σε γενικούς όρους. Πραγματοποιήθηκαν επιπλέον εξειδικευμένες αναζητήσεις για επιμέρους τομείς της διαχείρισης τεχνικών έργων, όπως ο χρονικός προγραμματισμός, η διαχείριση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η διαχείριση ποιότητας, η υγεία και ασφάλεια, η διαχείριση πόρων, η παρακολούθηση προόδου, η διαχείριση εγγράφων και συμβάσεων, καθώς και η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Παράλληλα, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις πιο πρόσφατες εξελίξεις που αφορούν την Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα, ώστε να ενσωματωθούν στη μελέτη οι νεότερες επιστημονικές εξελίξεις.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στη χρονική επικαιρότητα των πηγών. Αν και συμπεριλήφθηκαν ορισμένες κλασικές δημοσιεύσεις που αποτέλεσαν σημείο αναφοράς τόσο για την ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης όσο και για τη μεθοδολογία της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας προέρχεται από δημοσιεύσεις των τελευταίων ετών. Η επιλογή αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης –και ιδιαίτερα της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης– εξελίσσονται με ιδιαίτερα γρήγορο ρυθμό, γεγονός που καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση της πιο πρόσφατης διαθέσιμης επιστημονικής γνώσης.

Κατά τη διάρκεια της βιβλιογραφικής αναζήτησης πραγματοποιήθηκε επίσης διασταύρωση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών βάσεων δεδομένων, με στόχο τον εντοπισμό διπλότυπων δημοσιεύσεων αλλά και τη συμπλήρωση πιθανών βιβλιογραφικών κενών. Παράλληλα, εφαρμόστηκαν τεχνικές backward citation searching, μέσω της εξέτασης των βιβλιογραφικών αναφορών σημαντικών άρθρων, καθώς και forward citation searching, προκειμένου να εντοπιστούν νεότερες δημοσιεύσεις που τα επικαλούνται. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στις Συστηματικές Βιβλιογραφικές Ανασκοπήσεις, καθώς διευρύνουν την κάλυψη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και συμβάλλουν στον εντοπισμό σημαντικών μελετών που ενδέχεται να μην εμφανίζονται κατά την αρχική αναζήτηση (Snyder, 2019).

Η εφαρμογή της παραπάνω στρατηγικής οδήγησε στη συγκρότηση ενός εκτεταμένου, σύγχρονου και επιστημονικά τεκμηριωμένου σώματος βιβλιογραφικών πηγών, το οποίο αποτέλεσε τη βάση για τα επόμενα στάδια της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού των δημοσιεύσεων, η διαδικασία επιλογής των άρθρων, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση και τη σύνθεση των ερευνητικών ευρημάτων.

3.4 Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού

Η εφαρμογή σαφώς καθορισμένων κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διενέργεια μιας αξιόπιστης Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης. Η χρήση τους διασφαλίζει τη διαφάνεια της ερευνητικής διαδικασίας, περιορίζει την πιθανότητα υποκειμενικών επιλογών και ενισχύει την επιστημονική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, όταν τα κριτήρια ορίζονται πριν από την έναρξη της επιλογής των δημοσιεύσεων, μειώνεται ο κίνδυνος μεροληψίας και εξασφαλίζεται ότι το τελικό σύνολο των πηγών ανταποκρίνεται στους στόχους και στα ερευνητικά ερωτήματα της μελέτης (Kitchenham & Charters, 2007· Page et al., 2021).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η επιλογή της βιβλιογραφίας επικεντρώθηκε σε επιστημονικές μελέτες που σχετίζονται άμεσα με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και, ευρύτερα, με τον ψηφιακό μετασχηματισμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Παράλληλα, ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ποιότητα των δημοσιεύσεων, στην αξιοπιστία των πηγών και στην επικαιρότητα των ερευνητικών ευρημάτων, ώστε η ανασκόπηση να αποτυπώνει όσο το δυνατόν πληρέστερα τη σύγχρονη επιστημονική γνώση.

Ως κριτήρια ένταξης των δημοσιεύσεων καθορίστηκαν τα ακόλουθα:

- Δημοσιεύσεις που εξετάζουν εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο και ειδικότερα στη διαχείριση τεχνικών έργων (Construction Project Management),
- Μελέτες που αφορούν τεχνολογίες όπως Machine Learning, Deep Learning, Natural Language Processing, Computer Vision, Generative Artificial Intelligence, Large Language Models και άλλες τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης με άμεση συνάφεια προς το αντικείμενο της έρευνας,
- Δημοσιεύσεις σχετικές με τεχνολογίες του ψηφιακού οικοσυστήματος των τεχνικών έργων, όπως Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), Digital Twins, Big Data και Cloud Computing, όταν αυτές συνδέονται με εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης,

- Άρθρα δημοσιευμένα σε έγκριτα διεθνή επιστημονικά περιοδικά με διαδικασία αξιολόγησης από ομοτίμους (peer review),
- Εργασίες που δημοσιεύθηκαν σε πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων και παρουσιάζουν πρωτότυπα ερευνητικά αποτελέσματα,
- Βιβλία, κεφάλαια βιβλίων και άρθρα βιβλιογραφικής ανασκόπησης που θεωρούνται θεμελιώδη για την κατανόηση του ερευνητικού αντικειμένου,
- Δημοσιεύσεις στην αγγλική γλώσσα,
- Μελέτες που δημοσιεύθηκαν κυρίως κατά την τελευταία δεκαετία, χωρίς να αποκλείονται παλαιότερες εργασίες οι οποίες αποτελούν βασικές θεωρητικές αναφορές.

Αντίστοιχα, ως κριτήρια αποκλεισμού εφαρμόστηκαν τα εξής:

- Δημοσιεύσεις χωρίς ουσιαστική συνάφεια με τη διαχείριση τεχνικών έργων ή με εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο,
- Μελέτες που αφορούν αποκλειστικά άλλους τομείς εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης, χωρίς δυνατότητα αξιοποίησης των αποτελεσμάτων τους στο Construction Project Management,
- Μη επιστημονικές πηγές, όπως ενημερωτικά άρθρα, ιστολόγια (blogs), εμπορικές παρουσιάσεις, τεχνικά φυλλάδια λογισμικού και δημοσιεύσεις χωρίς διαδικασία επιστημονικής αξιολόγησης,
- Διπλότυπες δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν σε περισσότερες από μία επιστημονικές βάσεις δεδομένων,
- Μελέτες με περιορισμένη επιστημονική τεκμηρίωση ή ανεπαρκή περιγραφή της ερευνητικής μεθοδολογίας,
- Δημοσιεύσεις για τις οποίες δεν ήταν διαθέσιμο το πλήρες κείμενο ή δεν κατέστη δυνατή η επαρκής αξιολόγηση του επιστημονικού τους περιεχομένου.

Η επιλογή των δημοσιεύσεων πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια. Αρχικά εξετάστηκαν ο τίτλος, οι λέξεις-κλειδιά και η περίληψη κάθε εργασίας, προκειμένου να διαπιστωθεί η συνάφειά της με το αντικείμενο της έρευνας. Στη συνέχεια ακολούθησε η αναλυτική μελέτη του πλήρους κειμένου όσων δημοσιεύσεων πληρούσαν τα αρχικά κριτήρια, με στόχο την αξιολόγηση της επιστημονικής τους ποιότητας, της μεθοδολογικής τους προσέγγισης, της συνεισφοράς τους και της χρησιμότητάς τους για την παρούσα μελέτη. Μέσα από αυτή τη διαδικασία διαμορφώθηκε ένα συνεκτικό και επιστημονικά τεκμηριωμένο σύνολο βιβλιογραφικών πηγών, το οποίο αποτέλεσε τη βάση για τη θεματική ταξινόμηση και τη συγκριτική ανάλυση των ερευνητικών ευρημάτων.

Η εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων συνέβαλε ουσιαστικά στον περιορισμό πιθανών πηγών μεροληψίας, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την αξιοπιστία της ερευνητικής διαδικασίας. Παράλληλα, διασφάλισε ότι οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν στη Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση είναι επιστημονικά τεκμηριωμένες, άμεσα συναφείς με το αντικείμενο της έρευνας και κατάλληλες για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται η θεματική ταξινόμηση των επιλεγμένων άρθρων, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση και τη σύνθεση των ερευνητικών ευρημάτων.

3.5 Διαδικασία επιλογής άρθρων (PRISMA)

Η διαδικασία επιλογής των επιστημονικών δημοσιεύσεων οργανώθηκε σύμφωνα με τις βασικές αρχές του πλαισίου PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), το οποίο αποτελεί διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο για τη συστηματική και διαφανή τεκμηρίωση των Συστηματικών Βιβλιογραφικών Ανασκοπήσεων. Αν και η παρούσα εργασία δεν συνιστά μετα-ανάλυση αλλά Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, η αξιοποίηση των βασικών αρχών του PRISMA συνέβαλε στην οργάνωση και την τεκμηρίωση της διαδικασίας

επιλογής της βιβλιογραφίας, ενισχύοντας τη διαφάνεια, την αξιοπιστία και τη δυνατότητα επανάληψης της ερευνητικής διαδικασίας (Page et al., 2021).

Η επιλογή των δημοσιεύσεων ακολούθησε τέσσερα διαδοχικά στάδια, σύμφωνα με τη δομή που προτείνει το πλαίσιο PRISMA: Identification (εντοπισμός), Screening (αρχικός έλεγχος), Eligibility (αξιολόγηση καταλληλότητας) και Included (τελική ένταξη).

Κατά το πρώτο στάδιο (Identification) πραγματοποιήθηκε συστηματική αναζήτηση της σχετικής βιβλιογραφίας στις επιλεγμένες επιστημονικές βάσεις δεδομένων, αξιοποιώντας τους συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Παράλληλα, εφαρμόστηκαν τεχνικές backward citation searching, μέσω της εξέτασης των βιβλιογραφικών αναφορών σημαντικών δημοσιεύσεων, καθώς και forward citation searching, με στόχο τον εντοπισμό νεότερων μελετών που παραπέμπουν στις αρχικές εργασίες. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών συνέβαλε στην όσο το δυνατόν πληρέστερη κάλυψη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας.

Στο δεύτερο στάδιο (Screening) απομακρύνθηκαν αρχικά οι διπλότυπες δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν στις διαφορετικές επιστημονικές βάσεις δεδομένων. Ακολούθησε η εξέταση του τίτλου, των λέξεων-κλειδιών και της περίληψης κάθε εργασίας, προκειμένου να αξιολογηθεί η συνάφειά της με το αντικείμενο της έρευνας. Οι δημοσιεύσεις που δεν σχετίζονταν άμεσα με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων ή δεν εξυπηρετούσαν τους στόχους της παρούσας μελέτης αποκλείστηκαν από τα επόμενα στάδια της διαδικασίας.

Το τρίτο στάδιο (Eligibility) περιλάμβανε την αναλυτική μελέτη του πλήρους κειμένου των δημοσιεύσεων που είχαν επιλεγεί κατά τον αρχικό έλεγχο. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση τα προκαθορισμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Εξετάστηκαν η συνάφεια κάθε μελέτης με το ερευνητικό αντικείμενο, η επιστημονική της ποιότητα, η πληρότητα της μεθοδολογικής προσέγγισης και η συμβολή της στην κατανόηση των εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο (Included) διαμορφώθηκε το τελικό σύνολο των επιστημονικών δημοσιεύσεων που εντάχθηκαν στη Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση. Οι μελέτες αυτές αποτέλεσαν το βασικό υλικό για τη θεματική ταξινόμηση της βιβλιογραφίας, την κριτική ανάλυση των ερευνητικών ευρημάτων και τη σύνθεση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας.

Η εφαρμογή της συγκεκριμένης διαδικασίας συνέβαλε ουσιαστικά στη διασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η χρήση προκαθορισμένων κριτηρίων, η σταδιακή αξιολόγηση των δημοσιεύσεων και η συστηματική τεκμηρίωση κάθε επιμέρους βήματος περιόρισαν τον κίνδυνο μεροληψίας κατά την επιλογή της βιβλιογραφίας και διασφάλισαν ότι το τελικό σύνολο των πηγών αποτελείται από επιστημονικά αξιόπιστες και άμεσα συναφείς μελέτες. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η επιστημονική εγκυρότητα της παρούσας έρευνας και η αξιοπιστία των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας.

3.6 Εξαγωγή δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας επιλογής των επιστημονικών δημοσιεύσεων, ακολούθησε η εξαγωγή και η συστηματική καταγραφή των δεδομένων που κρίθηκαν απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων της παρούσας έρευνας. Το στάδιο αυτό αποτελεί βασικό μέρος κάθε Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, καθώς εξασφαλίζει ότι οι πληροφορίες συλλέγονται με ενιαίο και οργανωμένο τρόπο από όλες τις επιλεγμένες μελέτες, δημιουργώντας μια σταθερή βάση για τη συγκριτική ανάλυση και τη σύνθεση των ερευνητικών ευρημάτων (Kitchenham & Charters, 2007).

Η εξαγωγή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσα από την αναλυτική μελέτη του πλήρους κειμένου κάθε δημοσίευσης. Για κάθε άρθρο καταγράφηκαν συγκεκριμένα στοιχεία που αφορούσαν τόσο τα βασικά βιβλιογραφικά χαρακτηριστικά όσο και το επιστημονικό του περιεχόμενο. Η οργανωμένη αυτή διαδικασία διευκόλυνε την

ταξινόμηση των μελετών, τη μεταξύ τους σύγκριση και τη σύνθεση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Αρχικά συγκεντρώθηκαν τα βασικά βιβλιογραφικά στοιχεία κάθε δημοσίευσης, όπως οι συγγραφείς, το έτος δημοσίευσης, ο τίτλος, το επιστημονικό περιοδικό ή συνέδριο στο οποίο δημοσιεύθηκε και, όπου ήταν διαθέσιμο, η χώρα ή η γεωγραφική περιοχή στην οποία αναφερόταν η έρευνα. Η καταγραφή των πληροφοριών αυτών επέτρεψε την αποτύπωση της εξέλιξης της διεθνούς ερευνητικής δραστηριότητας στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης για τη διαχείριση τεχνικών έργων.

Στη συνέχεια καταγράφηκαν πληροφορίες σχετικά με το αντικείμενο και τον σκοπό κάθε μελέτης, με ιδιαίτερη έμφαση στο πεδίο εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης. Ειδικότερα, εξετάστηκε αν κάθε δημοσίευση αφορούσε τον χρονικό προγραμματισμό έργων, τη διαχείριση κόστους, τη διαχείριση κινδύνων, τη διαχείριση ποιότητας, τη διαχείριση πόρων, την υγεία και ασφάλεια, την παρακολούθηση της προόδου, τη διαχείριση εγγράφων και συμβάσεων ή την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η κατηγοριοποίηση αυτή αποτέλεσε τη βάση για τη θεματική οργάνωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Παράλληλα, καταγράφηκαν οι τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης που αξιοποιήθηκαν σε κάθε μελέτη, όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing), η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models). Επιπλέον, καταγράφηκαν και οι συμπληρωματικές ψηφιακές τεχνολογίες που συνδυάζονται με εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και το Cloud Computing.

Εξίσου σημαντική ήταν η καταγραφή της ερευνητικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε σε κάθε δημοσίευση. Εξετάστηκε αν οι μελέτες βασίζονταν σε πειραματικές εφαρμογές, μελέτες περίπτωσης, προσομοιώσεις, ανάπτυξη αλγορίθμων, βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις ή άλλες ερευνητικές προσεγγίσεις. Παράλληλα, αποτυπώθηκαν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, οι μέθοδοι αξιολόγησης και οι

βασικοί δείκτες απόδοσης που εφαρμόστηκαν, ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε και στην καταγραφή των βασικών ευρημάτων κάθε μελέτης. Για κάθε άρθρο συγκεντρώθηκαν πληροφορίες σχετικά με τα οφέλη από την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης, τις προκλήσεις που συνδέονται με την εφαρμογή της, τους περιορισμούς των προτεινόμενων τεχνολογικών λύσεων, τους κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή τους, καθώς και τα ερευνητικά κενά που επισημαίνουν οι ίδιοι οι συγγραφείς. Η συστηματική καταγραφή των στοιχείων αυτών αποτέλεσε τη βάση για την κριτική σύνθεση της βιβλιογραφίας και τη διαμόρφωση των συμπερασμάτων της παρούσας μελέτης.

Για την υποστήριξη της διαδικασίας δημιουργήθηκε ένας **Master Literature Matrix**, στον οποίο συγκεντρώθηκαν με ενιαία δομή όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων δημοσιεύσεων. Ο πίνακας περιλάμβανε πληροφορίες σχετικά με τα βιβλιογραφικά στοιχεία, το αντικείμενο κάθε έρευνας, τις τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης που αξιοποιήθηκαν, την ερευνητική μεθοδολογία, τα σημαντικότερα ευρήματα, τους περιορισμούς κάθε μελέτης και τη συνολική συμβολή της στο γνωστικό αντικείμενο. Η χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου διευκόλυνε σημαντικά τόσο τη θεματική ταξινόμηση των άρθρων όσο και τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας παράλληλα την αναγνώριση κοινών τάσεων, διαφοροποιήσεων και ερευνητικών κενών.

Η συστηματική εξαγωγή και οργάνωση των δεδομένων αποτέλεσε το θεμέλιο για την ανάλυση και τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παράλληλα, συνέβαλε στην ανάδειξη των κυριότερων εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων, στον εντοπισμό των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών των υφιστάμενων τεχνολογικών προσεγγίσεων, καθώς και στη διαμόρφωση των συμπερασμάτων και των προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

3.7 Θεματική ανάλυση

Μετά την ολοκλήρωση της επιλογής των επιστημονικών δημοσιεύσεων, ακολούθησε η εξαγωγή και η οργανωμένη καταγραφή των δεδομένων που κρίθηκαν απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων της παρούσας έρευνας. Το στάδιο αυτό αποτελεί βασικό μέρος κάθε Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, καθώς εξασφαλίζει ότι οι πληροφορίες συλλέγονται με ενιαίο τρόπο από όλες τις επιλεγμένες μελέτες, δημιουργώντας μια αξιόπιστη βάση για τη συγκριτική ανάλυση και τη σύνθεση των ερευνητικών ευρημάτων (Kitchenham & Charters, 2007).

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε έπειτα από αναλυτική μελέτη του πλήρους κειμένου κάθε δημοσίευσης. Για κάθε άρθρο καταγράφηκαν συγκεκριμένες πληροφορίες που αφορούσαν τόσο τα βασικά βιβλιογραφικά του στοιχεία όσο και το επιστημονικό του περιεχόμενο. Η συστηματική αυτή διαδικασία διευκόλυνε την οργάνωση των μελετών, τη μεταξύ τους σύγκριση και, τελικά, τη σύνθεση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

Σε πρώτο στάδιο συγκεντρώθηκαν τα βασικά βιβλιογραφικά χαρακτηριστικά κάθε δημοσίευσης, όπως οι συγγραφείς, το έτος δημοσίευσης, ο τίτλος, το επιστημονικό περιοδικό ή συνέδριο στο οποίο δημοσιεύθηκε και, όπου ήταν διαθέσιμη, η χώρα ή η γεωγραφική περιοχή στην οποία αναφερόταν η έρευνα. Η καταγραφή των στοιχείων αυτών επέτρεψε την αποτύπωση της εξέλιξης της διεθνούς ερευνητικής δραστηριότητας στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης για τη διαχείριση τεχνικών έργων.

Στη συνέχεια εξετάστηκε το αντικείμενο και ο σκοπός κάθε μελέτης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο πεδίο εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης. Ειδικότερα, καταγράφηκε εάν η δημοσίευση αφορούσε τον χρονικό προγραμματισμό έργων, τη διαχείριση κόστους, τη διαχείριση κινδύνων, τη διαχείριση ποιότητας, τη διαχείριση πόρων, την υγεία και ασφάλεια, την παρακολούθηση της προόδου, τη διαχείριση εγγράφων και συμβάσεων ή την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η κατηγοριοποίηση αυτή αποτέλεσε τη βάση για τη θεματική οργάνωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Παράλληλα, καταγράφηκαν οι τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης που αξιοποιήθηκαν σε κάθε μελέτη, όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing), η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative Artificial Intelligence) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models). Παράλληλα, σημειώθηκαν και οι συμπληρωματικές ψηφιακές τεχνολογίες που συνδυάζονται με εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και το Cloud Computing.

Εξίσου σημαντικό μέρος της διαδικασίας αποτέλεσε η καταγραφή της ερευνητικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε σε κάθε δημοσίευση. Εξετάστηκε εάν οι μελέτες βασίζονταν σε πειραματικές εφαρμογές, μελέτες περίπτωσης, προσομοιώσεις, ανάπτυξη αλγορίθμων, βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις ή άλλες ερευνητικές προσεγγίσεις. Ταυτόχρονα, αποτυπώθηκαν τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν, οι μέθοδοι αξιολόγησης και οι βασικοί δείκτες απόδοσης, ώστε να καταστεί δυνατή η ουσιαστική σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των επιμέρους ερευνών.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στην καταγραφή των βασικών ευρημάτων κάθε μελέτης. Συγκεντρώθηκαν πληροφορίες σχετικά με τα οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης, τις προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή της, τους περιορισμούς των προτεινόμενων τεχνολογικών λύσεων, τους κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτησή τους, καθώς και τα ερευνητικά κενά που αναδεικνύονται από τους ίδιους τους συγγραφείς. Η συστηματική επεξεργασία των στοιχείων αυτών αποτέλεσε τη βάση για την κριτική σύνθεση της βιβλιογραφίας και την εξαγωγή των συμπερασμάτων της παρούσας μελέτης.

Για την υποστήριξη της διαδικασίας δημιουργήθηκε ένας Master Literature Matrix, στον οποίο συγκεντρώθηκαν με ενιαία μορφή όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων δημοσιεύσεων. Ο πίνακας περιλάμβανε τα βιβλιογραφικά στοιχεία, το αντικείμενο κάθε έρευνας, τις τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης που αξιοποιήθηκαν, την ερευνητική μεθοδολογία, τα κυριότερα ευρήματα, τους περιορισμούς κάθε μελέτης και τη συνολική συμβολή της στο γνωστικό αντικείμενο. Η αξιοποίησή του διευκόλυνε

σημαντικά τη θεματική ταξινόμηση των άρθρων, τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την αναγνώριση κοινών τάσεων, διαφοροποιήσεων και ερευνητικών κενών.

Η συστηματική εξαγωγή και οργάνωση των δεδομένων αποτέλεσε το σημείο εκκίνησης για την ανάλυση και τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παράλληλα, συνέβαλε στην ανάδειξη των σημαντικότερων εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων, στον εντοπισμό των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών των υφιστάμενων τεχνολογικών προσεγγίσεων, καθώς και στη διαμόρφωση των συμπερασμάτων και των προτάσεων για μελλοντική έρευνα.

3.8 Αξιολόγηση ποιότητας της βιβλιογραφίας

Η αξιολόγηση της ποιότητας των επιλεγμένων επιστημονικών δημοσιεύσεων αποτελεί αναπόσπαστο στάδιο κάθε Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, καθώς εξασφαλίζει ότι τα συμπεράσματα της έρευνας στηρίζονται σε αξιόπιστες, επιστημονικά τεκμηριωμένες και υψηλής ποιότητας πηγές. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στον περιορισμό πιθανών πηγών μεροληψίας, ενισχύει την εγκυρότητα των ευρημάτων και αυξάνει τη συνολική αξιοπιστία της ερευνητικής διαδικασίας (Kitchenham & Charters, 2007; Snyder, 2019).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η ποιότητα των δημοσιεύσεων εξετάστηκε μέσα από έναν συνδυασμό επιστημονικών και ποιοτικών κριτηρίων, χωρίς την εφαρμογή τυποποιημένου συστήματος βαθμολόγησης. Η επιλογή αυτής της προσέγγισης κρίθηκε καταλληλότερη, καθώς το τελικό δείγμα περιλάμβανε διαφορετικούς τύπους μελετών, όπως πρωτογενείς ερευνητικές εργασίες, μελέτες περίπτωσης, βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις, άρθρα ανάπτυξης αλγορίθμων και θεωρητικές προσεγγίσεις. Για τον λόγο αυτό, η έμφαση δόθηκε στη συνολική επιστημονική ποιότητα και στη συνεισφορά κάθε δημοσίευσης στους στόχους της παρούσας έρευνας.

Πρώτο κριτήριο αποτέλεσε η αξιοπιστία της πηγής δημοσίευσης. Προτεραιότητα δόθηκε σε άρθρα που δημοσιεύθηκαν σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με διαδικασία κρίσης από ομότιμους αξιολογητές (peer review), καθώς και σε πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων αναγνωρισμένου κύρους. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι οι μελέτες έχουν προηγουμένως υποβληθεί σε επιστημονικό έλεγχο και πληρούν βασικές προϋποθέσεις ποιότητας.

Εξίσου σημαντική ήταν η συνάφεια κάθε δημοσίευσης με το αντικείμενο της εργασίας. Στην ανασκόπηση συμπεριλήφθηκαν μόνο μελέτες που εξετάζουν άμεσα την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο ή παρουσιάζουν ευρήματα τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν ουσιαστικά στη διαχείριση τεχνικών έργων. Αντίθετα, εργασίες που αφορούσαν αποκλειστικά άλλους τομείς εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης, χωρίς δυνατότητα μεταφοράς των αποτελεσμάτων τους στο Construction Project Management, αποκλείστηκαν από την τελική ανάλυση.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στη μεθοδολογική τεκμηρίωση των επιλεγμένων μελετών. Εξετάστηκε κατά πόσο διατυπώνονται με σαφήνεια οι ερευνητικοί στόχοι, περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, τεκμηριώνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζονται με πληρότητα τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα. Όπου η μεθοδολογική περιγραφή ήταν περιορισμένη ή ανεπαρκής, η συμβολή της συγκεκριμένης δημοσίευσης αξιολογήθηκε με μεγαλύτερη προσοχή κατά τη σύνθεση της βιβλιογραφίας.

Παράλληλα, εξετάστηκε η πρωτοτυπία και η επιστημονική συνεισφορά κάθε εργασίας. Μεγαλύτερη βαρύτητα αποδόθηκε σε μελέτες που παρουσιάζουν νέες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης, προτείνουν καινοτόμες μεθοδολογικές προσεγγίσεις, αξιολογούν εφαρμογές σε πραγματικά τεχνικά έργα ή αναδεικνύουν κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση των σχετικών τεχνολογιών στον κατασκευαστικό κλάδο. Θετικά αξιολογήθηκαν επίσης οι δημοσιεύσεις που παρουσιάζουν με σαφήνεια τους περιορισμούς τους και συνοδεύονται από τεκμηριωμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή των πηγών διαδραμάτισε και η χρονική επικαιρότητα της βιβλιογραφίας. Επειδή η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί έναν

ιδιαίτερα δυναμικό και ταχέως εξελισσόμενο επιστημονικό τομέα, προτιμήθηκαν πρόσφατες δημοσιεύσεις που αποτυπώνουν τις σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις και τις εφαρμογές τους στη διαχείριση τεχνικών έργων. Παράλληλα, διατηρήθηκαν στο τελικό δείγμα ορισμένες παλαιότερες θεμελιώδεις εργασίες, όταν κρίθηκαν απαραίτητες για την κατανόηση βασικών θεωρητικών εννοιών ή της εξέλιξης του επιστημονικού πεδίου.

Κατά την εξέταση των δημοσιεύσεων λήφθηκαν επίσης υπόψη οι περιορισμοί που αναφέρονται από τους ίδιους τους συγγραφείς. Η καταγραφή τους συνέβαλε στην ορθότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, στη σύγκριση των διαφορετικών ερευνητικών προσεγγίσεων και στον εντοπισμό περιοχών όπου εξακολουθούν να υπάρχουν ερευνητικά κενά ή ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση.

Η διαδικασία αυτή ενίσχυσε την αξιοπιστία της παρούσας Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, καθώς εξασφάλισε ότι η ανάλυση και η σύνθεση των ευρημάτων βασίζονται σε έγκυρες και επιστημονικά τεκμηριωμένες πηγές. Παράλληλα, επέτρεψε τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης και ισορροπημένης εικόνας σχετικά με τις δυνατότητες, τις προκλήσεις και τις προοπτικές αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Με την ολοκλήρωση του σταδίου αυτού ολοκληρώνεται και η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας έρευνας. Η συστηματική επιλογή, η εξέταση, η οργάνωση και η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας αποτέλεσαν το απαραίτητο υπόβαθρο για την εξαγωγή των συμπερασμάτων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

3.9 Περιορισμοί της μεθοδολογίας

Η Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες μεθοδολογικές προσεγγίσεις για τη σύνθεση της διαθέσιμης επιστημονικής γνώσης. Ωστόσο, όπως συμβαίνει με κάθε ερευνητική μέθοδο, συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η αναγνώρισή τους ενισχύει τη διαφάνεια της

ερευνητικής διαδικασίας και επιτρέπει την ορθότερη αποτίμηση της εγκυρότητας και της δυνατότητας γενίκευσης των συμπερασμάτων (Snyder, 2019).

Ο βασικότερος περιορισμός της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι στηρίζεται αποκλειστικά σε δευτερογενή δεδομένα, τα οποία προέρχονται από δημοσιευμένες επιστημονικές εργασίες. Κατά συνέπεια, τα ευρήματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα, την πληρότητα και τη μεθοδολογική επάρκεια των πηγών που επιλέχθηκαν. Παρότι εφαρμόστηκαν σαφή κριτήρια για την επιλογή και την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας, η έρευνα δεν περιλαμβάνει συλλογή ή ανάλυση πρωτογενών δεδομένων, γεγονός που δεν επιτρέπει την άμεση εμπειρική επιβεβαίωση των συμπερασμάτων.

Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη σχετίζεται με τη διαρκή εξέλιξη της Τεχνητής Νοημοσύνης ως επιστημονικού και τεχνολογικού πεδίου. Ιδιαίτερα στον τομέα της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων, οι εξελίξεις είναι συνεχείς και ο αριθμός των νέων δημοσιεύσεων αυξάνεται με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς. Είναι επομένως πιθανό, μετά την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής αναζήτησης, να έχουν δημοσιευθεί νέες εργασίες που δεν ήταν δυνατό να συμπεριληφθούν στην παρούσα ανασκόπηση. Πρόκειται για έναν περιορισμό που χαρακτηρίζει γενικότερα τις βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις σε ταχέως εξελισσόμενα γνωστικά αντικείμενα.

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας επικεντρώθηκε κυρίως σε δημοσιεύσεις στην αγγλική γλώσσα και σε διεθνώς αναγνωρισμένες επιστημονικές βάσεις δεδομένων. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας των πηγών, είναι όμως πιθανό να έχει οδηγήσει στον αποκλεισμό αξιόλογων μελετών που δημοσιεύθηκαν σε άλλες γλώσσες ή είναι διαθέσιμες μέσω εξειδικευμένων βάσεων δεδομένων οι οποίες δεν εντάχθηκαν στη στρατηγική αναζήτησης.

Επιπρόσθετα, η διαθέσιμη βιβλιογραφία εμφανίζει σημαντική ετερογένεια. Οι μελέτες διαφοροποιούνται ως προς τους ερευνητικούς τους στόχους, τις τεχνολογίες που αξιοποιούν, τα δεδομένα στα οποία βασίζονται, τη μεθοδολογία που ακολουθούν και τα κριτήρια με τα οποία αξιολογούν τα αποτελέσματά τους. Η ποικιλομορφία αυτή δυσχεραίνει την άμεση σύγκριση των επιμέρους ερευνών και δεν επιτρέπει την

εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων μέσω μετα-ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό, η σύνθεση των ευρημάτων πραγματοποιήθηκε με ποιοτική και συγκριτική προσέγγιση.

Παράλληλα, μεγάλο μέρος των δημοσιευμένων εργασιών βασίζεται σε πιλοτικές εφαρμογές, μελέτες περίπτωσης ή παραδείγματα που αφορούν συγκεκριμένα έργα, οργανισμούς ή γεωγραφικές περιοχές. Ως αποτέλεσμα, η δυνατότητα γενίκευσης των ευρημάτων τους εξαρτάται από παράγοντες όπως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε έργου, ο βαθμός ψηφιακής ωριμότητας των οργανισμών και η διαθεσιμότητα κατάλληλων δεδομένων.

Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι η θεματική ταξινόμηση των δημοσιεύσεων εμπεριέχει αναπόφευκτα έναν βαθμό επιστημονικής κρίσης από την πλευρά του ερευνητή. Αν και εφαρμόστηκαν προκαθορισμένα κριτήρια και ακολουθήθηκε συστηματική διαδικασία κατηγοριοποίησης, ορισμένες μελέτες θα μπορούσαν εύλογα να ενταχθούν σε περισσότερες από μία θεματικές ενότητες, λόγω του διεπιστημονικού χαρακτήρα της Τεχνητής Νοημοσύνης και της πολυπλοκότητας των εφαρμογών της στον κατασκευαστικό κλάδο.

Παρά τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν, η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε παρέχει ισχυρή βάση για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων. Η αξιοποίηση πολλαπλών επιστημονικών βάσεων δεδομένων, η εφαρμογή σαφώς καθορισμένων κριτηρίων επιλογής και αξιολόγησης των δημοσιεύσεων, καθώς και η συστηματική θεματική ανάλυση των επιλεγμένων μελετών συνέβαλαν στη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης και τεκμηριωμένης εικόνας της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Οι παραπάνω περιορισμοί δεν μειώνουν την επιστημονική αξία της παρούσας εργασίας. Αντίθετα, αναδεικνύουν πεδία που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης. Η πραγματοποίηση εμπειρικών ερευνών, η εφαρμογή των σχετικών τεχνολογιών σε πραγματικά τεχνικά έργα και η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών προσεγγίσεων μπορούν να εμπλουτίσουν τη διαθέσιμη γνώση και να ενισχύσουν την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικότερα στη διοίκηση και διαχείριση τεχνικών έργων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

4.1 Συγκριτική ανάλυση των εφαρμογών AI

Η συγκριτική εξέταση των επιλεγμένων επιστημονικών δημοσιεύσεων δείχνει ότι η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο έχει πλέον ξεπεράσει το στάδιο ενός περιορισμένου ερευνητικού ενδιαφέροντος και εξελίσσεται σε βασικό πυλώνα του ψηφιακού μετασχηματισμού του Construction Project Management. Η συνεχής αύξηση των σχετικών δημοσιεύσεων, ιδιαίτερα κατά την τελευταία δεκαετία, αποτυπώνει το αυξανόμενο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την αξιοποίηση τεχνολογιών AI με στόχο την αντιμετώπιση των σύνθετων προκλήσεων που χαρακτηρίζουν τα σύγχρονα τεχνικά έργα. Παρά τη σημαντική αυτή πρόοδο, οι επιμέρους εφαρμογές διαφοροποιούνται αισθητά ως προς το επίπεδο ωριμότητας, τις τεχνολογικές απαιτήσεις, το είδος των δεδομένων που αξιοποιούν και τον βαθμό ενσωμάτωσής τους στην καθημερινή πρακτική των οργανισμών.

Από τη σύνθεση των διαθέσιμων ερευνών προκύπτει ότι η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) αποτελεί σήμερα την πλέον ώριμη και διαδεδομένη τεχνολογία Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Οι περισσότερες εφαρμογές της αφορούν την πρόβλεψη του κόστους, της διάρκειας των έργων, των καθυστερήσεων, της παραγωγικότητας και των κινδύνων, αξιοποιώντας ιστορικά δεδομένα και τεχνικές επιβλεπόμενης ή μη επιβλεπόμενης μάθησης. Η σύγκριση των σχετικών μελετών δείχνει ότι τα μοντέλα Machine Learning υπερέχουν συνήθως των παραδοσιακών στατιστικών μεθόδων ως προς την ακρίβεια των προβλέψεων, ιδίως όταν εκπαιδεύονται σε μεγάλα και ποιοτικά σύνολα δεδομένων (Marzouk & Hisham, 2020· Pan & Zhang, 2021).

Διαφορετική εικόνα παρουσιάζει η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που βασίζονται στην επεξεργασία εικόνων,

βίντεο και δεδομένων από αισθητήρες. Οι σχετικές εργασίες αναφέρουν υψηλά ποσοστά ακρίβειας στην αναγνώριση αντικειμένων, στην παρακολούθηση της προόδου των εργασιών, στον εντοπισμό κατασκευαστικών ελαττωμάτων και στην ανίχνευση επικίνδυνων καταστάσεων στο εργοτάξιο. Την ίδια στιγμή, επισημαίνεται ότι η ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ, μεγάλο όγκο εκπαιδευτικών δεδομένων και εξειδικευμένη τεχνογνωσία, στοιχεία που εξακολουθούν να περιορίζουν την ευρεία αξιοποίησή τους, ιδιαίτερα από μικρότερες τεχνικές επιχειρήσεις (Chen et al., 2021).

Η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision) συνδέεται άμεσα με τις εφαρμογές της Βαθιάς Μάθησης και αξιοποιεί εικόνες ή βίντεο που συλλέγονται μέσω καμερών, μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones), φορητών συσκευών και συστημάτων τρισδιάστατης σάρωσης. Η ανάλυση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι οι εφαρμογές αυτές διευκολύνουν σημαντικά την αυτοματοποίηση των επιθεωρήσεων, την παρακολούθηση της προόδου, τον ποιοτικό έλεγχο και την ενίσχυση της υγείας και ασφάλειας στα εργοτάξια. Παράλληλα, περιορίζουν τον χρόνο που απαιτείται για τους επιτόπιους ελέγχους και μειώνουν την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης σε επαναλαμβανόμενες διαδικασίες, βελτιώνοντας τόσο την αποδοτικότητα όσο και την αξιοπιστία των επιθεωρήσεων (Darko et al., 2020).

Η πιο πρόσφατη κατεύθυνση της διεθνούς έρευνας αφορά την Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες εφαρμογών, οι οποίες εστιάζουν κυρίως στην πρόβλεψη ή στην αναγνώριση προτύπων, τα συστήματα Generative AI υποστηρίζουν γνωσιακές λειτουργίες, όπως η σύνταξη τεχνικών αναφορών, η ανάλυση συμβάσεων, η επεξεργασία τεχνικών προδιαγραφών, η αναζήτηση γνώσης και η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Οι περισσότερες μελέτες αναγνωρίζουν ότι οι τεχνολογίες αυτές διαθέτουν ιδιαίτερα μεγάλες προοπτικές για τον μετασχηματισμό των διοικητικών διαδικασιών των τεχνικών έργων. Παράλληλα, όμως, υπογραμμίζουν ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, η προστασία των εμπιστευτικών δεδομένων και η διατήρηση της ανθρώπινης εποπτείας

εξακολουθούν να αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις για την ευρύτερη εφαρμογή τους (Cao et al., 2024).

Ένα συμπέρασμα που επαναλαμβάνεται σχεδόν σε όλες τις δημοσιεύσεις αφορά τον καθοριστικό ρόλο της ποιότητας των διαθέσιμων δεδομένων. Ανεξάρτητα από το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης εξαρτάται από την ύπαρξη αξιόπιστων, επαρκών και κατάλληλα οργανωμένων δεδομένων. Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην ενοποίηση πληροφοριών που προέρχονται από τεχνολογίες όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και τις πλατφόρμες Cloud Computing. Η διασύνδεση αυτών των τεχνολογιών δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό περιβάλλον, μέσα στο οποίο οι εφαρμογές AI μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικότερα και να υποστηρίξουν διαδικασίες λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Pan & Zhang, 2021).

Παρά την πρόοδο που καταγράφεται τα τελευταία χρόνια, η συγκριτική ανάλυση αναδεικνύει και ορισμένες αδυναμίες της υφιστάμενης βιβλιογραφίας. Οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση μεμονωμένων ζητημάτων, όπως η εκτίμηση κόστους, η πρόβλεψη καθυστερήσεων ή η αναγνώριση κινδύνων, χωρίς να εξετάζουν την ολοκληρωμένη αξιοποίηση πολλαπλών εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης σε όλο τον κύκλο ζωής ενός τεχνικού έργου. Επιπλέον, σχετικά περιορισμένος παραμένει ο αριθμός των μελετών που διερευνούν θέματα οργανωσιακής ετοιμότητας, διαχείρισης της αλλαγής, οικονομικής βιωσιμότητας, αποδοχής των νέων τεχνολογιών από τους χρήστες ή μακροχρόνιας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων μετά την εφαρμογή τους.

Από τη συνολική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη έχει πλέον αποκτήσει το απαραίτητο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας ώστε να λειτουργήσει ως βασικό εργαλείο υποστήριξης της διαχείρισης τεχνικών έργων. Παράλληλα, γίνεται σαφές ότι η επιτυχία της δεν εξαρτάται μόνο από τις δυνατότητες των αλγορίθμων, αλλά από έναν ευρύτερο συνδυασμό τεχνολογικών, οργανωσιακών και ανθρώπινων παραγόντων. Η ποιότητα των δεδομένων, η ψηφιακή ωριμότητα των οργανισμών, η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων,

η ανάπτυξη κατάλληλων δεξιοτήτων και η ύπαρξη αποτελεσματικών μηχανισμών διακυβέρνησης της Τεχνητής Νοημοσύνης αναδεικνύονται σταθερά ως προϋποθέσεις για την επιτυχή αξιοποίησή της. Το κοινό συμπέρασμα της σύγχρονης βιβλιογραφίας είναι ότι ο ουσιαστικός μετασχηματισμός του Construction Project Management δεν προκύπτει από την αποσπασματική χρήση μεμονωμένων εργαλείων AI, αλλά από την οργανική ενσωμάτωσή τους στις διαδικασίες διοίκησης, οργάνωσης και λήψης αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου.

4.2 Συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών AI

Η συγκριτική εξέταση της διεθνούς βιβλιογραφίας δείχνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) δεν συνιστά μία ενιαία τεχνολογία, αλλά ένα ευρύ σύνολο διαφορετικών προσεγγίσεων, καθεμία από τις οποίες διαθέτει διακριτά χαρακτηριστικά, διαφορετικό βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας και εξειδίκευση ως προς τα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει. Οι περισσότερες μελέτες συμφωνούν ότι η αποτελεσματικότητα μιας εφαρμογής AI δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις δυνατότητες των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται, αλλά κυρίως από την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας σε συνάρτηση με το είδος των διαθέσιμων δεδομένων, τις επιχειρησιακές ανάγκες και τις απαιτήσεις κάθε τεχνικού έργου (Pan & Zhang, 2021).

Ανάμεσα στις επιμέρους τεχνολογίες, η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) εμφανίζεται ως η πιο ώριμη και ευρύτερα αξιοποιούμενη λύση στον κατασκευαστικό κλάδο. Οι εφαρμογές της εστιάζουν κυρίως σε προβλήματα πρόβλεψης και βελτιστοποίησης, όπως η εκτίμηση κόστους, η πρόβλεψη καθυστερήσεων, η αξιολόγηση κινδύνων και η υποστήριξη του προγραμματισμού έργων, αξιοποιώντας ιστορικά δεδομένα. Βασικό της πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα παραγωγής αξιόπιστων προβλέψεων ακόμη και σε ιδιαίτερα σύνθετα περιβάλλοντα, ενώ η αποτελεσματικότητά της επηρεάζεται άμεσα από την ποιότητα και την επάρκεια των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των μοντέλων (Marzouk & Hisham, 2020).

Η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning) αποτελεί ουσιαστικά εξέλιξη της Machine Learning και χρησιμοποιείται κυρίως όταν απαιτείται επεξεργασία μεγάλου όγκου μη δομημένων δεδομένων, όπως εικόνες, βίντεο και πληροφορίες από αισθητήρες. Από τη συγκριτική αξιολόγηση των σχετικών δημοσιεύσεων προκύπτει ότι υπερτερεί των συμβατικών τεχνικών Machine Learning σε εφαρμογές αναγνώρισης αντικειμένων και ανάλυσης οπτικών δεδομένων, επιτυγχάνοντας ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, η αξιοποίησή της συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, μεγάλα σύνολα εκπαίδευσης και εξειδικευμένη τεχνογνωσία, ενώ η περιορισμένη ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση (Chen et al., 2021).

Διαφορετικό πεδίο εφαρμογής παρουσιάζει η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP), η οποία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση μη δομημένων πληροφοριών που περιλαμβάνονται σε τεχνικά κείμενα. Οι σχετικές μελέτες αναδεικνύουν τον ολοένα αυξανόμενο ρόλο της στην ανάλυση συμβάσεων, τεχνικών προδιαγραφών, ημερολογίων έργου και αναφορών προόδου. Σε σύγκριση με τεχνολογίες που βασίζονται κυρίως σε αριθμητικά ή οπτικά δεδομένα, το NLP συμβάλλει περισσότερο στη διαχείριση της οργανωσιακής γνώσης και στη βελτίωση της αξιοποίησης των διαθέσιμων πληροφοριών. Παράλληλα, η απόδοσή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γλωσσική πολυπλοκότητα των τεχνικών κειμένων και από την προσαρμογή των γλωσσικών μοντέλων στο εξειδικευμένο λεξιλόγιο του κατασκευαστικού κλάδου.

Από τις πιο εξειδικευμένες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στον χώρο των κατασκευών είναι η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision). Σε αντίθεση με τη Machine Learning και το NLP, η συγκεκριμένη τεχνολογία επεξεργάζεται εικόνες και βίντεο που συλλέγονται από κάμερες, drones και συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης. Η σύνθεση των διαθέσιμων ερευνών δείχνει ότι συμβάλλει σημαντικά στην παρακολούθηση της προόδου των εργασιών, στον έλεγχο ποιότητας και στην ενίσχυση της υγείας και ασφάλειας στα εργοτάξια, ενώ παράλληλα μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για τις επιθεωρήσεις και αυξάνει την αντικειμενικότητα των ελέγχων. Παρά

τα πλεονεκτήματά της, η αποτελεσματικότητά της εξακολουθεί να επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι συνθήκες φωτισμού, οι καιρικές συνθήκες και η ποιότητα των εικόνων που συλλέγονται (Darko et al., 2020).

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στον χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης αφορά την Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs). Οι τεχνολογίες αυτές διαφοροποιούνται ουσιαστικά από τις προηγούμενες, καθώς δεν περιορίζονται στην πρόβλεψη ή στην αναγνώριση προτύπων, αλλά υποστηρίζουν την παραγωγή νέου περιεχομένου και τη διαχείριση σύνθετων γνωσιακών διαδικασιών. Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει τις σημαντικές δυνατότητές τους στην αυτοματοποίηση της σύνταξης τεχνικών εγγράφων, στην ανάλυση συμβάσεων, στη διαχείριση γνώσης και στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Ταυτόχρονα, όμως, επισημαίνει ότι ζητήματα όπως η αξιοπιστία των παραγόμενων πληροφοριών, η ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων, η προστασία των δεδομένων και η ανάγκη ανθρώπινης εποπτείας εξακολουθούν να αποτελούν βασικούς περιορισμούς για την πλήρη αξιοποίησή τους σε κρίσιμες διαδικασίες διοίκησης έργων (Cao et al., 2024).

Η σύγκριση των επιμέρους τεχνολογιών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καμία δεν μπορεί να θεωρηθεί από μόνη της η καταλληλότερη για όλες τις λειτουργίες του Construction Project Management. Κάθε προσέγγιση παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, αλλά και διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τα δεδομένα, τις υπολογιστικές υποδομές και την οργανωσιακή υποστήριξη που απαιτείται για την εφαρμογή της. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν μέσα από τον συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών, οι οποίες λειτουργούν συμπληρωματικά και ενσωματώνονται σε ένα ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα που περιλαμβάνει το BIM, τα Digital Twins, το Internet of Things και τις πλατφόρμες Cloud Computing.

Από τη συνολική αποτίμηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η μελλοντική εξέλιξη του κατασκευαστικού κλάδου δεν πρόκειται να βασιστεί στην επικράτηση μιας μόνο τεχνολογίας Τεχνητής Νοημοσύνης. Αντίθετα, η τάση που διαμορφώνεται είναι η ολοένα στενότερη ενοποίηση διαφορετικών τεχνολογικών

προσεγγίσεων σε ολοκληρωμένα ευφυή πληροφοριακά συστήματα, τα οποία θα συνδυάζουν δυνατότητες προβλεπτικής ανάλυσης, επεξεργασίας εικόνας, κατανόησης φυσικής γλώσσας και παραγωγής γνώσης. Η σύγκλιση αυτών των τεχνολογιών αναμένεται να αποτελέσει το επόμενο στάδιο εξέλιξης του Construction Project Management.

4.3 Κυρίαρχες ερευνητικές τάσεις

Η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας δείχνει ότι η έρευνα γύρω από την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο έχει γνωρίσει ιδιαίτερα έντονη ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία. Η πρόοδος των ψηφιακών τεχνολογιών, η συνεχώς αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων και η ανάγκη για αποτελεσματικότερη διοίκηση των τεχνικών έργων έχουν συμβάλει στην αισθητή αύξηση των σχετικών επιστημονικών δημοσιεύσεων. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μια σαφής αλλαγή στον προσανατολισμό της έρευνας, καθώς το ενδιαφέρον μετακινείται από την ανάπτυξη μεμονωμένων αλγορίθμων προς τη δημιουργία ολοκληρωμένων ευφυών συστημάτων που υποστηρίζουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των έργων (Pan & Zhang, 2021).

Ιδιαίτερα έντονη είναι η στροφή προς προγνωστικά και προληπτικά μοντέλα λήψης αποφάσεων (predictive analytics), τα οποία αντικαθιστούν σταδιακά τις παραδοσιακές περιγραφικές και αναδρομικές προσεγγίσεις. Οι περισσότερες πρόσφατες μελέτες αξιοποιούν τεχνικές Machine Learning και Deep Learning για την πρόβλεψη καθυστερήσεων, υπερβάσεων κόστους, κινδύνων, επιπέδων παραγωγικότητας και συμβάντων που σχετίζονται με την ασφάλεια, δίνοντας τη δυνατότητα έγκαιρου εντοπισμού πιθανών προβλημάτων πριν αυτά επηρεάσουν την εξέλιξη του έργου. Η εξέλιξη αυτή αντανακλά τη σταδιακή μετάβαση του Construction Project Management από μια αντιδραστική μορφή διοίκησης σε μια περισσότερο προληπτική και βασισμένη στα δεδομένα προσέγγιση.

Παράλληλα, αυξάνεται διαρκώς το ενδιαφέρον για τεχνολογίες που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από το εργοτάξιο. Η

αξιοποίηση εφαρμογών Computer Vision, μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones), αισθητήρων Internet of Things (IoT), τρισδιάστατης σάρωσης και Digital Twins καθιστά εφικτή τη συνεχή παρακολούθηση της προόδου των εργασιών, τον έλεγχο ποιότητας και την ενίσχυση της ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, οι περιοδικοί και κυρίως χειροκίνητοι έλεγχοι δίνουν σταδιακά τη θέση τους σε συστήματα συνεχούς επιτήρησης που λειτουργούν με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης (Darko et al., 2020).

Μια ακόμη τάση που καταγράφεται με συνέπεια στις νεότερες δημοσιεύσεις αφορά την ενοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης με το ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα του Construction 4.0. Η AI δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως μια αυτόνομη τεχνολογία, αλλά ως μέρος ενός ολοκληρωμένου πληροφοριακού περιβάλλοντος, στο οποίο συνδυάζονται το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, τα Big Data, το Internet of Things και οι υπηρεσίες Cloud Computing. Η διασύνδεση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την αξιοποίηση δεδομένων από πολλαπλές πηγές, διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο και ενισχύει τόσο τη διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων όσο και τον συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων.

Ιδιαίτερη δυναμική παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια και η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI), σε συνδυασμό με τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs). Η σχετική βιβλιογραφία αυξάνεται με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς μετά το 2023 και μεταφέρει το ενδιαφέρον από την αυτοματοποίηση τεχνικών υπολογισμών στην υποστήριξη γνωσιακών και διοικητικών διαδικασιών. Οι εφαρμογές που εξετάζονται περιλαμβάνουν την ανάλυση συμβάσεων, τη σύνταξη τεχνικών αναφορών, τη διαχείριση οργανωσιακής γνώσης, την αναζήτηση πληροφοριών και την υποστήριξη των στελεχών μέσω ευφυών ψηφιακών βοηθών. Παρά τις σημαντικές δυνατότητές τους, οι περισσότερες μελέτες υπογραμμίζουν ότι η ευρεία αξιοποίησή τους προϋποθέτει αποτελεσματικούς μηχανισμούς ελέγχου, επαλήθευσης και ανθρώπινης εποπτείας, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παράγονται (Cao et al., 2024).

Τα τελευταία χρόνια γίνεται επίσης εμφανής μια αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζεται η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Ενώ οι πρώτες έρευνες

εστίαζαν σχεδόν αποκλειστικά στην ανάπτυξη και αξιολόγηση νέων αλγορίθμων, οι νεότερες μελέτες δίνουν ολοένα μεγαλύτερη έμφαση σε οργανωσιακές παραμέτρους, όπως η ψηφιακή ωριμότητα των επιχειρήσεων, η διαχείριση της αλλαγής, η ανάπτυξη δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού, η αποδοχή των νέων τεχνολογιών από τους χρήστες και η αποτελεσματική διακυβέρνηση των δεδομένων. Η μετατόπιση αυτή υποδηλώνει ότι η επιτυχής αξιοποίηση της ΑΙ δεν αποτελεί πλέον μόνο τεχνολογικό ζήτημα, αλλά συνδέεται άμεσα και με τη διοίκηση των οργανισμών.

Αντίστοιχα, ολοένα μεγαλύτερη προσοχή δίνεται σε θέματα ηθικής, διαφάνειας και αξιοπιστίας των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι πρόσφατες δημοσιεύσεις τονίζουν την ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο ερμηνεύσιμων αλγορίθμων, ιδιαίτερα όταν τα συστήματα ΑΙ υποστηρίζουν κρίσιμες αποφάσεις που αφορούν την ασφάλεια, το κόστος ή τον χρονικό προγραμματισμό των έργων. Παράλληλα, η προστασία προσωπικών δεδομένων, η κυβερνοασφάλεια, η διακυβέρνηση των δεδομένων και η συμμόρφωση με το συνεχώς εξελισσόμενο κανονιστικό πλαίσιο αναδεικνύονται σε βασικούς άξονες της σύγχρονης ερευνητικής δραστηριότητας.

Παρότι το ενδιαφέρον για την Τεχνητή Νοημοσύνη διευρύνεται διαρκώς, η κατανομή της ερευνητικής δραστηριότητας δεν είναι ομοιόμορφη. Οι περισσότερες δημοσιεύσεις εξακολουθούν να επικεντρώνονται στον χρονικό προγραμματισμό, στη διαχείριση κόστους, στη διαχείριση κινδύνων και στην υγεία και ασφάλεια, ενώ αισθητά λιγότερες μελέτες εξετάζουν ζητήματα όπως η διαχείριση συμβάσεων, οι προμήθειες, η διαχείριση ενδιαφερόμενων μερών, η οργανωσιακή μάθηση και η στρατηγική λήψη αποφάσεων. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, εξακολουθούν να υπάρχουν γνωστικά πεδία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Από τη συνολική αποτίμηση των επιλεγμένων δημοσιεύσεων προκύπτει ότι η διεθνής έρευνα κατευθύνεται πλέον προς την ανάπτυξη ολοκληρωμένων ευφυών οικοσυστημάτων, όπου διαφορετικές τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης λειτουργούν σε συνδυασμό με τα ψηφιακά εργαλεία του Construction 4.0. Η κυρίαρχη ερευνητική επιδίωξη δεν περιορίζεται πλέον στη βελτίωση της ακρίβειας των επιμέρους αλγορίθμων, αλλά εστιάζει στην ουσιαστική ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης

στις διαδικασίες διοίκησης, συνεργασίας και λήψης αποφάσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των τεχνικών έργων.

4.4 Κριτική αποτίμηση της βιβλιογραφίας

Η συστηματική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας δείχνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) έχει πλέον καθιερωθεί ως ένα από τα πλέον δυναμικά ερευνητικά πεδία στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η αισθητή αύξηση των επιστημονικών δημοσιεύσεων κατά την τελευταία δεκαετία αντανακλά το διαρκώς ενισχυόμενο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας για την ανάπτυξη ευφών συστημάτων που μπορούν να υποστηρίξουν τον προγραμματισμό, την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη λήψη αποφάσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου. Παρότι η πρόοδος που έχει σημειωθεί είναι σημαντική, η κριτική επισκόπηση των διαθέσιμων μελετών δείχνει ότι το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο εξακολουθεί να εμφανίζει ανισορροπίες, μεθοδολογικούς περιορισμούς και ζητήματα που δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί επαρκώς (Pan & Zhang, 2021).

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των δημοσιεύσεων προκύπτει ότι η θετική συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης έχει πλέον τεκμηριωθεί σε αρκετές βασικές λειτουργίες του Construction Project Management. Οι περισσότερες έρευνες αναφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια των προβλέψεων, στη μείωση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων, στην αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων εργασιών, στη διαχείριση κινδύνων και στη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων. Επιπλέον, ο συνδυασμός της AI με τεχνολογίες όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT) και τα Big Data δημιουργεί τις προϋποθέσεις για περισσότερο ολοκληρωμένα, διασυνδεδεμένα και λειτουργικά πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης έργων (Darko et al., 2020).

Παρά τα ενθαρρυντικά αυτά αποτελέσματα, η κατανομή της ερευνητικής δραστηριότητας δεν είναι ομοιόμορφη. Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται σε θέματα όπως η πρόβλεψη καθυστερήσεων, η εκτίμηση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου και η υγεία και ασφάλεια στα

εργοτάξια. Αντίθετα, λειτουργίες ιδιαίτερης σημασίας για τη διοίκηση έργων, όπως η διαχείριση συμβάσεων, οι προμήθειες, η διαχείριση ενδιαφερόμενων μερών, η οργανωσιακή γνώση, η διοίκηση χαρτοφυλακίου έργων και η στρατηγική λήψη αποφάσεων, έχουν αποτελέσει αντικείμενο σαφώς λιγότερων ερευνών. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι η βιβλιογραφία εξακολουθεί να δίνει μεγαλύτερη έμφαση στις τεχνικές και λειτουργικές εφαρμογές της ΑΙ, αφήνοντας σε δεύτερο πλάνο τις ευρύτερες διοικητικές και οργανωσιακές διαστάσεις της.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της σύγχρονης ερευνητικής δραστηριότητας είναι ο έντονα τεχνοκεντρικός προσανατολισμός της. Μεγάλος αριθμός μελετών επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων ή στη βελτίωση της απόδοσής τους, χωρίς να εξετάζει σε βάθος τον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν αποτελεσματικά στην καθημερινή λειτουργία των κατασκευαστικών οργανισμών. Ως αποτέλεσμα, ζητήματα όπως η οργανωσιακή ετοιμότητα, η διαχείριση της αλλαγής, η ανάπτυξη των απαραίτητων δεξιοτήτων, η αποδοχή των νέων τεχνολογιών από τους εργαζομένους και ο επανασχεδιασμός των επιχειρησιακών διαδικασιών εξακολουθούν να απασχολούν περιορισμένο αριθμό ερευνών.

Παράλληλα, σημαντικό μέρος της διαθέσιμης βιβλιογραφίας στηρίζεται σε πιλοτικές εφαρμογές, μελέτες περίπτωσης ή έργα μικρής κλίμακας. Παρότι οι προσεγγίσεις αυτές συμβάλλουν ουσιαστικά στην ανάπτυξη και δοκιμή νέων τεχνολογικών λύσεων, δεν επιτρέπουν πάντοτε την ασφαλή γενίκευση των αποτελεσμάτων. Εξακολουθούν να είναι σχετικά λίγες οι μελέτες που αξιολογούν τη λειτουργία συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης σε μεγάλα κατασκευαστικά έργα ή εξετάζουν τη μακροχρόνια επίδρασή τους στην απόδοση και στη λειτουργία των οργανισμών.

Η κριτική επισκόπηση των δημοσιεύσεων δείχνει ακόμη ότι η αξιολόγηση των εφαρμογών ΑΙ βασίζεται κυρίως σε τεχνικούς δείκτες, όπως η ακρίβεια των προβλέψεων, η ταχύτητα επεξεργασίας ή η αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης. Αντίθετα, αισθητά μικρότερη έμφαση δίνεται στις οικονομικές και οργανωσιακές συνέπειες της υιοθέτησης των τεχνολογιών αυτών. Θέματα όπως η απόδοση της επένδυσης (Return on Investment – ROI), το συνολικό κόστος εφαρμογής, οι

απαιτούμενες οργανωσιακές αλλαγές, η διαχείριση επιχειρησιακών κινδύνων και η πραγματική επίδραση στην παραγωγικότητα των επιχειρήσεων δεν έχουν μελετηθεί στον ίδιο βαθμό. Το κενό αυτό δυσχεραίνει την ολοκληρωμένη αποτίμηση της επιχειρησιακής αξίας των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης.

Ξεχωριστό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ταχεία ανάπτυξη της βιβλιογραφίας που αφορά την Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs). Αν και οι πρώτες δημοσιεύσεις αναδεικνύουν σημαντικές δυνατότητες στην αυτοματοποίηση διοικητικών και γνωσιακών διαδικασιών, το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο βρίσκεται ακόμη σε πρώιμη φάση εξέλιξης. Οι περισσότερες εργασίες έχουν διερευνητικό χαρακτήρα και περιορισμένη εμπειρική τεκμηρίωση, ενώ παραμένουν ανοικτά ζητήματα που αφορούν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, τη διαφάνεια των μοντέλων, την προστασία των δεδομένων, τη λογοδοσία των αλγορίθμων και τη συμμόρφωση με τα νέα κανονιστικά πλαίσια (Cao et al., 2024).

Επιπλέον, από τη σύνθεση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι δεν υπάρχει ακόμη ένα κοινά αποδεκτό πλαίσιο αξιολόγησης της επιτυχούς υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στις κατασκευαστικές επιχειρήσεις. Παρότι αρκετές μελέτες προτείνουν επιμέρους δείκτες ή εξετάζουν συγκεκριμένους παράγοντες επιτυχίας, απουσιάζουν ολοκληρωμένες προσεγγίσεις που να συνδυάζουν τεχνολογικές, οργανωσιακές, οικονομικές και διοικητικές διαστάσεις. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι η μελλοντική έρευνα χρειάζεται να μετατοπιστεί από την αξιολόγηση μεμονωμένων εφαρμογών σε περισσότερο ολιστικές προσεγγίσεις, οι οποίες θα αποτιμούν τη συνολική επίδραση της AI στη λειτουργία των οργανισμών.

Συνοψίζοντας, η κριτική αποτίμηση της διεθνούς βιβλιογραφίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιστημονική γνώση σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων έχει εξελιχθεί σημαντικά, χωρίς ωστόσο να έχει φτάσει ακόμη σε πλήρη ωριμότητα. Παρά την ανάπτυξη πλήθους τεχνολογικών εφαρμογών και την τεκμηρίωση ουσιαστικών ωφελειών, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά ερευνητικά κενά που αφορούν την οργανωσιακή ενσωμάτωση των συστημάτων AI, τη μακροχρόνια αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους, την

οικονομική αποτίμηση των επενδύσεων και την εμπειρική διερεύνηση εφαρμογών σε πραγματικά έργα μεγάλης κλίμακας. Η περαιτέρω ανάπτυξη του επιστημονικού πεδίου προϋποθέτει περισσότερο διεπιστημονικές και εφαρμοσμένες ερευνητικές προσεγγίσεις, οι οποίες θα συμβάλουν στην ασφαλή, αποδοτική και ουσιαστική αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.

4.5 Σύνθεση των ερευνητικών κενών

Η συστηματική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας έδειξε ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στην εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο, εξακολουθούν να υπάρχουν ουσιαστικά ερευνητικά κενά που περιορίζουν τόσο την επιστημονική κατανόηση όσο και την ευρύτερη αξιοποίηση των σχετικών τεχνολογιών στην πράξη. Αν και η παραγωγή νέας γνώσης έχει αυξηθεί με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη αυτή δεν συνοδεύεται πάντοτε από αντίστοιχη εμβάθυνση σε οργανωσιακές, διοικητικές και επιχειρησιακές πτυχές του αντικειμένου.

Το σημαντικότερο ίσως εύρημα αφορά τον κατακερματισμό της υφιστάμενης έρευνας. Η μεγαλύτερη μερίδα των δημοσιεύσεων επικεντρώνεται σε επιμέρους εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως η πρόβλεψη καθυστερήσεων, η εκτίμηση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου ή η ασφάλεια των εργοταξίων. Αντίθετα, είναι περιορισμένος ο αριθμός των μελετών που εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν συνδυαστικά στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης διαχείρισης τεχνικών έργων. Ως αποτέλεσμα, η διαθέσιμη γνώση παραμένει σε μεγάλο βαθμό αποσπασματική και δυσχεραίνει τη διαμόρφωση μιας συνολικής εικόνας για τον ρόλο της Τεχνητής Νοημοσύνης στο Construction Project Management (Pan & Zhang, 2021).

Αντίστοιχα, παρατηρείται σαφής υπεροχή των τεχνολογικών προσεγγίσεων έναντι των οργανωσιακών και διοικητικών αναλύσεων. Οι περισσότερες εργασίες αξιολογούν την απόδοση αλγορίθμων ή παρουσιάζουν νέες τεχνολογικές λύσεις, ενώ αισθητά

λιγότερες εξετάζουν ζητήματα όπως η οργανωσιακή ετοιμότητα, η διαχείριση της αλλαγής, η ανάπτυξη των απαραίτητων δεξιοτήτων, η αποδοχή των συστημάτων από τους χρήστες και η προσαρμογή των επιχειρησιακών διαδικασιών. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι η επιτυχής αξιοποίηση της ΑΙ εξακολουθεί να αντιμετωπίζεται κυρίως ως τεχνολογικό εγχείρημα και λιγότερο ως διοικητική πρόκληση.

Ένα ακόμη πεδίο στο οποίο εντοπίζεται σημαντικό έλλειμμα αφορά την εμπειρική τεκμηρίωση των εφαρμογών σε πραγματικές συνθήκες έργων. Παρότι αρκετές δημοσιεύσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, μεγάλο μέρος των διαθέσιμων στοιχείων προέρχεται από πιλοτικές εφαρμογές, πειραματικά μοντέλα ή μελέτες περίπτωσης μικρής κλίμακας. Παραμένουν σχετικά λίγες οι έρευνες που αξιολογούν τη λειτουργία συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης σε σύνθετα έργα μεγάλης διάρκειας ή εξετάζουν τη μακροχρόνια επίδρασή τους στην απόδοση των οργανισμών.

Εξίσου περιορισμένη εμφανίζεται η βιβλιογραφία που εξετάζει τις οικονομικές και επιχειρησιακές συνέπειες της υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης. Ενώ η τεχνική αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων αξιολογείται εκτενώς, ζητήματα όπως το συνολικό κόστος εφαρμογής, η απόδοση της επένδυσης (Return on Investment – ROI), οι οργανωσιακές μεταβολές, η παραγωγικότητα, η συντήρηση των συστημάτων και η μακροχρόνια βιωσιμότητα των σχετικών επενδύσεων δεν έχουν διερευνηθεί στον ίδιο βαθμό. Το συγκεκριμένο κενό δυσχεραίνει τη λήψη τεκμηριωμένων στρατηγικών αποφάσεων από τις επιχειρήσεις του κατασκευαστικού κλάδου.

Ιδιαίτερη δυναμική παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια και η βιβλιογραφία που αφορά την Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs). Παρά το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον που συγκεντρώνουν, το συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο βρίσκεται ακόμη σε πρώιμη φάση ανάπτυξης και οι περισσότερες δημοσιεύσεις επικεντρώνονται κυρίως στις δυνητικές δυνατότητες των τεχνολογιών αυτών. Αντίθετα, παραμένουν περιορισμένες οι εμπειρικές μελέτες που αξιολογούν την πραγματική αποτελεσματικότητά τους σε έργα του κατασκευαστικού κλάδου, καθώς και την επίδρασή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, στην ποιότητα των παραγόμενων

αποτελεσμάτων, στην προστασία των δεδομένων και στη συμμόρφωση με τις αρχές της υπεύθυνης αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης (Cao et al., 2024).

Η συγκριτική επισκόπηση των δημοσιεύσεων δείχνει ακόμη ότι η ερευνητική δραστηριότητα δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις λειτουργίες του Construction Project Management. Ο χρονικός προγραμματισμός, η διαχείριση κόστους, η διαχείριση κινδύνων και η υγεία και ασφάλεια εξακολουθούν να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος των σχετικών ερευνών. Αντίθετα, λειτουργίες όπως η διαχείριση συμβάσεων, οι προμήθειες, η διαχείριση ενδιαφερόμενων μερών, η οργανωσιακή γνώση, η στρατηγική διοίκηση έργων και η διοίκηση χαρτοφυλακίου έργων παραμένουν συγκριτικά λιγότερο διερευνημένες. Η ανισοκατανομή αυτή υποδηλώνει ότι υπάρχουν ακόμη σημαντικά περιθώρια διεύρυνσης των εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης και σε τομείς που μέχρι σήμερα έχουν προσελκύσει περιορισμένο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Από τη συνολική αποτίμηση των ερευνητικών κενών προκύπτει ότι η μελλοντική έρευνα χρειάζεται να στραφεί από την ανάπτυξη μεμονωμένων τεχνολογικών εφαρμογών προς περισσότερο ολιστικές, διεπιστημονικές και εμπειρικά τεκμηριωμένες προσεγγίσεις. Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν η αξιολόγηση της πραγματικής επιχειρησιακής αξίας της Τεχνητής Νοημοσύνης, η διερεύνηση των οργανωσιακών προϋποθέσεων για την επιτυχή υιοθέτησή της, η ανάπτυξη κοινών μεθοδολογιών αξιολόγησης και η εφαρμογή των σχετικών τεχνολογιών σε πραγματικά έργα μεγάλης κλίμακας. Η κάλυψη των συγκεκριμένων ερευνητικών κενών αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά τόσο στην περαιτέρω εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης όσο και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης από τις επιχειρήσεις του κατασκευαστικού κλάδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

5.1 Τεχνολογικοί παράγοντες

Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο δεν εξαρτάται μόνο από την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων ή τις δυνατότητες των επιμέρους εφαρμογών. Από την ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η επιτυχής ενσωμάτωσή της προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κατάλληλα οργανωμένου τεχνολογικού περιβάλλοντος, το οποίο βασίζεται σε αξιόπιστα δεδομένα, επαρκείς υπολογιστικές υποδομές, διαλειτουργικά πληροφοριακά συστήματα και ασφαλείς μηχανισμούς διαχείρισης της πληροφορίας. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν και να λειτουργήσουν αποτελεσματικά οι εφαρμογές AI, ενσωματώνοντας τις δυνατότητές τους στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων (Abioye et al., 2021; Sacks et al., 2020).

Ανάμεσα στους τεχνολογικούς αυτούς παράγοντες, η ποιότητα και η διαθεσιμότητα των δεδομένων αναγνωρίζονται ως οι πλέον καθοριστικοί. Τα περισσότερα μοντέλα Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) και Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) απαιτούν μεγάλα σύνολα αξιόπιστων και αντιπροσωπευτικών δεδομένων, ώστε να εκπαιδευτούν σωστά και να παράγουν ακριβείς προβλέψεις. Όπως επισημαίνεται στις περισσότερες μελέτες, δεδομένα που είναι ελλιπή, ανομοιογενή ή κακής ποιότητας μειώνουν σημαντικά την απόδοση ακόμη και των πιο προηγμένων αλγορίθμων (Pan & Zhang, 2021; Ahmed et al., 2022). Για τον λόγο αυτό, η δημιουργία αποτελεσματικών διαδικασιών συλλογής, καθαρισμού, επικύρωσης και διακυβέρνησης των δεδομένων θεωρείται βασική προϋπόθεση για την επιτυχή αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται και στη διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια ενός τεχνικού έργου. Στη σύγχρονη κατασκευαστική πρακτική συνυπάρχουν διαφορετικά ψηφιακά εργαλεία, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα συστήματα Enterprise Resource

Planning (ERP), τα λογισμικά χρονοπρογραμματισμού, οι πλατφόρμες διαχείρισης εγγράφων, οι αισθητήρες Internet of Things (IoT) και τα Digital Twins. Για να αξιοποιηθούν ουσιαστικά οι δυνατότητες της AI, απαιτείται η απρόσκοπτη ανταλλαγή και ενοποίηση των δεδομένων που παράγονται από αυτά τα συστήματα. Ωστόσο, η έλλειψη κοινών προτύπων, οι περιορισμένες δυνατότητες διασύνδεσης μεταξύ διαφορετικών λογισμικών και η ύπαρξη απομονωμένων αποθετηρίων δεδομένων (data silos) εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικά εμπόδια για την πλήρη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό τομέα (Abioye et al., 2021; Sacks et al., 2020).

Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει επίσης η επάρκεια των υπολογιστικών υποδομών. Οι εφαρμογές που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα, μοντέλα Deep Learning και Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs) απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ και δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων. Η εξάπλωση των υπηρεσιών Cloud Computing έχει περιορίσει αισθητά το κόστος πρόσβασης στις απαιτούμενες υποδομές, δίνοντας τη δυνατότητα ακόμη και σε μικρότερες επιχειρήσεις να αξιοποιήσουν προηγμένες εφαρμογές AI χωρίς σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό. Ταυτόχρονα, η ευελιξία που προσφέρει το υπολογιστικό νέφος επιτρέπει την προσαρμογή των διαθέσιμων πόρων στις ανάγκες έργων διαφορετικής κλίμακας και πολυπλοκότητας (Darko et al., 2020; Dwivedi et al., 2023).

Εξίσου σημαντικά είναι τα ζητήματα που σχετίζονται με την κυβερνοασφάλεια και τη διακυβέρνηση των δεδομένων. Οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης διαχειρίζονται μεγάλο όγκο τεχνικών, οικονομικών και επιχειρησιακών πληροφοριών, αρκετές από τις οποίες χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα ευαίσθητες. Η προστασία των πληροφοριακών συστημάτων από κυβερνοεπιθέσεις, η διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων και η συμμόρφωση με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο αποτελούν, επομένως, βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή αξιοποίηση της AI (Dwivedi et al., 2023). Η σημασία αυτών των ζητημάτων ενισχύεται ακόμη περισσότερο με τη διεύρυνση της χρήσης υπηρεσιών Cloud Computing και εφαρμογών Generative AI, όπου η προστασία των δεδομένων αποκτά κεντρικό ρόλο.

Ένα ακόμη ζήτημα που απασχολεί έντονα τη σύγχρονη βιβλιογραφία αφορά την αξιοπιστία και την ερμηνευσιμότητα των αλγορίθμων. Παρότι τα προηγμένα μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης επιτυγχάνουν ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα ακρίβειας σε προβλήματα πρόβλεψης και ταξινόμησης, αρκετά λειτουργούν ως «μαύρα κουτιά» (black-box models), χωρίς να καθίσταται σαφής ο τρόπος με τον οποίο οδηγούνται στις τελικές αποφάσεις τους. Σε ένα περιβάλλον όπως αυτό των τεχνικών έργων, όπου οι αποφάσεις επηρεάζουν άμεσα το κόστος, το χρονοδιάγραμμα και την ασφάλεια, η δυνατότητα ερμηνείας των αποτελεσμάτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Για τον λόγο αυτό, ολοένα μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνει η Explainable Artificial Intelligence (XAI), η οποία στοχεύει στην ανάπτυξη περισσότερο διαφανών και κατανοητών μοντέλων λήψης αποφάσεων (Hosseini et al., 2024).

Η αποτελεσματική αξιοποίηση της ΑΙ συνδέεται, επιπλέον, με την ομαλή ενσωμάτωσή της στις ήδη υπάρχουσες επιχειρησιακές διαδικασίες. Η ύπαρξη προηγμένων αλγορίθμων από μόνη της δεν αρκεί· απαιτούνται επίσης ανοικτά πρότυπα ανταλλαγής δεδομένων, κατάλληλες διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (APIs) και ευέλικτες πληροφοριακές αρχιτεκτονικές που επιτρέπουν τη συνεργασία διαφορετικών συστημάτων. Η τεχνολογική αυτή ενοποίηση διευκολύνει τη δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού οικοσυστήματος, μέσα στο οποίο οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Sacks et al., 2020; Vial, 2019).

Τέλος, η διαρκής εξέλιξη των τεχνολογιών ΑΙ καθιστά αναγκαία τη συνεχή αναβάθμιση των τεχνολογικών υποδομών των οργανισμών. Η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων, εργαλείων και ψηφιακών εφαρμογών δημιουργεί την ανάγκη για ευέλικτες και επεκτάσιμες υποδομές, ικανές να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς και του κατασκευαστικού περιβάλλοντος. Η επιλογή λύσεων που μπορούν να προσαρμόζονται σε μελλοντικές ανάγκες περιορίζει τον κίνδυνο τεχνολογικής απαξίωσης και ενισχύει τη μακροπρόθεσμη απόδοση των επενδύσεων σε εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης (Vial, 2019; Dwivedi et al., 2023).

Από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι οι τεχνολογικοί παράγοντες αποτελούν το απαραίτητο υπόβαθρο για την επιτυχημένη υιοθέτηση της

Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Η διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, η αποτελεσματική διασύνδεση των πληροφοριακών συστημάτων, οι κατάλληλες υπολογιστικές υποδομές, η κυβερνοασφάλεια, η ερμηνευσιμότητα των αλγορίθμων και η δυνατότητα ενσωμάτωσης των εφαρμογών στις επιχειρησιακές διαδικασίες συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο τεχνολογικό περιβάλλον, το οποίο υποστηρίζει τον ψηφιακό μετασχηματισμό των τεχνικών έργων και δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την εξέταση των οργανωσιακών παραγόντων που ακολουθεί στην επόμενη υποενότητα.

5.2 Οργανωσιακοί παράγοντες

Η επιτυχής υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική πρόκληση. Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η αποτελεσματική αξιοποίησή της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα οργανωσιακά χαρακτηριστικά των επιχειρήσεων και από την ικανότητά τους να διαχειρίζονται τον ψηφιακό μετασχηματισμό. Ακόμη και οι πιο προηγμένες τεχνολογικές λύσεις δύσκολα αποδίδουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα όταν απουσιάζουν η οργανωσιακή ετοιμότητα, οι κατάλληλες διοικητικές δομές και μια κουλτούρα που ενθαρρύνει την καινοτομία και την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών. Για τον λόγο αυτό, οι οργανωσιακοί παράγοντες θεωρούνται μία από τις σημαντικότερες προϋποθέσεις για την επιτυχή ενσωμάτωση της AI στη διαχείριση τεχνικών έργων (Abioye et al., 2021· Ahmed et al., 2022).

Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η δέσμευση της ανώτατης διοίκησης. Η εφαρμογή λύσεων Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει επενδύσεις σε τεχνολογικές υποδομές, ανθρώπινο δυναμικό και ανασχεδιασμό διαδικασιών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη στρατηγική υποστήριξη από τη διοίκηση. Οι μελέτες δείχνουν ότι οι οργανισμοί στους οποίους η ηγεσία αντιλαμβάνεται τη στρατηγική αξία της AI και συμμετέχει ενεργά στον σχεδιασμό του ψηφιακού μετασχηματισμού εμφανίζουν μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχούς υλοποίησης αντίστοιχων πρωτοβουλιών (Tornatzky & Fleischer, 1990· Vial, 2019).

Εξίσου σημαντικός είναι ο βαθμός ψηφιακής ωριμότητας της επιχείρησης. Η έννοια αυτή εκφράζει την ικανότητα ενός οργανισμού να αξιοποιεί ψηφιακές τεχνολογίες, να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τα δεδομένα του και να ενσωματώνει νέες λύσεις στις καθημερινές λειτουργίες του. Επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν ήδη συστήματα όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Enterprise Resource Planning (ERP), τα Digital Twins και το Internet of Things (IoT) εμφανίζονται περισσότερο προετοιμασμένες για την αξιοποίηση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης σε σύγκριση με οργανισμούς που βρίσκονται ακόμη στα πρώτα στάδια της ψηφιοποίησης. Η ψηφιακή ωριμότητα δεν αφορά μόνο τις διαθέσιμες τεχνολογικές υποδομές, αλλά και την ευρύτερη ικανότητα προσαρμογής στις απαιτήσεις του ψηφιακού μετασχηματισμού (Vial, 2019).

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται επίσης στην οργανωσιακή κουλτούρα. Η εισαγωγή της Τεχνητής Νοημοσύνης επηρεάζει τον τρόπο εργασίας, τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τμημάτων. Επιχειρήσεις που καλλιεργούν περιβάλλον συνεχούς μάθησης, ενθαρρύνουν την καινοτομία και προωθούν τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων προσαρμόζονται ευκολότερα στις απαιτήσεις που συνοδεύουν τον ψηφιακό μετασχηματισμό. Αντίθετα, οργανισμοί με έντονη αντίσταση στην αλλαγή ή με περιορισμένη διατμηματική συνεργασία δυσκολεύονται περισσότερο να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες που προσφέρει η AI (Rogers, 2003).

Καθοριστική θεωρείται και η επάρκεια των γνώσεων και των δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού. Η αποτελεσματική χρήση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει εργαζομένους με ψηφιακές δεξιότητες, κατανόηση των δυνατοτήτων των νέων τεχνολογιών και εξοικείωση με την ανάλυση δεδομένων. Η έλλειψη κατάλληλα καταρτισμένου προσωπικού αναφέρεται συστηματικά ως ένας από τους βασικούς ανασταλτικούς παράγοντες για την υιοθέτηση της AI στον κατασκευαστικό κλάδο. Για τον λόγο αυτό, οι περισσότερες μελέτες δίνουν έμφαση στη συνεχή εκπαίδευση, στην αναβάθμιση των δεξιοτήτων και στη δημιουργία διεπιστημονικών ομάδων που συνδυάζουν τεχνική, διοικητική και ψηφιακή εξειδίκευση (Pan & Zhang, 2021).

Σημαντική θέση κατέχει και η διαχείριση της οργανωσιακής αλλαγής. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών μεταβάλλει τις υφιστάμενες διαδικασίες, δημιουργεί νέους ρόλους και απαιτεί διαφορετικά πρότυπα συνεργασίας. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι οργανισμοί που εφαρμόζουν οργανωμένες πρακτικές διαχείρισης αλλαγής, ενημερώνουν έγκαιρα τους εργαζομένους και ενισχύουν τη συμμετοχή τους κατά τη διαδικασία μετάβασης επιτυγχάνουν υψηλότερα επίπεδα αποδοχής και αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των εφαρμογών AI (Venkatesh et al., 2003).

Η ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής ψηφιακού μετασχηματισμού αποτελεί ακόμη έναν κρίσιμο οργανωσιακό παράγοντα. Η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως μια μεμονωμένη τεχνολογική επένδυση, αλλά ως τμήμα ενός ευρύτερου σχεδίου που συνδέεται με τους μακροπρόθεσμους στόχους του οργανισμού. Οι επιχειρήσεις που διαθέτουν σαφές όραμα, συγκεκριμένες προτεραιότητες και καθορισμένους δείκτες αξιολόγησης εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αξιοποιήσουν διαχρονικά τα οφέλη της AI και να ενσωματώσουν αποτελεσματικά τις σχετικές εφαρμογές στις λειτουργίες τους (Vial, 2019).

Παράλληλα, ολοένα μεγαλύτερη βαρύτητα αποκτά η διαχείριση της οργανωσιακής γνώσης. Οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης βασίζονται στη συνεχή δημιουργία, επεξεργασία και αξιοποίηση μεγάλου όγκου πληροφοριών, γεγονός που απαιτεί αποτελεσματικές διαδικασίες συλλογής, αποθήκευσης, διαμοιρασμού και αξιοποίησης της γνώσης. Η ανάπτυξη τέτοιων μηχανισμών διευκολύνει τη μεταφορά εμπειρίας από προηγούμενα έργα, ενισχύει την οργανωσιακή μάθηση και συμβάλλει στη διαρκή βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Δεν πρέπει επίσης να παραβλέπεται η σημασία της συνεργασίας μεταξύ των διαφορετικών οργανωσιακών μονάδων. Η αξιοποίηση της AI επηρεάζει πολλαπλές λειτουργίες της διαχείρισης έργων και προϋποθέτει στενό συντονισμό μεταξύ μηχανικών, Project Managers, στελεχών πληροφορικής, οικονομικών υπηρεσιών και διοίκησης. Η αποτελεσματική επικοινωνία και η απρόσκοπτη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των εμπλεκόμενων τμημάτων διευκολύνουν την ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών και περιορίζουν τις δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τη φάση της εφαρμογής.

Συνεπώς, η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι οι οργανωσιακοί παράγοντες αποτελούν εξίσου σημαντική προϋπόθεση με τις τεχνολογικές υποδομές για την επιτυχή αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Η υποστήριξη της διοίκησης, η ψηφιακή ωριμότητα, η οργανωσιακή κουλτούρα, οι δεξιότητες του ανθρώπινου δυναμικού, η αποτελεσματική διαχείριση της αλλαγής, η ύπαρξη στρατηγικής ψηφιακού μετασχηματισμού, η αξιοποίηση της οργανωσιακής γνώσης και η συνεργασία μεταξύ των επιμέρους λειτουργιών διαμορφώνουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο οργανωσιακής ετοιμότητας. Η ισόρροπη ανάπτυξη αυτών των παραγόντων, σε συνδυασμό με τις κατάλληλες τεχνολογικές υποδομές, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιώσιμη ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης και τον επιτυχημένο ψηφιακό μετασχηματισμό των επιχειρήσεων του κατασκευαστικού κλάδου.

5.3 Ανθρώπινοι παράγοντες

Η επιτυχής ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο δεν καθορίζεται μόνο από τις διαθέσιμες τεχνολογικές υποδομές ή την οργανωσιακή ετοιμότητα των επιχειρήσεων. Εξίσου καθοριστική είναι η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα, καθώς η πραγματική αξία των εφαρμογών AI εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο οι εργαζόμενοι τις αποδέχονται, τις αξιοποιούν και τις συνδυάζουν με την εμπειρία και την επαγγελματική τους κρίση. Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι η αποδοχή της τεχνολογίας, η εμπιστοσύνη προς τα συστήματα, οι γνώσεις και οι δεξιότητες των χρηστών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την αποτελεσματική αξιοποίηση της AI στο Construction Project Management (Abioye et al., 2021· Ahmed et al., 2022).

Από τους σημαντικότερους παράγοντες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι το επίπεδο των ψηφιακών δεξιοτήτων (digital skills) του ανθρώπινου δυναμικού. Οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτούν προσωπικό που να μπορεί να κατανοεί βασικές έννοιες ανάλυσης δεδομένων, να αξιολογεί κριτικά τα αποτελέσματα των αλγορίθμων και να συνεργάζεται αποτελεσματικά με σύγχρονα πληροφοριακά συστήματα. Η έλλειψη τέτοιων δεξιοτήτων εξακολουθεί να αποτελεί έναν από τους

βασικούς ανασταλτικούς παράγοντες για την υιοθέτηση της AI, ιδιαίτερα στις μικρομεσαίες κατασκευαστικές επιχειρήσεις, όπου η πρόσβαση σε εξειδικευμένο προσωπικό είναι συχνά περιορισμένη (Pan & Zhang, 2021).

Η συνεχής εκπαίδευση και η δια βίου μάθηση αναδεικνύονται, συνεπώς, σε βασικές προϋποθέσεις για τη μακροχρόνια αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών. Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι οργανισμοί δεν αρκεί να εκπαιδεύουν το προσωπικό στη χρήση συγκεκριμένων εργαλείων AI, αλλά οφείλουν να επενδύουν στην ανάπτυξη ευρύτερων δεξιοτήτων, όπως η κριτική αξιολόγηση δεδομένων, η κατανόηση των περιορισμών των αλγορίθμων, η διαχείριση ψηφιακών πληροφοριών και η αποτελεσματική συνεργασία ανθρώπου και μηχανής. Η καλλιέργεια κουλτούρας συνεχούς μάθησης επιτρέπει στους εργαζομένους να προσαρμόζονται ευκολότερα στις διαρκείς τεχνολογικές εξελίξεις και ενισχύει τη βιωσιμότητα των πρωτοβουλιών ψηφιακού μετασχηματισμού (Dwivedi et al., 2023).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η στάση των τελικών χρηστών απέναντι στις νέες τεχνολογίες. Τα θεωρητικά μοντέλα **Technology Acceptance Model (TAM)** και **Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT)** υποστηρίζουν ότι η πρόθεση χρήσης μιας καινοτομίας επηρεάζεται κυρίως από την αντιλαμβανόμενη χρησιμότητά της, την ευκολία χρήσης, την κοινωνική επιρροή και τις συνθήκες που διευκολύνουν την εφαρμογή της (Davis, 1989· Venkatesh et al., 2003). Αντίστοιχα ευρήματα καταγράφονται και στον κατασκευαστικό κλάδο, όπου οι εργαζόμενοι εμφανίζονται περισσότερο θετικοί απέναντι στις εφαρμογές AI όταν διαπιστώνουν ότι μειώνουν τον διοικητικό φόρτο, διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων και αυξάνουν την παραγωγικότητα, χωρίς να περιορίζουν την επαγγελματική τους αυτονομία.

Από την άλλη πλευρά, η αντίσταση στην αλλαγή εξακολουθεί να αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια. Η εισαγωγή της Τεχνητής Νοημοσύνης μεταβάλλει καθιερωμένες πρακτικές εργασίας, δημιουργεί νέους ρόλους και διαφοροποιεί τον τρόπο συνεργασίας μεταξύ των εργαζομένων. Αυτό συχνά προκαλεί αβεβαιότητα, ενώ δεν είναι λίγοι όσοι εκφράζουν ανησυχίες σχετικά με την πιθανή αντικατάσταση θέσεων εργασίας, τη μείωση της επαγγελματικής αυτονομίας ή την υπερβολική εξάρτηση από αυτοματοποιημένα συστήματα. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι

αντιστάσεις αυτές μπορούν να περιοριστούν όταν οι εργαζόμενοι ενημερώνονται έγκαιρα, συμμετέχουν στη διαδικασία σχεδιασμού και αντιλαμβάνονται ότι η ΑΙ λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης και όχι ως υποκατάστατο του ανθρώπινου ρόλου (Rogers, 2003· Venkatesh et al., 2003).

Εξίσου καθοριστική θεωρείται η εμπιστοσύνη (trust) προς τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι χρήστες είναι περισσότερο πρόθυμοι να αξιοποιήσουν τις προτάσεις ενός αλγορίθμου όταν μπορούν να κατανοήσουν τον τρόπο με τον οποίο αυτός καταλήγει στα αποτελέσματά του και όταν θεωρούν ότι οι προβλέψεις του είναι αξιόπιστες. Για τον λόγο αυτό, ολοένα μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνει η Explainable Artificial Intelligence (XAI), η οποία επιδιώκει να παρέχει κατανοητές εξηγήσεις για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των αλγορίθμων. Η αυξημένη διαφάνεια διευκολύνει την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και ενισχύει την εμπιστοσύνη των χρηστών, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που σχετίζονται με την ασφάλεια, το κόστος ή τον προγραμματισμό των έργων (Amershi et al., 2019· Dwivedi et al., 2023).

Η εξέλιξη αυτή μεταβάλλει και τον ρόλο των στελεχών διοίκησης έργων. Ο Project Manager δεν περιορίζεται πλέον στη διαχείριση πληροφοριών, αλλά καλείται να συντονίζει ευφυή πληροφοριακά συστήματα, να αξιολογεί τις προτάσεις των αλγορίθμων, να συνδυάζει δεδομένα από πολλαπλές πηγές και να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις αξιοποιώντας τόσο την εμπειρία του όσο και τις δυνατότητες της ΑΙ. Η νέα αυτή πραγματικότητα απαιτεί ενίσχυση δεξιοτήτων όπως η στρατηγική σκέψη, η διαχείριση δεδομένων, η διεπιστημονική συνεργασία και η ηγεσία ομάδων σε ψηφιακό περιβάλλον (Ahmed et al., 2022).

Παράλληλα, η βιβλιογραφία αποδίδει ιδιαίτερη σημασία στην ηθική διάσταση της αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου οφείλουν να αξιολογούν κριτικά τα αποτελέσματα που παράγουν οι αλγόριθμοι, να εντοπίζουν πιθανές μεροληψίες ή σφάλματα και να διατηρούν την τελική ευθύνη για τις αποφάσεις που λαμβάνονται. Η κυρίαρχη επιστημονική άποψη υποστηρίζει ότι η ΑΙ πρέπει να λειτουργεί με τη λογική του *human-in-the-loop*, δηλαδή ως εργαλείο που ενισχύει την ανθρώπινη κρίση και όχι ως πλήρης αντικαταστάτης της,

ιδιαίτερα σε ζητήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια, την ποιότητα και τη στρατηγική διοίκηση των έργων (Dwivedi et al., 2023).

Τέλος, η ανάπτυξη διεπιστημονικής συνεργασίας αναδεικνύεται ως ακόμη ένας κρίσιμος ανθρώπινος παράγοντας. Η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει τη συνεργασία μηχανικών, Project Managers, επιστημόνων δεδομένων, ειδικών πληροφορικής και διοικητικών στελεχών. Η ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών μεταξύ διαφορετικών επιστημονικών πεδίων διευκολύνει την ανάπτυξη εφαρμογών που ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες των τεχνικών έργων και συμβάλλει στην ομαλή ενσωμάτωσή τους στις καθημερινές επιχειρησιακές διαδικασίες (Abioye et al., 2021).

Συνοψίζοντας, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει τον ανθρώπινο παράγοντα ως τον βασικό πυλώνα για την επιτυχημένη υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Οι ψηφιακές δεξιότητες, η συνεχής επιμόρφωση, η αποδοχή της τεχνολογίας, η εμπιστοσύνη προς τα συστήματα AI, η αποτελεσματική διαχείριση της αλλαγής, οι νέες ηγετικές ικανότητες και η διεπιστημονική συνεργασία συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ανθρώπινης ετοιμότητας. Από την κριτική αξιολόγηση των σχετικών μελετών προκύπτει ότι η AI δεν υποκαθιστά τον άνθρωπο· αντίθετα, μετασχηματίζει τον ρόλο του, ενισχύοντας τη δυνατότητά του να λαμβάνει περισσότερο τεκμηριωμένες αποφάσεις μέσα από τη συνδυαστική αξιοποίηση της ανθρώπινης εμπειρίας και των δυνατοτήτων των ευφύων συστημάτων.

5.4 Οικονομικοί παράγοντες

Η οικονομική διάσταση αποτελεί μία από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο. Παρότι η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι οι εφαρμογές AI μπορούν να προσφέρουν ουσιαστικά επιχειρησιακά και ανταγωνιστικά οφέλη, η απόφαση για την επένδυση στις συγκεκριμένες τεχνολογίες επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις οικονομικές δυνατότητες των οργανισμών, το απαιτούμενο κόστος υλοποίησης και τα προσδοκώμενα αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, η οικονομική

αξιολόγηση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σχετικά με την επιλογή και την ενσωμάτωση λύσεων Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων (Abioye et al., 2021· Ahmed et al., 2022).

Πρωταρχική παράμετρος αποτελεί το αρχικό κόστος της επένδυσης. Η ανάπτυξη ή προμήθεια εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει σημαντικούς οικονομικούς πόρους για την απόκτηση λογισμικού, την αναβάθμιση των πληροφοριακών υποδομών, την προμήθεια κατάλληλου εξοπλισμού, την αξιοποίηση υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing), αλλά και την εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού. Για πολλές μικρομεσαίες επιχειρήσεις του κατασκευαστικού κλάδου, το υψηλό κόστος εκκίνησης εξακολουθεί να αποτελεί βασικό εμπόδιο, ιδιαίτερα όταν η αναμενόμενη απόδοση της επένδυσης δεν μπορεί να προσδιοριστεί με επάρκεια πριν από την εφαρμογή της. Παράλληλα, αρκετές πρόσφατες μελέτες επισημαίνουν ότι η σταδιακή υλοποίηση έργων ΑΙ και η αξιοποίηση συνδρομητικών μοντέλων λογισμικού συμβάλλουν στη μείωση του αρχικού οικονομικού βάρους, καθιστώντας τις σχετικές τεχνολογίες περισσότερο προσιτές σε επιχειρήσεις μικρότερου μεγέθους (Pan & Zhang, 2021).

Η οικονομική αποτίμηση, ωστόσο, δεν περιορίζεται στο αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται για την υλοποίηση ενός έργου. Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στο συνολικό κόστος κύκλου ζωής των εφαρμογών ΑΙ, το οποίο περιλαμβάνει τη συντήρηση, τις αναβαθμίσεις, την τεχνική υποστήριξη, τη διαχείριση των δεδομένων, τη συνεχή εκπαίδευση του προσωπικού και την προσαρμογή των αλγορίθμων στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των έργων. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership – TCO) θεωρείται απαραίτητη προκειμένου οι οργανισμοί να αποκτήσουν ολοκληρωμένη εικόνα τόσο των άμεσων όσο και των μελλοντικών οικονομικών επιβαρύνσεων που συνεπάγεται μία τέτοια επένδυση (Bryde et al., 2013).

Εξίσου καθοριστική είναι η εκτίμηση της αναμενόμενης απόδοσης της επένδυσης (Return on Investment – ROI). Οι επιχειρήσεις καλούνται να αξιολογήσουν κατά πόσο τα οφέλη που μπορεί να προκύψουν από την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αντισταθμίζουν το συνολικό κόστος εφαρμογής της. Σύμφωνα με τις διαθέσιμες

μελέτες, τα κυριότερα οικονομικά οφέλη σχετίζονται με τη μείωση των καθυστερήσεων, τον περιορισμό των υπερβάσεων κόστους, τη βελτίωση της παραγωγικότητας, την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, τη μείωση των κατασκευαστικών σφαλμάτων και τη βελτίωση της ποιότητας των αποφάσεων. Παρά τα σημαντικά αυτά πλεονεκτήματα, η οικονομική απόδοση εκδηλώνεται συχνά σε μεσοπρόθεσμο ή μακροπρόθεσμο ορίζοντα, γεγονός που δυσχεραίνει την άμεση ποσοτικοποίησή της και αυξάνει την αβεβαιότητα κατά τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων (Abioye et al., 2021).

Σημαντική επίδραση ασκεί επίσης η χρηματοοικονομική δυνατότητα κάθε οργανισμού. Οι μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες διαθέτουν συνήθως περισσότερους πόρους για την ανάπτυξη ή την προμήθεια προηγμένων τεχνολογικών λύσεων, ενώ οι μικρότερες επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν συχνά περιορισμούς λόγω έλλειψης κεφαλαίων ή δυσκολίας πρόσβασης σε χρηματοδότηση. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η αξιοποίηση υπηρεσιών Software as a Service (SaaS) και υποδομών Cloud Computing αναδεικνύεται ως μία ιδιαίτερα αποτελεσματική λύση, καθώς μειώνει τις απαιτήσεις σε αρχικό κεφάλαιο και καθιστά τις εφαρμογές AI οικονομικά πιο προσιτές (Vial, 2019).

Ένα ακόμη ζήτημα που επηρεάζει την επενδυτική απόφαση αφορά την αβεβαιότητα ως προς τα αναμενόμενα οφέλη. Η ταχύτατη εξέλιξη των τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης δυσκολεύει πολλές φορές την ακριβή πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης των σχετικών επενδύσεων. Δεν είναι λίγοι οι οργανισμοί που αντιμετωπίζουν με επιφυλακτικότητα την υιοθέτηση νέων εφαρμογών, ιδιαίτερα όταν απουσιάζουν επαρκή εμπειρικά δεδομένα ή επιτυχημένα παραδείγματα από έργα αντίστοιχης κλίμακας και πολυπλοκότητας. Για τον λόγο αυτό, αρκετές επιχειρήσεις επιλέγουν αρχικά πιλοτικές εφαρμογές ή σταδιακή ενσωμάτωση των τεχνολογιών AI, προκειμένου να περιορίσουν το επενδυτικό ρίσκο πριν προχωρήσουν σε ευρύτερη αξιοποίησή τους.

Στην οικονομική αξιολόγηση εντάσσεται και η διαχείριση των κινδύνων που συνοδεύουν την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η πιθανότητα τεχνολογικής απαξίωσης, οι απαιτήσεις συνεχούς αναβάθμισης των συστημάτων, τα ζητήματα

κυβερνοασφάλειας, η εξάρτηση από εξωτερικούς παρόχους υπηρεσιών, καθώς και η πιθανότητα αποτυχίας ενός έργου ψηφιακού μετασχηματισμού αποτελούν στοιχεία που αυξάνουν την επενδυτική αβεβαιότητα. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία προτείνει την ενσωμάτωση διαδικασιών οικονομικής διαχείρισης κινδύνων ήδη από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού των επενδύσεων σε εφαρμογές ΑΙ (OECD, 2024).

Πέρα από τις άμεσες οικονομικές επιπτώσεις, αρκετές μελέτες υπογραμμίζουν και τη συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη μακροπρόθεσμη ανταγωνιστικότητα των επιχειρήσεων. Η έγκαιρη επένδυση στις σχετικές τεχνολογίες επιτρέπει στους οργανισμούς να αυξήσουν την αποδοτικότητα των διαδικασιών τους, να περιορίσουν το λειτουργικό κόστος, να ανταποκρίνονται ταχύτερα στις απαιτήσεις των πελατών και να ενισχύσουν τη θέση τους στην αγορά. Κατά συνέπεια, η οικονομική αξία της ΑΙ δεν περιορίζεται στη βελτίωση της απόδοσης ενός μεμονωμένου έργου, αλλά επηρεάζει τη συνολική στρατηγική ανάπτυξη και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των επιχειρήσεων (Porter & Heppelmann, 2014).

Παράλληλα, η αποτίμηση μιας επένδυσης σε Τεχνητή Νοημοσύνη δεν θα πρέπει να στηρίζεται αποκλειστικά σε βραχυπρόθεσμους χρηματοοικονομικούς δείκτες. Η δημιουργία νέας οργανωσιακής γνώσης, η ενίσχυση της μάθησης, η ανάπτυξη ψηφιακών δεξιοτήτων και η συνολική αύξηση της τεχνολογικής ωριμότητας αποτελούν οφέλη που δύσκολα αποτυπώνονται σε οικονομικούς όρους, αλλά επηρεάζουν ουσιαστικά τη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη των οργανισμών. Για τον λόγο αυτό, αρκετοί ερευνητές προτείνουν η αξιολόγηση των επενδύσεων σε ΑΙ να βασίζεται σε έναν συνδυασμό χρηματοοικονομικών και μη χρηματοοικονομικών δεικτών, ώστε να αποτυπώνεται πληρέστερα η πραγματική αξία του ψηφιακού μετασχηματισμού.

Η κριτική αποτίμηση της σχετικής βιβλιογραφίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι οικονομικές παράμετροι διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό και την έκταση υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των εφαρμογών, η προσδοκώμενη απόδοση της επένδυσης, η χρηματοοικονομική δυνατότητα των οργανισμών, η διαχείριση της επενδυτικής αβεβαιότητας και η στρατηγική αξία που δημιουργεί η ΑΙ αποτελούν αλληλένδετες διαστάσεις που επηρεάζουν τις επιχειρηματικές επιλογές.

Επομένως, η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν προϋποθέτει μόνο κατάλληλες τεχνολογικές υποδομές, αλλά και μια ολοκληρωμένη οικονομική προσέγγιση, ικανή να εκτιμήσει τόσο τις άμεσες δαπάνες όσο και τα μακροπρόθεσμα οφέλη που προκύπτουν από τον ψηφιακό μετασχηματισμό.

5.5 Ηθικά και κανονιστικά ζητήματα

Η ταχεία ανάπτυξη και η ολοένα ευρύτερη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο δημιουργούν σημαντικές προοπτικές για τη βελτίωση της διαχείρισης τεχνικών έργων. Παράλληλα, όμως, φέρνουν στο προσκήνιο κρίσιμα ηθικά, νομικά και κανονιστικά ζητήματα, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν με ασφάλεια και υπευθυνότητα στις επιχειρησιακές διαδικασίες. Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η επιτυχής αξιοποίηση της AI δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογική αποτελεσματικότητα των εφαρμογών της, αλλά και από την ύπαρξη μηχανισμών που διασφαλίζουν τη διαφάνεια, την αξιοπιστία, τη λογοδοσία, την προστασία των δεδομένων και τη συμμόρφωση με το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο (OECD, 2019· UNESCO, 2021· European Union, 2024). Καθώς τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης αποκτούν ολοένα σημαντικότερο ρόλο στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων, οι παραπάνω διαστάσεις καθίστανται καθοριστικές τόσο για τους οργανισμούς όσο και για τους επαγγελματίες του κατασκευαστικού τομέα.

Κεντρική θέση στη σχετική συζήτηση κατέχει η διαφάνεια και η ερμηνευσιμότητα των αλγορίθμων. Πολλά σύγχρονα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης, ιδιαίτερα όσα βασίζονται σε τεχνικές Deep Learning και Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs), λειτουργούν ως «μαύρα κουτιά» (black-box models), καθώς οι εσωτερικοί μηχανισμοί που οδηγούν στην παραγωγή ενός αποτελέσματος δεν είναι εύκολα κατανοητοί από τους χρήστες. Στο περιβάλλον των τεχνικών έργων, όπου οι αποφάσεις επηρεάζουν κρίσιμες παραμέτρους όπως η ασφάλεια, το κόστος, το χρονοδιάγραμμα και η συμμόρφωση με τεχνικές προδιαγραφές, η περιορισμένη δυνατότητα ερμηνείας δημιουργεί εύλογους προβληματισμούς. Για τον λόγο αυτό, ολοένα περισσότερες μελέτες υποστηρίζουν την ανάπτυξη εφαρμογών Explainable

Artificial Intelligence (XAI), οι οποίες επιτρέπουν στους χρήστες να κατανοούν τη λογική πίσω από τις προτάσεις του συστήματος και να αξιολογούν κριτικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του (Gunning & Aha, 2019).

Εξίσου σημαντικό είναι το ζήτημα της προστασίας των δεδομένων και της ιδιωτικότητας. Οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης επεξεργάζονται μεγάλους όγκους πληροφοριών που προέρχονται από πληροφοριακά συστήματα, αισθητήρες, κάμερες, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, συσκευές Internet of Things (IoT) και πλατφόρμες διαχείρισης έργων. Η συλλογή, η αποθήκευση και η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις ως προς την ασφάλεια των πληροφοριών και την προστασία προσωπικών δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, η συμμόρφωση με τον Γενικό Κανονισμό για την Προστασία Δεδομένων (General Data Protection Regulation – GDPR) αποτελεί θεμελιώδη υποχρέωση για τους οργανισμούς που δραστηριοποιούνται στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ παράλληλα απαιτείται η εφαρμογή αποτελεσματικών μηχανισμών κυβερνοασφάλειας για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή διαρροής ευαίσθητων πληροφοριών (European Parliament & Council, 2016).

Παράλληλα, ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στη λογοδοσία και στην ευθύνη για τις αποφάσεις που υποστηρίζονται από συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης. Παρότι οι εφαρμογές AI είναι σε θέση να επεξεργάζονται πολύπλοκα δεδομένα και να παρέχουν σύνθετες αναλύσεις, η τελική ευθύνη για τις αποφάσεις οφείλει να παραμένει στον άνθρωπο. Η Τεχνητή Νοημοσύνη αντιμετωπίζεται ως εργαλείο υποστήριξης της ανθρώπινης κρίσης και όχι ως πλήρως αυτόνομος μηχανισμός λήψης αποφάσεων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια των εργαζομένων, τη συμμόρφωση με τεχνικούς κανονισμούς ή τη διαχείριση κρίσιμων κινδύνων. Η αρχή της ανθρώπινης εποπτείας (human oversight) αποτελεί πλέον βασικό στοιχείο τόσο της σύγχρονης βιβλιογραφίας όσο και των ευρωπαϊκών κανονιστικών πρωτοβουλιών (European Union, 2024).

Ένα ακόμη θέμα που απασχολεί έντονα την επιστημονική κοινότητα είναι η πιθανότητα εμφάνισης αλγοριθμικής μεροληψίας (algorithmic bias). Τα συστήματα

Τεχνητής Νοημοσύνης εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα, τα οποία ενδέχεται να περιέχουν ανακρίβειες, ελλείψεις ή υφιστάμενες προκαταλήψεις. Ως συνέπεια, υπάρχει ο κίνδυνος οι παραγόμενες προβλέψεις ή προτάσεις να μην είναι πλήρως αντικειμενικές και να αναπαράγουν λανθασμένα πρότυπα. Για τον περιορισμό αυτού του φαινομένου, οι ερευνητές προτείνουν συστηματικό έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων, συνεχή αξιολόγηση της συμπεριφοράς των αλγορίθμων και τακτική επαλήθευση των αποτελεσμάτων πριν αυτά αξιοποιηθούν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Floridi et al., 2018).

Σημαντικές προκλήσεις προκύπτουν και στον τομέα της κυβερνοασφάλειας. Η συνεχής διασύνδεση πληροφοριακών συστημάτων, αισθητήρων και εφαρμογών ΑΙ αυξάνει την έκθεση των οργανισμών σε κυβερνοεπιθέσεις, με πιθανές συνέπειες την απώλεια δεδομένων, τη διακοπή κρίσιμων λειτουργιών ή την αλλοίωση πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των έργων. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η ενσωμάτωση μηχανισμών κυβερνοασφάλειας ήδη από το στάδιο σχεδιασμού των εφαρμογών, σύμφωνα με τις αρχές «security by design» και «risk management by design», ώστε η προστασία των πληροφοριακών συστημάτων να αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της αρχιτεκτονικής τους (NIST, 2023).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επίσης σημαντική πρόοδος στη διαμόρφωση κανονιστικών πλαισίων για τη χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Πράξη για την Τεχνητή Νοημοσύνη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU AI Act), η οποία εγκρίθηκε το 2024 και εισάγει ένα πλαίσιο βασισμένο στην αξιολόγηση του κινδύνου (risk-based approach). Ανάλογα με το επίπεδο επικινδυνότητας κάθε εφαρμογής, προβλέπονται διαφορετικές απαιτήσεις που αφορούν τη διαφάνεια, την ποιότητα των δεδομένων, την ανθρώπινη εποπτεία, την τεχνική τεκμηρίωση και τη συνεχή παρακολούθηση της λειτουργίας των συστημάτων. Παρότι πολλές εφαρμογές ΑΙ στον κατασκευαστικό κλάδο δεν κατατάσσονται στις κατηγορίες υψηλού κινδύνου, η συμμόρφωση με τις νέες αυτές απαιτήσεις αποκτά ολοένα μεγαλύτερη σημασία για τις επιχειρήσεις του κλάδου (European Union, 2024).

Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσεται και η ανάπτυξη μηχανισμών διακυβέρνησης της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI Governance). Οι οργανισμοί καλούνται να διαμορφώσουν

εσωτερικές πολιτικές που καθορίζουν τις διαδικασίες χρήσης των εφαρμογών ΑΙ, τις αρμοδιότητες των εμπλεκόμενων στελεχών, τους μηχανισμούς ελέγχου και επικύρωσης των αποτελεσμάτων, καθώς και τις απαιτήσεις δεοντολογίας που πρέπει να τηρούνται. Η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου διακυβέρνησης περιορίζει τους σχετικούς κινδύνους, ενισχύει την εμπιστοσύνη των χρηστών και συμβάλλει στην υπεύθυνη αξιοποίηση των τεχνολογιών, σύμφωνα με τις αρχές που προτείνουν ο ΟΟΣΑ (OECD) και η UNESCO.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται, τέλος, στη διατήρηση της ανθρώπινης κρίσης ως τελικού σημείου αναφοράς κατά τη λήψη αποφάσεων. Παρά τις σημαντικές δυνατότητες των σύγχρονων συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης στην ανάλυση πολύπλοκων δεδομένων και στην υποστήριξη της διοίκησης έργων, η εμπειρία, η επαγγελματική κρίση και η ηθική ευθύνη των στελεχών εξακολουθούν να αποτελούν αναντικατάστατα στοιχεία. Η επικρατούσα άποψη στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ότι οι τεχνολογίες ΑΙ πρέπει να λειτουργούν συμπληρωματικά προς τον άνθρωπο και όχι να τον υποκαθιστούν, ιδιαίτερα σε αποφάσεις που επηρεάζουν την ασφάλεια, τη βιωσιμότητα και τη συμμόρφωση με τεχνικές και νομικές απαιτήσεις.

Η κριτική σύνθεση των σχετικών μελετών καταδεικνύει ότι η υπεύθυνη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει την ισόρροπη συνύπαρξη τεχνολογικής καινοτομίας, αποτελεσματικής διακυβέρνησης και ισχυρού κανονιστικού πλαισίου. Η διαφάνεια των αλγορίθμων, η προστασία των δεδομένων, η λογοδοσία, η αποφυγή της αλγοριθμικής μεροληψίας, η κυβερνοασφάλεια και η διατήρηση της ανθρώπινης εποπτείας δεν αποτελούν ανεξάρτητες απαιτήσεις, αλλά αλληλοσυμπληρούμενες προϋποθέσεις για την ασφαλή εφαρμογή της ΑΙ. Η μακροπρόθεσμη επιτυχία των τεχνολογιών αυτών στον κατασκευαστικό κλάδο θα εξαρτηθεί όχι μόνο από τη συνεχή βελτίωση των τεχνικών τους δυνατοτήτων, αλλά και από την ικανότητα των οργανισμών να τις αξιοποιούν με τρόπο αξιόπιστο, διαφανή, κοινωνικά αποδεκτό και σύμφωνο με τις αρχές της επαγγελματικής δεοντολογίας και της βιώσιμης ανάπτυξης.

5.6 Παράγοντες επιτυχούς υιοθέτησης

Η συστηματική ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας δείχνει ότι η επιτυχής υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στον κατασκευαστικό κλάδο δεν αποτελεί αποτέλεσμα ενός μεμονωμένου παράγοντα, αλλά προκύπτει από την αλληλεπίδραση τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών διαστάσεων. Οι οργανισμοί που αξιοποιούν αποτελεσματικά τις εφαρμογές AI δεν αντιμετωπίζουν την τεχνολογία ως μια αποσπασματική ψηφιακή λύση, αλλά ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής ψηφιακού μετασχηματισμού. Η επιτυχία αυτής της προσπάθειας προϋποθέτει ολοκληρωμένο σχεδιασμό, σταδιακή εφαρμογή, συνεχή αξιολόγηση και προσαρμογή των επιχειρησιακών διαδικασιών στις απαιτήσεις του νέου τεχνολογικού περιβάλλοντος (Vial, 2019· Abioye et al., 2021).

Βασική προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη ενός σαφούς στρατηγικού οράματος για την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι οι οργανισμοί που ενσωματώνουν την AI στον συνολικό στρατηγικό τους σχεδιασμό και τη συνδέουν με συγκεκριμένους επιχειρησιακούς στόχους εμφανίζουν υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς υλοποίησης. Αντίθετα, η επιλογή εφαρμογών αποκλειστικά με γνώμονα τη διαθεσιμότητα νέων τεχνολογιών ή τις τάσεις της αγοράς σπάνια οδηγεί σε διατηρήσιμα αποτελέσματα. Η ευθυγράμμιση των τεχνολογικών επενδύσεων με τους στρατηγικούς στόχους του οργανισμού θεωρείται κρίσιμο στοιχείο για τη δημιουργία πραγματικής επιχειρησιακής αξίας (Porter & Heppelmann, 2014).

Καθοριστική είναι επίσης η ενεργός υποστήριξη της ανώτατης διοίκησης. Η διοίκηση καλείται να διαμορφώσει τη στρατηγική κατεύθυνση, να εξασφαλίσει τους αναγκαίους οικονομικούς πόρους και να υποστηρίξει τις οργανωσιακές αλλαγές που απαιτεί ο ψηφιακός μετασχηματισμός. Παράλληλα, δημιουργεί το κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη της καινοτομίας και ενισχύει την αποδοχή των νέων τεχνολογιών από το ανθρώπινο δυναμικό. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, η ισχυρή διοικητική δέσμευση συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό της αντίστασης στην αλλαγή και αυξάνει τις πιθανότητες επιτυχούς εφαρμογής έργων Τεχνητής Νοημοσύνης (Ahmed et al., 2022).

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στην ποιότητα και στη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Τα συστήματα ΑΙ βασίζονται τη λειτουργία τους στην επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη αξιόπιστων, επικαιροποιημένων και σωστά δομημένων δεδομένων. Παράλληλα, η λειτουργία ολοκληρωμένων πληροφοριακών συστημάτων, η εφαρμογή κοινών προτύπων και η αποτελεσματική διακυβέρνηση των δεδομένων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη ακριβών και αξιόπιστων μοντέλων. Οι περισσότερες σύγχρονες μελέτες συγκλίνουν στην άποψη ότι η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζει περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο τεχνικό παράγοντα την απόδοση των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης (Pan & Zhang, 2021).

Παράλληλα, αρκετοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι η σταδιακή εφαρμογή των τεχνολογιών ΑΙ μειώνει σημαντικά τους κινδύνους που συνοδεύουν τον ψηφιακό μετασχηματισμό. Αντί της άμεσης ανάπτυξης εκτεταμένων έργων, προτείνεται η υλοποίηση πιλοτικών εφαρμογών (pilot projects), μέσω των οποίων οι οργανισμοί μπορούν να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα των λύσεων, να αποκτήσουν εμπειρία από τη χρήση τους και να προσαρμόσουν σταδιακά τις εσωτερικές τους διαδικασίες. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει την οργανωσιακή μάθηση, περιορίζει την επενδυτική αβεβαιότητα και επιτρέπει τη συνεχή βελτίωση των εφαρμογών πριν από την ευρύτερη αξιοποίησή τους.

Η ανάπτυξη των κατάλληλων ψηφιακών δεξιοτήτων αποτελεί εξίσου σημαντική συνιστώσα της επιτυχίας. Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτεί προσωπικό που να διαθέτει τόσο τεχνικές όσο και διοικητικές γνώσεις, καθώς και ικανότητα κατανόησης και αξιοποίησης των αποτελεσμάτων που παράγουν τα ευφυή πληροφοριακά συστήματα. Η συνεχής εκπαίδευση, η αναβάθμιση των δεξιοτήτων και η δημιουργία διεπιστημονικών ομάδων εργασίας ενισχύουν σημαντικά την ικανότητα των οργανισμών να αξιοποιούν αποτελεσματικά τις νέες τεχνολογίες. Παράλληλα, η καλλιέργεια κουλτούρας διαρκούς μάθησης διευκολύνει την προσαρμογή των εργαζομένων στις συνεχείς εξελίξεις που χαρακτηρίζουν το πεδίο της Τεχνητής Νοημοσύνης (Bughin et al., 2017).

Παράγοντα ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί και η αποτελεσματική διαχείριση της οργανωσιακής αλλαγής. Η εισαγωγή εφαρμογών ΑΙ μεταβάλλει καθιερωμένες διαδικασίες, δημιουργεί νέους ρόλους και απαιτεί διαφορετικές μορφές συνεργασίας. Η έγκαιρη ενημέρωση των εργαζομένων, η ενεργός συμμετοχή τους στον σχεδιασμό των εφαρμογών, η συνεχής επικοινωνία και η σαφής ανάδειξη των οφελών της Τεχνητής Νοημοσύνης συμβάλλουν στη μείωση των αντιστάσεων και διευκολύνουν την ομαλή μετάβαση στο νέο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία αντιμετωπίζει τη διαχείριση της αλλαγής ως παράγοντα εξίσου σημαντικό με την ίδια την τεχνολογική καινοτομία (Vial, 2019).

Σημαντική είναι επίσης η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στο ευρύτερο οικοσύστημα των τεχνολογιών του Construction 4.0. Η πραγματική αξία των εφαρμογών ΑΙ μεγιστοποιείται όταν αυτές λειτουργούν σε συνδυασμό με το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και τις υπηρεσίες Cloud Computing. Η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων και ενισχύει τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Για τον λόγο αυτό, οι περισσότερες σύγχρονες μελέτες υποστηρίζουν ότι η ΑΙ αποδίδει ουσιαστικά καλύτερα όταν αποτελεί τμήμα ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού οικοσυστήματος και όχι μιας απομονωμένης τεχνολογικής εφαρμογής (Abioye et al., 2021).

Εξίσου σημαντική θεωρείται η συνεχής αξιολόγηση της απόδοσης των εφαρμογών. Η επιτυχής υιοθέτηση δεν ολοκληρώνεται με την εγκατάσταση ενός συστήματος, αλλά απαιτεί διαρκή παρακολούθηση της αποτελεσματικότητάς του, αξιολόγηση των επιχειρησιακών αποτελεσμάτων και προσαρμογή των μοντέλων στις μεταβαλλόμενες συνθήκες των έργων. Η χρήση κατάλληλων δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), σε συνδυασμό με την περιοδική επανεκπαίδευση των αλγορίθμων, συμβάλλει στη διατήρηση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της μακροχρόνιας αποτελεσματικότητας των εφαρμογών ΑΙ.

Παράλληλα, η συμμόρφωση με τις αρχές δεοντολογίας και τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια αποτελεί πλέον αναπόσπαστο στοιχείο κάθε στρατηγικής υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η ανάπτυξη διαφανών και αξιόπιστων

εφαρμογών, η προστασία των δεδομένων, η ανθρώπινη εποπτεία των αποφάσεων και η συμμόρφωση με το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο ενισχύουν την εμπιστοσύνη των χρηστών και δημιουργούν τις προϋποθέσεις για βιώσιμη αξιοποίηση των σχετικών τεχνολογιών. Οι κατευθύνσεις που διατυπώνονται στο EU AI Act, στο AI Risk Management Framework του NIST και στις αρχές του OECD αποτελούν πλέον βασικά σημεία αναφοράς για την υπεύθυνη ανάπτυξη και χρήση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης (OECD, 2019· NIST, 2023· European Union, 2024).

Η συνολική αποτίμηση της διεθνούς βιβλιογραφίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική πρόκληση, αλλά μια σύνθετη διαδικασία οργανωσιακού μετασχηματισμού. Η αποτελεσματική εφαρμογή της προϋποθέτει στρατηγικό σχεδιασμό, αξιόπιστα δεδομένα, επένδυση στο ανθρώπινο δυναμικό, επαρκείς οικονομικούς πόρους, κατάλληλη διακυβέρνηση και συνεχή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Μόνο μέσα από την ισόρροπη ανάπτυξη όλων αυτών των διαστάσεων μπορούν οι οργανισμοί να μετατρέψουν τις δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης σε διατηρήσιμο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα και να υποστηρίξουν ουσιαστικά τον ψηφιακό μετασχηματισμό της διαχείρισης τεχνικών έργων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε κατέδειξε ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) εξελίσσεται σε έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες του ψηφιακού μετασχηματισμού της διαχείρισης τεχνικών έργων. Η συνεχής πρόοδος των τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη αξιοποίηση του Building Information Modeling (BIM),

των Digital Twins, του Internet of Things (IoT), των Big Data και των υπηρεσιών Cloud Computing, δημιουργεί ένα νέο ψηφιακό περιβάλλον μέσα στο οποίο μεταβάλλεται ουσιαστικά ο τρόπος σχεδιασμού, οργάνωσης, παρακολούθησης και διοίκησης των σύγχρονων κατασκευαστικών έργων. Η διεθνής βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι οι εφαρμογές AI μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων, στη μείωση της αβεβαιότητας, στην αυτοματοποίηση σύνθετων διαδικασιών και στην αποτελεσματικότερη υποστήριξη της λήψης αποφάσεων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός έργου.

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει καταγραφεί, η συγκριτική ανάλυση των δημοσιεύσεων ανέδειξε ότι η διαθέσιμη γνώση παραμένει σε μεγάλο βαθμό κατακερματισμένη. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη ή αξιολόγηση συγκεκριμένων εφαρμογών και τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP) και, πιο πρόσφατα, η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI). Αντίθετα, περιορισμένος αριθμός δημοσιεύσεων επιχειρεί να συνθέσει συστηματικά τα ευρήματα της βιβλιογραφίας και να εξετάσει ολοκληρωμένα τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση των τεχνολογιών αυτών από τους οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν διεξοδικά οι σημαντικότεροι παράγοντες που, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η ανάλυση αυτή ανέδειξε ότι η επιτυχής αξιοποίηση της AI αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία, η οποία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές δυνατότητες των διαθέσιμων εφαρμογών. Αντίθετα, προϋποθέτει τη συνδυασμένη επίδραση τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών, ηθικών και κανονιστικών παραγόντων, οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και διαμορφώνουν το συνολικό επίπεδο ετοιμότητας ενός οργανισμού για την υιοθέτηση τεχνολογιών AI.

Με βάση τα ευρήματα αυτά, το παρόν κεφάλαιο επιχειρεί τη συνθετική οργάνωση της γνώσης που προέκυψε από τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Σκοπός

του δεν είναι η ανάπτυξη ενός νέου θεωρητικού μοντέλου ή μιας νέας μεθοδολογίας αξιολόγησης, αλλά η ενοποίηση και η ερμηνεία των βασικών παραγόντων που αναδείχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία, με στόχο τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας σχετικά με τις προϋποθέσεις επιτυχούς υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Η συνθετική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την ανάδειξη των σχέσεων μεταξύ των επιμέρους παραγόντων και διευκολύνει την κατανόηση της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει τη διαδικασία ενσωμάτωσης της ΑΙ στις λειτουργίες του Construction Project Management.

Η σύνθεση της βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι η αποτελεσματική αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτεί την ταυτόχρονη αντιμετώπιση τεχνικών, οργανωσιακών και διοικητικών προκλήσεων. Η διαθεσιμότητα ποιοτικών δεδομένων, η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων, η ψηφιακή ωριμότητα των οργανισμών, η ανάπτυξη κατάλληλων δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού, η ύπαρξη επαρκών οικονομικών πόρων, καθώς και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις δεοντολογίας και κανονιστικής διακυβέρνησης αναδεικνύονται ως αλληλένδετες διαστάσεις, οι οποίες καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την επιτυχία των σχετικών εφαρμογών. Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των παραγόντων συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των συνθηκών υπό τις οποίες οι τεχνολογίες ΑΙ μπορούν να δημιουργήσουν πραγματική επιχειρησιακή αξία.

Στις επόμενες ενότητες πραγματοποιείται η συνθετική παρουσίαση των παραγόντων υιοθέτησης που προέκυψαν από τη διεθνή βιβλιογραφία, αναλύονται οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους και εξετάζονται οι πρακτικές επιπτώσεις των ευρημάτων για τους οργανισμούς και τους επαγγελματίες της διαχείρισης τεχνικών έργων. Παράλληλα, παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι περιορισμοί της υφιστάμενης βιβλιογραφίας και οι βασικές κατευθύνσεις που προτείνονται για μελλοντική έρευνα, συμβάλλοντας στη συστηματική οργάνωση της υφιστάμενης γνώσης και στη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας για την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στο Construction Project Management.

6.2 Σύνθεση των παραγόντων υιοθέτησης από τη διεθνή βιβλιογραφία

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων αποτελεί μια σύνθετη και πολυπαραγοντική διαδικασία, η οποία δεν μπορεί να ερμηνευθεί αποκλειστικά μέσα από τις τεχνολογικές δυνατότητες των επιμέρους εφαρμογών. Αντίθετα, οι περισσότερες μελέτες συγκλίνουν στην άποψη ότι η επιτυχής ενσωμάτωση της AI εξαρτάται από την αλληλεπίδραση πολλών παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν τόσο την τεχνική λειτουργία των συστημάτων όσο και την οργανωσιακή αποδοχή και τη μακροχρόνια επιχειρησιακή αξιοποίησή τους. Η προσέγγιση αυτή αντανακλά τη σταδιακή μετατόπιση της διεθνούς έρευνας από μια αμιγώς τεχνολογική θεώρηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προς μια περισσότερο ολιστική αντίληψη, σύμφωνα με την οποία η επιτυχία μιας εφαρμογής καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το ευρύτερο οργανωσιακό και επιχειρησιακό περιβάλλον μέσα στο οποίο αυτή αναπτύσσεται.

Από τη σύνθεση των επιλεγμένων δημοσιεύσεων προκύπτει ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση της AI μπορούν να οργανωθούν σε πέντε βασικές κατηγορίες: τους τεχνολογικούς, τους οργανωσιακούς, τους ανθρώπινους, τους οικονομικούς και τους ηθικούς-κανονιστικούς παράγοντες. Παρότι οι κατηγορίες αυτές παρουσιάζονται διακριτά για λόγους ανάλυσης, η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι στην πράξη λειτουργούν ως αλληλένδετα στοιχεία ενός ενιαίου οικοσυστήματος. Καμία από τις επιμέρους διαστάσεις δεν επαρκεί από μόνη της για να διασφαλίσει την επιτυχή αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης· αντίθετα, η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών εξαρτάται από τον βαθμό ισορροπημένης ανάπτυξης και συντονισμού όλων των παραπάνω παραγόντων.

Οι τεχνολογικοί παράγοντες αποτελούν το βασικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο αναπτύσσονται οι εφαρμογές AI. Κρίσιμες προϋποθέσεις θεωρούνται η διαθεσιμότητα αξιόπιστων και ποιοτικών δεδομένων, η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων, η επάρκεια των υπολογιστικών υποδομών, η αξιοπιστία των αλγορίθμων και η προστασία των πληροφοριών. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι η Τεχνητή

Νοημοσύνη δεν λειτουργεί ως αυτόνομη τεχνολογία, αλλά αξιοποιεί δεδομένα που προέρχονται από ένα ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα, στο οποίο εντάσσονται το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Enterprise Resource Planning (ERP), τα Big Data και οι υπηρεσίες Cloud Computing. Κατά συνέπεια, το επίπεδο ολοκλήρωσης και συνεργασίας αυτών των τεχνολογιών επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητα των εφαρμογών AI.

Αντίστοιχα, οι οργανωσιακοί παράγοντες καθορίζουν την ικανότητα μιας επιχείρησης να ενσωματώσει τις νέες τεχνολογίες στις καθημερινές της λειτουργίες. Η υποστήριξη της ανώτατης διοίκησης, η ύπαρξη σαφούς στρατηγικής ψηφιακού μετασχηματισμού, η οργανωσιακή κουλτούρα, η αποτελεσματική διαχείριση της αλλαγής και το επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας αναφέρονται σταθερά ως κρίσιμες προϋποθέσεις επιτυχίας. Οι επιχειρήσεις που διαθέτουν ανεπτυγμένες ψηφιακές υποδομές και εμπειρία στη διαχείριση δεδομένων εμφανίζονται περισσότερο προετοιμασμένες να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης. Αντίθετα, ακόμη και η ύπαρξη προηγμένων τεχνολογικών λύσεων δεν αρκεί όταν απουσιάζει η απαραίτητη οργανωσιακή ετοιμότητα.

Εξίσου καθοριστικός αποδεικνύεται ο ανθρώπινος παράγοντας. Οι εργαζόμενοι δεν αποτελούν απλώς χρήστες των εφαρμογών AI, αλλά βασικούς συντελεστές της επιτυχούς αξιοποίησής τους. Η ανάπτυξη ψηφιακών δεξιοτήτων, η συνεχής εκπαίδευση, η εμπιστοσύνη προς τα ευφυή συστήματα, η αποδοχή της τεχνολογικής αλλαγής και η ενίσχυση της διεπιστημονικής συνεργασίας επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματικότητα των εφαρμογών. Παράλληλα, η βιβλιογραφία αναδεικνύει τον σταδιακό μετασχηματισμό του ρόλου των διαχειριστών έργων, οι οποίοι καλούνται πλέον να συνδυάζουν την επαγγελματική εμπειρία με την αξιοποίηση δεδομένων και τη συνεργασία με ευφυή πληροφοριακά συστήματα. Η εξέλιξη αυτή μεταβάλλει τις απαιτούμενες επαγγελματικές δεξιότητες και καθιστά τη διαρκή επιμόρφωση αναπόσπαστο στοιχείο της επαγγελματικής ανάπτυξης.

Η οικονομική διάσταση επηρεάζει ουσιαστικά τη δυνατότητα των οργανισμών να επενδύσουν σε εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης. Πέρα από την τεχνική αποτελεσματικότητα των λύσεων, οι επιχειρήσεις αξιολογούν το αρχικό κόστος

υλοποίησης, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των συστημάτων, την αναμενόμενη απόδοση της επένδυσης (Return on Investment – ROI), τους σχετικούς επιχειρησιακούς κινδύνους και τη συμβολή της ΑΙ στη διατήρηση της ανταγωνιστικότητάς τους. Η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί, επομένως, βασική προϋπόθεση για τη συστηματική και μακροχρόνια ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών στις επιχειρησιακές διαδικασίες.

Παράλληλα, ολοένα μεγαλύτερη βαρύτητα αποκτούν οι ηθικές και κανονιστικές διαστάσεις της υιοθέτησης της ΑΙ. Η αυξανόμενη χρήση ευφύων συστημάτων δημιουργεί νέες απαιτήσεις που σχετίζονται με τη διαφάνεια των αλγορίθμων, την προστασία των προσωπικών δεδομένων, τον περιορισμό της αλγοριθμικής μεροληψίας, την κυβερνοασφάλεια και τη διατήρηση της ανθρώπινης εποπτείας κατά τη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, η διαμόρφωση νέων κανονιστικών πλαισίων, όπως η Πράξη για την Τεχνητή Νοημοσύνη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU AI Act), μεταβάλλει σταδιακά το θεσμικό περιβάλλον μέσα στο οποίο αναπτύσσονται και εφαρμόζονται οι σχετικές τεχνολογίες. Η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις αυτές δεν αντιμετωπίζεται πλέον μόνο ως νομική υποχρέωση, αλλά και ως παράγοντας που ενισχύει την αξιοπιστία των εφαρμογών και την εμπιστοσύνη των χρηστών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι παραπάνω διαστάσεις δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά αλληλεπιδρούν διαρκώς μεταξύ τους. Η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζει την αξιοπιστία των αλγορίθμων, η οργανωσιακή κουλτούρα διαμορφώνει τον βαθμό αποδοχής των νέων τεχνολογιών, οι οικονομικοί περιορισμοί καθορίζουν τις διαθέσιμες τεχνολογικές υποδομές, ενώ οι κανονιστικές απαιτήσεις επηρεάζουν τόσο τον σχεδιασμό των εφαρμογών όσο και τις διαδικασίες διαχείρισης των δεδομένων. Η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προκύπτει, συνεπώς, από τη δυναμική αλληλεπίδραση όλων αυτών των παραγόντων και όχι από την απομονωμένη ενίσχυση μιας μόνο διάστασης.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι η μετάβαση προς την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης συνιστά πρωτίστως μια διαδικασία οργανωσιακού μετασχηματισμού και όχι απλώς μια τεχνολογική αναβάθμιση. Η δημιουργία πραγματικής επιχειρησιακής αξίας προϋποθέτει τον συνδυασμό κατάλληλων

τεχνολογικών υποδομών, ανθρώπινων δεξιοτήτων, οργανωσιακών πρακτικών, οικονομικών πόρων και υπεύθυνων μηχανισμών διακυβέρνησης. Η σύνθεση αυτή αποτυπώνει ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης και λειτουργεί ως βάση για την περαιτέρω διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιμέρους παραγόντων στις επόμενες ενότητες.

6.3 Εννοιολογική οργάνωση των παραγόντων υιοθέτησης

Η σύνθεση των ευρημάτων της διεθνούς βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων δεν μπορεί να ερμηνευθεί ως αποτέλεσμα ενός μόνο παράγοντα ή μιας μεμονωμένης τεχνολογικής επιλογής. Αντίθετα, πρόκειται για μια πολυδιάστατη διαδικασία, στην οποία αλληλεπιδρούν τεχνολογικές, οργανωσιακές, ανθρώπινες, οικονομικές και κανονιστικές συνιστώσες. Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι οι παράγοντες αυτοί δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά συγκροτούν ένα σύνθετο πλέγμα αλληλεπιδράσεων που επηρεάζει τόσο την απόφαση υιοθέτησης όσο και την αποτελεσματική αξιοποίηση των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός τεχνικού έργου.

Η σύνθεση των επιλεγμένων δημοσιεύσεων επιτρέπει την οργάνωση των παραγόντων υιοθέτησης σε πέντε βασικές κατηγορίες, οι οποίες αποτυπώνουν τις κυριότερες πτυχές που αναδεικνύονται συστηματικά στη διεθνή βιβλιογραφία. Η οργάνωση αυτή δεν συνιστά νέο θεωρητικό μοντέλο, αλλά αποτελεί μια συνθετική αποτύπωση των ερευνητικών ευρημάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των επιμέρους παραγόντων και αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο αυτοί συνδυάζονται κατά τη διαδικασία υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.

Πρώτη κατηγορία αποτελούν οι τεχνολογικοί παράγοντες, οι οποίοι συνθέτουν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο αναπτύσσονται οι εφαρμογές ΑΙ. Ως κρίσιμες προϋποθέσεις αναφέρονται η διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, η ποιότητα των πληροφοριακών

υποδομών, η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων, η επάρκεια των υπολογιστικών πόρων και η δυνατότητα ενσωμάτωσης των εφαρμογών στα υφιστάμενα ψηφιακά περιβάλλοντα των οργανισμών. Παράλληλα, υπογραμμίζεται ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν λειτουργεί αυτόνομα, αλλά αξιοποιεί δεδομένα που προέρχονται από ένα ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα, στο οποίο εντάσσονται το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Enterprise Resource Planning (ERP), τα Big Data και οι υπηρεσίες Cloud Computing. Κατά συνέπεια, το επίπεδο ολοκλήρωσης και συνεργασίας αυτών των τεχνολογιών επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητα των εφαρμογών AI.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι οργανωσιακοί παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την ικανότητα μιας επιχείρησης να ενσωματώσει τις νέες τεχνολογίες στις καθημερινές της λειτουργίες. Η δέσμευση της διοίκησης, η ύπαρξη σαφούς στρατηγικής ψηφιακού μετασχηματισμού, η οργανωσιακή κουλτούρα, η διαχείριση της αλλαγής, η αξιοποίηση της οργανωσιακής γνώσης και το επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας αναφέρονται σταθερά ως κρίσιμες προϋποθέσεις επιτυχίας. Οι επιχειρήσεις που διαθέτουν ανεπτυγμένες ψηφιακές υποδομές και εμπειρία στη διαχείριση δεδομένων εμφανίζονται περισσότερο προετοιμασμένες να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες της Τεχνητής Νοημοσύνης. Αντίθετα, ακόμη και η ύπαρξη προηγμένων τεχνολογικών λύσεων δεν αρκεί όταν απουσιάζει η απαραίτητη οργανωσιακή ετοιμότητα.

Εξίσου σημαντικός είναι ο ανθρώπινος παράγοντας. Η συστηματική ανασκόπηση έδειξε ότι η επιτυχία των εφαρμογών AI εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γνώσεις, τις δεξιότητες, την εμπιστοσύνη και τη στάση των εργαζομένων απέναντι στις νέες τεχνολογίες. Η ανάπτυξη ψηφιακών δεξιοτήτων, η συνεχής εκπαίδευση, η αποδοχή της τεχνολογικής αλλαγής και η συνεργασία μεταξύ διαφορετικών επιστημονικών ειδικοτήτων αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για τη βιώσιμη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Παράλληλα, αναγνωρίζεται ότι ακόμη και ιδιαίτερα προηγμένες τεχνολογικές εφαρμογές αδυνατούν να αποδώσουν όταν δεν συνοδεύονται από την κατάλληλη προετοιμασία και ενεργή συμμετοχή του ανθρώπινου δυναμικού. Η μετάβαση αυτή μετασχηματίζει σταδιακά και τον ρόλο των διαχειριστών έργων, οι

οποίοι καλούνται πλέον να συνδυάζουν την επαγγελματική εμπειρία με την αξιοποίηση δεδομένων και τη συνεργασία με ευφυή πληροφοριακά συστήματα.

Η οικονομική διάσταση επηρεάζει άμεσα τη σκοπιμότητα και τη βιωσιμότητα των σχετικών επενδύσεων. Το αρχικό κόστος εφαρμογής, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των συστημάτων, η αναμενόμενη απόδοση της επένδυσης (Return on Investment – ROI), η οικονομική διαχείριση των κινδύνων και η δυνατότητα χρηματοδότησης αποτελούν βασικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη κατά τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων. Παράλληλα, η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι οι οικονομικές αξιολογήσεις δεν θα πρέπει να περιορίζονται μόνο σε άμεσους χρηματοοικονομικούς δείκτες, αλλά να συνεκτιμούν και μακροπρόθεσμα οφέλη, όπως η ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας, η αύξηση της οργανωσιακής γνώσης και η βελτίωση της παραγωγικότητας.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτούν, τέλος, οι ηθικοί και κανονιστικοί παράγοντες, οι οποίοι αναδεικνύονται ολοένα σημαντικότεροι όσο διευρύνεται η χρήση ευφύων συστημάτων στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η διαφάνεια των αλγορίθμων, η προστασία των προσωπικών δεδομένων, η κυβερνοασφάλεια, η αποφυγή της αλγοριθμικής μεροληψίας, η ανθρώπινη εποπτεία και η συμμόρφωση με τα ισχύοντα κανονιστικά πλαίσια αποτελούν πλέον αναπόσπαστα στοιχεία κάθε υπεύθυνης εφαρμογής Τεχνητής Νοημοσύνης. Η σχετική βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η τεχνολογική πρόοδος οφείλει να συνοδεύεται από αποτελεσματικούς μηχανισμούς διακυβέρνησης που διασφαλίζουν την αξιοπιστία, τη διαφάνεια και τη νομιμότητα των εφαρμογών.

Από τη συνολική επεξεργασία των ερευνητικών ευρημάτων προκύπτει ότι οι πέντε αυτές κατηγορίες εμφανίζουν έντονη αλληλεξάρτηση. Η ύπαρξη προηγμένων τεχνολογικών υποδομών δεν οδηγεί αυτομάτως σε επιτυχή υιοθέτηση όταν απουσιάζει η οργανωσιακή ετοιμότητα ή όταν οι εργαζόμενοι δεν διαθέτουν τις απαραίτητες δεξιότητες. Αντίστοιχα, η επαρκής οικονομική δυνατότητα δεν διασφαλίζει από μόνη της την επιτυχία μιας επένδυσης όταν δεν υπάρχουν κατάλληλα δεδομένα, σαφής στρατηγική ή αποτελεσματικοί μηχανισμοί διακυβέρνησης. Η βιβλιογραφία συγκλίνει στο συμπέρασμα ότι η ουσιαστική αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει

ισορροπημένη ανάπτυξη όλων των παραπάνω παραγόντων και διαρκή συντονισμό μεταξύ τους.

Επιπλέον, οι παράγοντες αυτοί δεν παραμένουν σταθεροί, αλλά μεταβάλλονται καθώς εξελίσσεται η ψηφιακή ωριμότητα των οργανισμών. Στα αρχικά στάδια μεγαλύτερη βαρύτητα αποδίδεται στη δημιουργία τεχνολογικών υποδομών και στη διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων. Όσο όμως αυξάνεται η εμπειρία από την αξιοποίηση των εφαρμογών ΑΙ, ενισχύεται η σημασία των οργανωσιακών, ανθρώπινων και κανονιστικών παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν τη μακροχρόνια βιωσιμότητα και αποτελεσματικότητα των σχετικών επενδύσεων. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτελεί μια δυναμική εξελικτική διαδικασία και όχι μια εφάπαξ τεχνολογική παρέμβαση.

Η συνθετική αυτή οργάνωση των ευρημάτων συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας πιο συνεκτικής εικόνας για τους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και διευκολύνει την κατανόηση των σχέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Ταυτόχρονα, αναδεικνύει τα σημεία στα οποία η διαθέσιμη επιστημονική γνώση παραμένει περιορισμένη, δημιουργώντας μια σαφή βάση τόσο για την ερμηνεία των ευρημάτων της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης όσο και για τη διατύπωση των τελικών συμπερασμάτων της εργασίας.

6.4 Ερμηνεία της αλληλεπίδρασης των παραγόντων

Η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων δεν λειτουργούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές, αλλά ως αλληλοσυνδεόμενα στοιχεία ενός ενιαίου συστήματος. Η επιτυχία ή η αποτυχία μιας εφαρμογής δεν εξαρτάται από την επάρκεια ενός μόνο παράγοντα, αλλά από τον βαθμό ισορροπημένης ανάπτυξης και συντονισμού όλων των κρίσιμων διαστάσεων που αναδείχθηκαν κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, καθώς μετατοπίζει την

εστίαση από τις επιμέρους τεχνολογικές λύσεις προς τη συνολική οργανωσιακή ικανότητα αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Αφετηρία της διαδικασίας αποτελεί η τεχνολογική διάσταση, η οποία δημιουργεί τις αναγκαίες, αλλά όχι από μόνη της επαρκείς, προϋποθέσεις για την εφαρμογή της ΑΙ. Η ύπαρξη προηγμένων αλγορίθμων, υψηλής ποιότητας δεδομένων και σύγχρονων πληροφοριακών υποδομών επιτρέπει την ανάπτυξη αξιόπιστων εφαρμογών, χωρίς όμως να διασφαλίζει την επιτυχή αξιοποίησή τους. Πλήθος μελετών επισημαίνει ότι ακόμη και οργανισμοί με υψηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας αντιμετωπίζουν δυσκολίες κατά την εφαρμογή συστημάτων ΑΙ όταν απουσιάζει η απαιτούμενη οργανωσιακή υποστήριξη ή όταν οι εργαζόμενοι εμφανίζουν περιορισμένη αποδοχή απέναντι στις νέες τεχνολογίες.

Ιδιαίτερα στενή εμφανίζεται η σχέση μεταξύ των τεχνολογικών και των οργανωσιακών παραγόντων. Η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών ΑΙ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κατά πόσο οι οργανισμοί διαθέτουν σαφή στρατηγική ψηφιακού μετασχηματισμού, αποτελεσματικούς μηχανισμούς διαχείρισης της αλλαγής και διαδικασίες ενσωμάτωσης των νέων τεχνολογιών στις καθημερινές επιχειρησιακές λειτουργίες. Με άλλα λόγια, η τεχνολογία αποκτά πραγματική επιχειρησιακή αξία μόνο όταν συνοδεύεται από οργανωσιακή προσαρμογή, ανασχεδιασμό των διαδικασιών και ανάπτυξη κουλτούρας που ενθαρρύνει την καινοτομία και τη συνεχή βελτίωση.

Εξίσου έντονη είναι και η αλληλεπίδραση μεταξύ των οργανωσιακών και των ανθρώπινων παραγόντων. Ακόμη και οι πλέον ολοκληρωμένες στρατηγικές ψηφιακού μετασχηματισμού είναι δύσκολο να αποδώσουν όταν οι εργαζόμενοι δεν διαθέτουν τις απαραίτητες γνώσεις ή δεν εμπιστεύονται τις εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης. Η ανάπτυξη ψηφιακών δεξιοτήτων, η συνεχής εκπαίδευση και η ενεργός συμμετοχή των χρηστών στη διαδικασία υλοποίησης αναγνωρίζονται ως βασικές προϋποθέσεις για την επιτυχή αξιοποίηση των σχετικών τεχνολογιών. Παράλληλα, υπογραμμίζεται ότι η ΑΙ δεν αντικαθιστά τον ανθρώπινο παράγοντα, αλλά μετασχηματίζει τον τρόπο με τον οποίο οι επαγγελματίες αλληλεπιδρούν με τα πληροφοριακά συστήματα και λαμβάνουν αποφάσεις.

Αντίστοιχη αλληλεξάρτηση παρατηρείται και μεταξύ των οικονομικών και των οργανωσιακών παραγόντων. Οι επενδύσεις σε εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης απαιτούν σημαντικούς οικονομικούς πόρους, οι οποίοι πρέπει να συνοδεύονται από μακροπρόθεσμο στρατηγικό σχεδιασμό και σαφή επιχειρησιακή στόχευση. Οι σχετικές μελέτες αναδεικνύουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα των εφαρμογών ΑΙ δεν εξαρτάται μόνο από το αρχικό κόστος ή την αναμενόμενη απόδοση της επένδυσης, αλλά και από την ικανότητα των οργανισμών να αξιοποιούν αποτελεσματικά τις νέες τεχνολογίες μέσα από κατάλληλες οργανωσιακές διαδικασίες. Η δημιουργία προστιθέμενης αξίας προκύπτει κυρίως όταν οι τεχνολογικές επενδύσεις εντάσσονται σε ένα ευρύτερο πρόγραμμα οργανωσιακού μετασχηματισμού.

Παράλληλα, οι ηθικοί και κανονιστικοί παράγοντες διατρέχουν οριζόντια όλες τις υπόλοιπες διαστάσεις της υιοθέτησης. Η προστασία των προσωπικών δεδομένων, η κυβερνοασφάλεια, η διαφάνεια των αλγορίθμων, η ανθρώπινη εποπτεία και η συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις δεν αποτελούν αυτόνομους τομείς εφαρμογής, αλλά επηρεάζουν άμεσα τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη λειτουργία όλων των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης. Η αυξανόμενη σημασία πλαισίων όπως ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός για την Τεχνητή Νοημοσύνη (EU AI Act) επιβεβαιώνει ότι η τεχνολογική πρόοδος συνοδεύεται πλέον από αυξημένες απαιτήσεις υπεύθυνης ανάπτυξης και αποτελεσματικής διακυβέρνησης των ευφυών συστημάτων.

Ένα ακόμη σημαντικό εύρημα της βιβλιογραφικής σύνθεσης αφορά τη δυναμική φύση των σχέσεων μεταξύ των παραγόντων. Η σχετική βαρύτητα κάθε διάστασης μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας του οργανισμού και το στάδιο εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης. Κατά τα αρχικά στάδια της υιοθέτησης, μεγαλύτερη σημασία αποκτούν οι τεχνολογικές υποδομές, η ποιότητα των δεδομένων και η διαθεσιμότητα οικονομικών πόρων. Όσο όμως οι οργανισμοί αποκτούν εμπειρία στη χρήση εφαρμογών ΑΙ, αυξάνεται η σημασία της οργανωσιακής κουλτούρας, της ανάπτυξης ανθρώπινου δυναμικού, της διαχείρισης γνώσης και της συνεχούς προσαρμογής των επιχειρησιακών διαδικασιών. Η εξέλιξη αυτή υποδηλώνει ότι η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτελεί μια διαρκή εξελικτική διαδικασία,

κατά την οποία οι προτεραιότητες μεταβάλλονται σταδιακά σύμφωνα με το επίπεδο ωριμότητας κάθε οργανισμού.

Εξίσου σημαντική είναι και η συνεχής ανατροφοδότηση μεταξύ των επιμέρους διαστάσεων. Τα δεδομένα που παράγονται από τη λειτουργία των συστημάτων χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των αλγορίθμων, οι οργανωσιακές εμπειρίες οδηγούν στην αναθεώρηση διαδικασιών, οι νέες δεξιότητες των εργαζομένων ενισχύουν την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των τεχνολογιών και οι διαρκείς κανονιστικές εξελίξεις επηρεάζουν τον σχεδιασμό των πληροφοριακών συστημάτων. Δημιουργείται έτσι ένας μηχανισμός συνεχούς οργανωσιακής μάθησης, μέσω του οποίου οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης εξελίσσονται παράλληλα με τους ίδιους τους οργανισμούς που τις αξιοποιούν.

Η ερμηνεία των σχέσεων που αναδείχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία οδηγεί τελικά στο συμπέρασμα ότι η επιτυχής υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτελεί αποτέλεσμα της ισορροπημένης ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων. Η πραγματική αξία της ΑΙ δεν προκύπτει από την αποσπασματική εφαρμογή μεμονωμένων τεχνολογικών λύσεων, αλλά από μια συντονισμένη διαδικασία ψηφιακού μετασχηματισμού που συνδυάζει όλες τις παραπάνω διαστάσεις σε ένα συνεκτικό πλαίσιο λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ανάγκη υιοθέτησης μιας περισσότερο ολιστικής θεώρησης, τόσο στην ακαδημαϊκή έρευνα όσο και στην επαγγελματική πρακτική, αναδεικνύοντας ότι η επιτυχία των εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης εξαρτάται πρωτίστως από τον τρόπο με τον οποίο οι επιμέρους παράγοντες συνεργάζονται και αλληλοενισχύονται.

6.5 Πρακτικές επιπτώσεις για οργανισμούς και διαχειριστές έργων

Η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) διαθέτει σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης της διαχείρισης τεχνικών έργων, ωστόσο η αξιοποίησή της απαιτεί πολύ περισσότερα από την απλή εγκατάσταση νέων τεχνολογικών εφαρμογών. Η επιτυχής υιοθέτηση

προϋποθέτει συνδυασμένες οργανωσιακές, τεχνολογικές και διοικητικές παρεμβάσεις, οι οποίες επιτρέπουν στους οργανισμούς να ενσωματώσουν αποτελεσματικά τις δυνατότητες της ΑΙ στις καθημερινές τους λειτουργίες. Οι σχετικές μελέτες συγκλίνουν στην άποψη ότι οι επιχειρήσεις που αντιμετωπίζουν την Τεχνητή Νοημοσύνη ως αναπόσπαστο στοιχείο μιας συνολικής στρατηγικής ψηφιακού μετασχηματισμού επιτυγχάνουν ουσιαστικότερα και περισσότερο διατηρήσιμα αποτελέσματα από εκείνες που περιορίζονται στην αποσπασματική εφαρμογή μεμονωμένων τεχνολογικών λύσεων.

Πρώτο και καθοριστικό βήμα αποτελεί η διαμόρφωση μιας σαφούς στρατηγικής για την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Πριν από οποιαδήποτε επένδυση σε εφαρμογές ΑΙ, οι οργανισμοί οφείλουν να προσδιορίζουν με σαφήνεια τα επιχειρησιακά προβλήματα που επιδιώκουν να αντιμετωπίσουν, τους στρατηγικούς τους στόχους και την προστιθέμενη αξία που αναμένεται να προκύψει από την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών. Η επιλογή μιας εφαρμογής δεν θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στις τεχνικές της δυνατότητες ή στις κυρίαρχες τάσεις της αγοράς, αλλά κυρίως στον βαθμό στον οποίο ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες του οργανισμού και υποστηρίζει τους μακροπρόθεσμους επιχειρησιακούς του στόχους.

Εξίσου κρίσιμη αναδεικνύεται η αποτελεσματική διαχείριση των δεδομένων. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων που παράγουν τα συστήματα ΑΙ εξαρτάται άμεσα από την αξιοπιστία, την πληρότητα και τη συνέπεια των διαθέσιμων πληροφοριών. Για τον λόγο αυτό, οι οργανισμοί καλούνται να αναπτύξουν ολοκληρωμένες διαδικασίες διακυβέρνησης δεδομένων (data governance), να διασφαλίσουν την ποιότητα των πληροφοριών που συλλέγουν και να ενισχύσουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των πληροφοριακών τους συστημάτων. Η επένδυση στη σωστή οργάνωση και αξιοποίηση των δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιώσιμη λειτουργία οποιασδήποτε εφαρμογής Τεχνητής Νοημοσύνης.

Παράλληλα, αρκετές μελέτες προτείνουν μια σταδιακή προσέγγιση κατά την υλοποίηση έργων ΑΙ. Αντί της άμεσης ανάπτυξης εκτεταμένων προγραμμάτων ψηφιακού μετασχηματισμού, προκρίνεται η εφαρμογή πιλοτικών έργων μικρής

κλίμακας, τα οποία επιτρέπουν στους οργανισμούς να αξιολογούν την αποτελεσματικότητα των νέων τεχνολογιών, να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα και να αποκτούν πολύτιμη εμπειρία πριν από την ευρύτερη εφαρμογή τους. Η πρακτική αυτή περιορίζει την επενδυτική αβεβαιότητα, μειώνει τους κινδύνους εφαρμογής και διευκολύνει την αποδοχή των νέων συστημάτων από το ανθρώπινο δυναμικό.

Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει επίσης η ανάπτυξη των ανθρώπινων πόρων. Η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει διαρκή επένδυση στην εκπαίδευση και στην καλλιέργεια ψηφιακών δεξιοτήτων. Οι οργανισμοί καλούνται να ενισχύσουν την εξοικείωση των εργαζομένων με την ανάλυση δεδομένων, τη χρήση ψηφιακών εργαλείων και τις βασικές αρχές λειτουργίας των εφαρμογών ΑΙ. Παράλληλα, η δημιουργία διεπιστημονικών ομάδων, στις οποίες συνεργάζονται μηχανικοί, διαχειριστές έργων, ειδικοί πληροφορικής και αναλυτές δεδομένων, συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων τεχνολογικών δυνατοτήτων.

Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν άμεσα και τον ρόλο των διαχειριστών έργων. Ο σύγχρονος Project Manager δεν περιορίζεται πλέον στον προγραμματισμό και την παρακολούθηση των εργασιών, αλλά καλείται να αξιολογεί πληροφορίες που παράγονται από ευφυή πληροφοριακά συστήματα, να ερμηνεύει τα αποτελέσματα των εφαρμογών ΑΙ και να ενσωματώνει τα σχετικά ευρήματα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η εξέλιξη αυτή καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ενός νέου συνδυασμού δεξιοτήτων, που περιλαμβάνει τεχνική γνώση, ψηφιακή επάρκεια, αναλυτική σκέψη και αποτελεσματική συνεργασία με συστήματα υποστήριξης αποφάσεων.

Παράλληλα με τις τεχνολογικές και ανθρώπινες διαστάσεις, ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτά η οργανωσιακή διακυβέρνηση της Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι οργανισμοί καλούνται να διαμορφώσουν σαφείς πολιτικές σχετικά με τη χρήση των εφαρμογών ΑΙ, να καθορίσουν διαδικασίες ελέγχου και επικύρωσης των αποτελεσμάτων, να διασφαλίσουν την προστασία των δεδομένων και να εφαρμόσουν μηχανισμούς ανθρώπινης εποπτείας στις κρίσιμες αποφάσεις. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου πλαισίου ενισχύει τη διαφάνεια, αυξάνει την εμπιστοσύνη των χρηστών και διευκολύνει τη συμμόρφωση με τις σύγχρονες κανονιστικές απαιτήσεις.

Επιπλέον, η αποτίμηση των εφαρμογών ΑΙ δεν θα πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά σε τεχνικούς δείκτες απόδοσης, όπως η ακρίβεια των αλγορίθμων ή η ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων. Η διεθνής βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι είναι εξίσου σημαντικό να αξιολογούνται ευρύτερες επιχειρησιακές επιδράσεις, όπως η βελτίωση της ποιότητας των αποφάσεων, η αύξηση της παραγωγικότητας, η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, η οργανωσιακή μάθηση και η ανάπτυξη νέων ψηφιακών ικανοτήτων. Μια τέτοια πολυδιάστατη αξιολόγηση αποτυπώνει πληρέστερα την πραγματική αξία που δημιουργεί η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στις λειτουργίες ενός οργανισμού.

Τέλος, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών ΑΙ καθιστά αναγκαία την αντίστοιχη προσαρμογή των οργανισμών. Η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα έργο με σαφή ημερομηνία ολοκλήρωσης, αλλά ως μια διαρκής διαδικασία μάθησης, αναθεώρησης και βελτίωσης. Η συστηματική παρακολούθηση των τεχνολογικών εξελίξεων, η προσαρμογή των επιχειρησιακών διαδικασιών και η διαρκής ανάπτυξη των ανθρώπινων και οργανωσιακών δυνατοτήτων αποτελούν προϋποθέσεις για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας σε ένα περιβάλλον που μεταβάλλεται συνεχώς. Η βιβλιογραφία συγκλίνει, επομένως, στην άποψη ότι η ουσιαστική αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης προϋποθέτει μια ολοκληρωμένη και μακροπρόθεσμη προσέγγιση, στην οποία οι τεχνολογικές δυνατότητες συνδυάζονται με οργανωσιακή ετοιμότητα, επένδυση στο ανθρώπινο δυναμικό, οικονομική βιωσιμότητα και υπεύθυνη διακυβέρνηση, δημιουργώντας τις συνθήκες για έναν βιώσιμο ψηφιακό μετασχηματισμό των οργανισμών του κατασκευαστικού κλάδου.

6.6 Περιορισμοί της βιβλιογραφίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η διεθνής έρευνα σχετικά με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο κατά την τελευταία δεκαετία. Η συνεχής ανάπτυξη τεχνολογιών όπως η Μηχανική Μάθηση (Machine

Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP) και η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση ενός ιδιαίτερα δυναμικού και ταχέως εξελισσόμενου επιστημονικού πεδίου. Παρά τη σημαντική αυτή πρόοδο, η σύνθεση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας δείχνει ότι εξακολουθούν να υφίστανται ουσιαστικοί περιορισμοί, οι οποίοι επηρεάζουν τόσο την πληρότητα της επιστημονικής γνώσης όσο και τη δυνατότητα γενίκευσης των υφιστάμενων ερευνητικών αποτελεσμάτων.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της υπάρχουσας βιβλιογραφίας είναι ο έντονος κατακερματισμός της. Η πλειονότητα των δημοσιεύσεων επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ή αξιολόγηση επιμέρους εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως η πρόβλεψη καθυστερήσεων, η εκτίμηση κόστους, η αναγνώριση κινδύνων και η παρακολούθηση της προόδου των έργων. Αντίθετα, σχετικά περιορισμένος παραμένει ο αριθμός των μελετών που εξετάζουν συνολικά τη διαδικασία υιοθέτησης της ΑΙ ή διερευνούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων. Ως αποτέλεσμα, η διαθέσιμη γνώση χαρακτηρίζεται από υψηλό επίπεδο εξειδίκευσης, χωρίς όμως να προσφέρει πάντοτε μια ολοκληρωμένη εικόνα του φαινομένου.

Παράλληλα, διαπιστώνεται σημαντική ετερογένεια ως προς τις ερευνητικές μεθοδολογίες που εφαρμόζονται. Οι επιμέρους μελέτες αξιοποιούν διαφορετικά σύνολα δεδομένων, εναλλακτικούς αλγορίθμους, ποικίλους δείκτες αξιολόγησης και διαφορετικά ερευνητικά πρωτόκολλα, γεγονός που δυσχεραίνει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Η απουσία κοινά αποδεκτών πλαισίων αξιολόγησης περιορίζει τη δυνατότητα εξαγωγής γενικευμένων συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διαφορετικών τεχνολογικών προσεγγίσεων και αναδεικνύει την ανάγκη για μεγαλύτερη μεθοδολογική συνέπεια στις μελλοντικές έρευνες.

Επιπλέον, η εμπειρική τεκμηρίωση της εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης σε πραγματικές συνθήκες εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Μεγάλο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας βασίζεται σε πειραματικές προσεγγίσεις, πιλοτικές εφαρμογές ή μελέτες περίπτωσης μικρής κλίμακας, οι οποίες, παρότι συμβάλλουν ουσιαστικά

στην ανάπτυξη νέων τεχνολογικών λύσεων, δεν επιτρέπουν πάντοτε την ασφαλή γενίκευση των ευρημάτων τους στο σύνολο του κατασκευαστικού κλάδου. Παραμένουν σχετικά λίγες οι δημοσιεύσεις που εξετάζουν τη μακροχρόνια εφαρμογή της ΑΙ σε μεγάλα και σύνθετα τεχνικά έργα ή αξιολογούν διαχρονικά την επίδρασή της στην οργανωσιακή απόδοση.

Αντίστοιχα, οι οργανωσιακές και διοικητικές διαστάσεις της υιοθέτησης εξακολουθούν να αποτελούν λιγότερο ανεπτυγμένο πεδίο έρευνας. Ενώ η τεχνολογική πρόοδος αναλύεται εκτενώς, ζητήματα όπως η διαχείριση της οργανωσιακής αλλαγής, η ανάπτυξη ψηφιακής κουλτούρας, η διοίκηση της γνώσης, η στρατηγική διακυβέρνηση των δεδομένων και η προσαρμογή των οργανωσιακών δομών στις απαιτήσεις της Τεχνητής Νοημοσύνης εξετάζονται συγκριτικά λιγότερο. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι η έρευνα εξακολουθεί να δίνει προτεραιότητα στις τεχνολογικές δυνατότητες των εφαρμογών, αφήνοντας σε δεύτερο πλάνο τις οργανωσιακές προϋποθέσεις που απαιτούνται για τη βιώσιμη ενσωμάτωσή τους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η βιβλιογραφία που αφορά την Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs), η οποία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Παρότι οι σχετικές δημοσιεύσεις αυξάνονται με ιδιαίτερα ταχείς ρυθμούς, οι περισσότερες επικεντρώνονται κυρίως στην παρουσίαση των τεχνολογικών δυνατοτήτων των νέων συστημάτων και λιγότερο στη συστηματική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας, της αξιοπιστίας και των περιορισμών τους στο περιβάλλον των τεχνικών έργων. Ζητήματα όπως η ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων, η πιθανότητα παραγωγής ανακριβούς περιεχομένου, η ανθρώπινη εποπτεία, η προστασία των δεδομένων και η συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο έντονης επιστημονικής διερεύνησης.

Ακόμη ένα πεδίο που εμφανίζει σημαντικά περιθώρια ανάπτυξης αφορά τις οικονομικές και στρατηγικές επιπτώσεις της υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης. Παρότι αρκετές μελέτες τεκμηριώνουν τη συμβολή της ΑΙ στη βελτίωση της παραγωγικότητας και της ποιότητας των αποφάσεων, περιορισμένος παραμένει ο

αριθμός των ερευνών που εξετάζουν τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα των σχετικών επενδύσεων, την απόδοση της επένδυσης σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα και τη συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαμόρφωση διατηρήσιμου ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος για τις κατασκευαστικές επιχειρήσεις.

Με βάση τις αδυναμίες που εντοπίστηκαν, η διεθνής βιβλιογραφία προτείνει ορισμένες σαφείς κατευθύνσεις για τη μελλοντική έρευνα. Πρωταρχική προτεραιότητα αποτελεί η ανάπτυξη περισσότερων εμπειρικών μελετών μεγάλης κλίμακας, οι οποίες θα εξετάζουν την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης σε πραγματικά τεχνικά έργα διαφορετικού μεγέθους και βαθμού πολυπλοκότητας. Η διεύρυνση αυτής της ερευνητικής βάσης μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία των διαθέσιμων ευρημάτων και να επιτρέψει την ασφαλέστερη γενίκευσή τους.

Εξίσου σημαντική αναδεικνύεται η ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο διεπιστημονικών προσεγγίσεων, οι οποίες θα διερευνούν ταυτόχρονα τις τεχνολογικές, οργανωσιακές και ανθρώπινες διαστάσεις της υιοθέτησης της ΑΙ. Ο συνδυασμός γνώσεων από τη διοίκηση έργων, την επιστήμη δεδομένων, τη διοίκηση επιχειρήσεων και τα πληροφοριακά συστήματα μπορεί να συμβάλει στη διαμόρφωση μιας περισσότερο ολοκληρωμένης ερμηνείας της διαδικασίας ενσωμάτωσης της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο.

Παράλληλα, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω διερεύνηση των εφαρμογών της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων στις λειτουργίες του Construction Project Management. Μελλοντικές έρευνες μπορούν να αξιολογήσουν εμπειρικά τη συμβολή των τεχνολογιών αυτών στη διαχείριση τεχνικών εγγράφων, στη διοίκηση συμβάσεων, στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων, στη διαχείριση γνώσης και στην αυτοματοποίηση διοικητικών διαδικασιών, εξετάζοντας ταυτόχρονα ζητήματα αξιοπιστίας, ασφάλειας και κανονιστικής συμμόρφωσης.

Ιδιαίτερη προσοχή αναμένεται επίσης να δοθεί στα ζητήματα ηθικής διακυβέρνησης και υπεύθυνης χρήσης της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η περαιτέρω ανάπτυξη μεθόδων Explainable Artificial Intelligence (XAI), η ενίσχυση της ανθρώπινης εποπτείας, η προστασία των δεδομένων και η εφαρμογή των νέων

κανονιστικών πλαισίων διαμορφώνουν ένα πεδίο έρευνας που αναμένεται να αποκτήσει ακόμη μεγαλύτερη σημασία τα επόμενα χρόνια.

Η εικόνα που προκύπτει από τη συνολική βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι η έρευνα σχετικά με την Τεχνητή Νοημοσύνη στη διαχείριση τεχνικών έργων βρίσκεται σε φάση ταχείας εξέλιξης, χωρίς ωστόσο να έχει φτάσει ακόμη σε πλήρη θεωρητική και εφαρμοσμένη ωριμότητα. Η περαιτέρω ανάπτυξη του επιστημονικού πεδίου προϋποθέτει περισσότερο ολιστικές προσεγγίσεις, μεγαλύτερη εμπειρική τεκμηρίωση σε πραγματικά έργα και βαθύτερη διερεύνηση των οργανωσιακών, στρατηγικών και κανονιστικών διαστάσεων της υιοθέτησης της ΑΙ. Η κάλυψη αυτών των ερευνητικών κενών αναμένεται να ενισχύσει τόσο την εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης όσο και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης από τις επιχειρήσεις του κατασκευαστικού κλάδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη συστηματική διερεύνηση της εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων (Construction Project Management), μέσα από την ανάλυση και τη σύνθεση της σύγχρονης διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας. Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Systematic Literature Review – SLR) κατέστη δυνατή η συγκέντρωση, η αξιολόγηση και η κριτική αποτίμηση μεγάλου αριθμού επιστημονικών δημοσιεύσεων, γεγονός που επέτρεψε τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας για την εξέλιξη του επιστημονικού πεδίου, τις κυριότερες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης, τις τεχνολογίες που αξιοποιούνται, τους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτησή της και τα βασικά ερευνητικά κενά που εξακολουθούν να υφίστανται.

Από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη έχει πλέον εξελιχθεί σε έναν από τους σημαντικότερους μοχλούς του ψηφιακού

μετασχηματισμού της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Οι εφαρμογές της δεν περιορίζονται πλέον σε πειραματικά ή εξειδικευμένα πεδία, αλλά επεκτείνονται σταδιακά σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών του Construction Project Management, όπως ο χρονικός προγραμματισμός, η εκτίμηση και η διαχείριση κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση της προόδου, η διαχείριση πόρων, η υγεία και η ασφάλεια, η επεξεργασία τεχνικών εγγράφων και η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η συνεχής πρόοδος των αλγορίθμων, η αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων και η παράλληλη εξέλιξη των τεχνολογιών του Construction 4.0 διαμορφώνουν ένα ολοένα πιο ώριμο περιβάλλον για την αξιοποίηση ευφύων πληροφοριακών συστημάτων στον κατασκευαστικό κλάδο.

Η ανασκόπηση ανέδειξε ακόμη ότι η πραγματική αξία της Τεχνητής Νοημοσύνης προκύπτει κυρίως μέσα από τη συνεργασία της με άλλες ψηφιακές τεχνολογίες και όχι από την αυτόνομη εφαρμογή της. Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), η Βαθιά Μάθηση (Deep Learning), η Υπολογιστική Όραση (Computer Vision), η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing – NLP), καθώς και οι νεότερες εξελίξεις στην Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και στα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs), λειτουργούν συμπληρωματικά με τεχνολογίες όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και οι υπηρεσίες Cloud Computing. Η σύγκλιση αυτών των τεχνολογιών δημιουργεί νέες δυνατότητες αυτοματοποίησης, πρόβλεψης και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των τεχνικών έργων.

Ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα της παρούσας μελέτης είναι ότι η επιτυχής υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνολογικό ζήτημα. Η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι η αποτελεσματική αξιοποίησή της διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση πολλών παραγόντων, όπως η ποιότητα και η διαθεσιμότητα των δεδομένων, η ψηφιακή ωριμότητα των οργανισμών, η διαλειτουργικότητα των πληροφοριακών συστημάτων, η δέσμευση της διοίκησης, οι γνώσεις και οι δεξιότητες του ανθρώπινου δυναμικού, η διαχείριση της οργανωσιακής αλλαγής, η οικονομική δυνατότητα των επιχειρήσεων και η ύπαρξη κατάλληλων

μηχανισμών ηθικής διακυβέρνησης και κανονιστικής συμμόρφωσης. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει ότι η επιτυχία των εφαρμογών ΑΙ προϋποθέτει μια ολιστική προσέγγιση, η οποία συνδυάζει τεχνολογικές, οργανωσιακές και διοικητικές διαστάσεις του ψηφιακού μετασχηματισμού.

Η κριτική αποτίμηση των επιλεγμένων δημοσιεύσεων ανέδειξε, παράλληλα, σημαντικά ερευνητικά κενά. Παρότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει επιτύχει αξιοσημείωτη πρόοδο στην ανάπτυξη επιμέρους εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης, μεγάλο μέρος της έρευνας εξακολουθεί να επικεντρώνεται στην επίλυση συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων ή στη βελτίωση μεμονωμένων λειτουργιών της διαχείρισης έργων. Αντίθετα, παραμένουν σχετικά περιορισμένες οι μελέτες που προσεγγίζουν συνολικά τη διαδικασία υιοθέτησης της ΑΙ ή διερευνούν συνδυαστικά τους τεχνολογικούς, οργανωσιακούς, ανθρώπινους, οικονομικούς και κανονιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μακροχρόνια αξιοποίησή της. Επιπλέον, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη εμπειρικών ερευνών μεγάλης κλίμακας και περιορισμένη τεκμηρίωση σχετικά με τη διαχρονική απόδοση των εφαρμογών ΑΙ σε πραγματικά τεχνικά έργα.

Ένα ακόμη στοιχείο που προέκυψε από τη βιβλιογραφική σύνθεση είναι η σταδιακή μετατόπιση του επιστημονικού ενδιαφέροντος προς περισσότερο ολοκληρωμένες και ανθρωποκεντρικές προσεγγίσεις. Ενώ οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονταν κυρίως στη βελτίωση της ακρίβειας των αλγορίθμων, η σύγχρονη βιβλιογραφία δίνει αυξανόμενη έμφαση σε ζητήματα όπως η διακυβέρνηση των δεδομένων, η ερμηνευσιμότητα των μοντέλων, η κυβερνοασφάλεια, η οργανωσιακή ετοιμότητα, η υπεύθυνη χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης και η συμμόρφωση με τα νέα κανονιστικά πλαίσια. Η εξέλιξη αυτή αποτυπώνει μια ευρύτερη αλλαγή αντίληψης, σύμφωνα με την οποία η αξία της ΑΙ δεν εξαρτάται μόνο από τις τεχνικές της δυνατότητες, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνεται στις λειτουργίες των οργανισμών.

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης, καθίσταται σαφές ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη διαθέτει τις προϋποθέσεις να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στον μετασχηματισμό της διαχείρισης τεχνικών έργων,

συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας των αποφάσεων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Παράλληλα, αναδεικνύεται ότι η επιτυχής αξιοποίησή της προϋποθέτει συστηματικό σχεδιασμό, επένδυση σε ψηφιακές υποδομές και ανθρώπινο δυναμικό, ανάπτυξη κατάλληλων οργανωσιακών πρακτικών και συνεχή προσαρμογή στις τεχνολογικές και κανονιστικές εξελίξεις. Η σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας φιλοδοξεί να συμβάλει στην πληρέστερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο και να αποτελέσει μια χρήσιμη βάση αναφοράς τόσο για μελλοντικές επιστημονικές μελέτες όσο και για την πρακτική εφαρμογή των σχετικών τεχνολογιών.

7.2 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση είχε ως βασικό στόχο τη διερεύνηση της αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων μέσω της συστηματικής συλλογής, αξιολόγησης, ανάλυσης και σύνθεσης της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας. Στο πλαίσιο αυτό, τα ερευνητικά ερωτήματα που διατυπώθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο λειτούργησαν ως ο βασικός άξονας της ερευνητικής διαδικασίας και καθοδήγησαν τη θεματική οργάνωση και την κριτική αξιολόγηση των επιλεγμένων μελετών. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι απαντήσεις στα πέντε ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

Απάντηση στο Ερευνητικό Ερώτημα 1 (RQ1)

Ποιες είναι οι κυριότερες εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και σε ποιους τομείς του Construction Project Management παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ερευνητική και πρακτική ανάπτυξη;

Από τις μελέτες που εξετάστηκαν προκύπτει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη εφαρμόζεται πλέον σε σχεδόν όλες τις βασικές λειτουργίες του Construction Project Management. Οι περισσότερες εφαρμογές εντοπίζονται στον χρονικό

προγραμματισμό, στην εκτίμηση και διαχείριση κόστους, στη διαχείριση κινδύνων, στην παρακολούθηση της προόδου των έργων, στη διαχείριση ποιότητας, στην υγεία και ασφάλεια, στη διαχείριση πόρων, στη διαχείριση τεχνικών εγγράφων και στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι το ερευνητικό ενδιαφέρον μετατοπίζεται σταδιακά από εφαρμογές που υποστηρίζουν μεμονωμένες λειτουργίες προς περισσότερο ολοκληρωμένες λύσεις, οι οποίες αξιοποιούν δεδομένα από διαφορετικές ψηφιακές τεχνολογίες, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT) και τα Big Data. Ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια, σημαντική ανάπτυξη παρουσιάζουν οι εφαρμογές της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (Generative AI) και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs), οι οποίες δημιουργούν νέες δυνατότητες αυτοματοποίησης και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων.

Απάντηση στο Ερευνητικό Ερώτημα 2 (RQ2)

Ποια είναι τα σημαντικότερα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων και με ποιον τρόπο επηρεάζουν την απόδοση των έργων;

Η συγκριτική εξέταση των επιλεγμένων δημοσιεύσεων δείχνει ότι η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης τεχνικών έργων. Τα σημαντικότερα οφέλη αφορούν τη μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις, την ταχύτερη επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, τη βελτίωση της διαχείρισης κινδύνων, την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, την ενίσχυση της ασφάλειας, τη βελτίωση της παρακολούθησης της προόδου και την υποστήριξη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Πέρα όμως από την αυτοματοποίηση επιμέρους διαδικασιών, η πραγματική αξία της Τεχνητής Νοημοσύνης εντοπίζεται στη δυνατότητά της να μετατρέπει τα διαθέσιμα δεδομένα σε αξιοποιήσιμη γνώση. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η συνολική απόδοση των έργων ως προς το κόστος, τον χρόνο, την ποιότητα και τη

διαχείριση των κινδύνων, προσφέροντας σημαντική υποστήριξη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Απάντηση στο Ερευνητικό Ερώτημα 3 (RQ3)

Ποιες είναι οι κυριότερες προκλήσεις, οι περιορισμοί και οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης από οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου;

Η κριτική αξιολόγηση της βιβλιογραφίας κατέδειξε ότι η επιτυχής αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές δυνατότητες των αλγορίθμων, αλλά επηρεάζεται από ένα σύνολο αλληλένδετων παραγόντων.

Μεταξύ των σημαντικότερων προκλήσεων συγκαταλέγονται η περιορισμένη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, η χαμηλή ψηφιακή ωριμότητα πολλών οργανισμών, το υψηλό κόστος υλοποίησης, η δυσκολία ενσωμάτωσης των νέων τεχνολογιών στις υφιστάμενες διαδικασίες, η έλλειψη εξειδικευμένων γνώσεων και δεξιοτήτων, καθώς και ζητήματα που σχετίζονται με τη διακυβέρνηση των δεδομένων, τη διαφάνεια των αλγορίθμων και το κανονιστικό πλαίσιο.

Τα ευρήματα της ανασκόπησης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία, κατά την οποία οι τεχνολογικοί, οργανωσιακοί, ανθρώπινοι, οικονομικοί και θεσμικοί παράγοντες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν καθοριστικά την επιτυχία της εφαρμογής.

Απάντηση στο Ερευνητικό Ερώτημα 4 (RQ4)

Πώς μπορούν να συντεθούν και να οργανωθούν συστηματικά τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να αναδειχθούν οι βασικές διαστάσεις που επηρεάζουν την αξιοποίηση και την υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στο Construction Project Management;

Η επεξεργασία και η σύνθεση των βιβλιογραφικών ευρημάτων επέτρεψαν την οργάνωση της διαθέσιμης γνώσης σε ένα συνεκτικό εννοιολογικό πλαίσιο, μέσα από το οποίο αναδείχθηκαν οι βασικές διαστάσεις που επηρεάζουν την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

Η ανάλυση έδειξε ότι η αποτελεσματική εφαρμογή της ΑΙ δεν μπορεί να ερμηνευθεί αποκλειστικά μέσα από την τεχνολογική διάσταση, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση οργανωσιακών, επιχειρησιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων. Παράλληλα, αναδείχθηκαν οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων αυτών, επιβεβαιώνοντας ότι η αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτελεί αποτέλεσμα ενός σύνθετου οικοσυστήματος τεχνολογίας, οργανωσιακής ετοιμότητας και επιχειρησιακών αναγκών.

Η συστηματική αυτή οργάνωση της βιβλιογραφίας συνέβαλε στη διαμόρφωση μιας περισσότερο ολοκληρωμένης εικόνας του γνωστικού πεδίου και ανέδειξε τις βασικές θεματικές περιοχές στις οποίες συγκλίνει η σύγχρονη ερευνητική δραστηριότητα.

Απάντηση στο Ερευνητικό Ερώτημα 5 (RQ5)

Ποιες κατευθύνσεις και προτεραιότητες για μελλοντική έρευνα αναδεικνύονται μέσα από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων;

Η επισκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας δείχνει ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο των τελευταίων ετών, εξακολουθούν να υπάρχουν ουσιαστικά ερευνητικά κενά. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων μελετών εξακολουθεί να επικεντρώνεται σε επιμέρους εφαρμογές ή σε συγκεκριμένες τεχνολογίες, ενώ περιορισμένος αριθμός εργασιών εξετάζει ολιστικά την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης σε επίπεδο οργανισμού ή σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των τεχνικών έργων.

Μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες μπορούν να εστιάσουν στην ανάπτυξη και αξιολόγηση εφαρμογών σε πραγματικά τεχνικά έργα, στη διερεύνηση της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών του Construction 4.0, στην αξιολόγηση των δυνατοτήτων της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων, καθώς και στη μελέτη ζητημάτων που σχετίζονται με την οργανωσιακή ετοιμότητα, τη διακυβέρνηση δεδομένων, την ηθική χρήση της ΑΙ και την ανάπτυξη κατάλληλων δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού.

7.3 Θεωρητική συνεισφορά

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στη θεωρητική κατανόηση της αξιοποίησης της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων μέσω της συστηματικής σύνθεσης και της κριτικής αξιολόγησης της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Systematic Literature Review – SLR) επέτρεψε την οργανωμένη καταγραφή, ανάλυση και ερμηνεία ενός ευρέος φάσματος επιστημονικών δημοσιεύσεων, προσφέροντας μια συνολική εικόνα της υφιστάμενης γνώσης στο γνωστικό πεδίο του Construction Project Management. Η προσέγγιση αυτή καθιστά δυνατή όχι μόνο την αποτύπωση της υφιστάμενης ερευνητικής δραστηριότητας, αλλά και την κριτική αποτίμηση της εξέλιξης του επιστημονικού πεδίου.

Βασική θεωρητική συμβολή της εργασίας αποτελεί η συστηματική χαρτογράφηση των εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης στις κύριες λειτουργίες της διαχείρισης τεχνικών έργων. Μέσα από τη θεματική οργάνωση της βιβλιογραφίας αναδείχθηκαν οι σημαντικότεροι τομείς εφαρμογής, οι τεχνολογίες που αξιοποιούνται συχνότερα και οι κυρίαρχες τάσεις που διαμορφώνονται στη σύγχρονη ερευνητική δραστηριότητα. Η συγκεντρωτική αυτή παρουσίαση διευκολύνει την κατανόηση της εξέλιξης του αντικειμένου και δημιουργεί ένα οργανωμένο πλαίσιο αναφοράς για την ερμηνεία των επιμέρους ερευνητικών προσεγγίσεων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η ανάδειξη των παραγόντων που επηρεάζουν την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Η σύνθεση των διαθέσιμων ερευνητικών ευρημάτων έδειξε ότι η επιτυχής εφαρμογή των τεχνολογιών AI δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνικές δυνατότητες των αλγορίθμων, αλλά διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση τεχνολογικών, οργανωσιακών, ανθρώπινων, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων. Η πολυδιάστατη αυτή προσέγγιση εμπλουτίζει τη θεωρητική κατανόηση της διαδικασίας υιοθέτησης της Τεχνητής Νοημοσύνης και αναδεικνύει την ανάγκη αντιμετώπισής της ως μέρος ενός ευρύτερου πλαισίου ψηφιακού μετασχηματισμού.

Η κριτική ανάλυση των επιλεγμένων δημοσιεύσεων οδήγησε ακόμη στον εντοπισμό σημαντικών ερευνητικών κενών και περιοχών που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Η συγκριτική αξιολόγηση των μελετών κατέδειξε τόσο τα πεδία στα οποία η επιστημονική γνώση εμφανίζει υψηλό βαθμό ωριμότητας όσο και εκείνα στα οποία εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμένα εμπειρικά δεδομένα, μεθοδολογικές διαφοροποιήσεις ή αντικρουόμενα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία συμβάλλει στην καλύτερη οργάνωση της υπάρχουσας γνώσης και στη διαμόρφωση σαφέστερων κατευθύνσεων για τη μελλοντική επιστημονική έρευνα.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι η παρούσα εργασία προσφέρει μια επικαιροποιημένη αποτύπωση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων, ενσωματώνοντας τόσο τις καθιερωμένες εφαρμογές όσο και τις πλέον πρόσφατες εξελίξεις, όπως η Παραγωγική Τεχνητή Νοημοσύνη (Generative AI) και τα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (Large Language Models – LLMs). Η συνδυαστική παρουσίαση των τεχνολογικών εξελίξεων, των παραγόντων υιοθέτησης και των ερευνητικών τάσεων διαμορφώνει ένα συνεκτικό θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο σημείο αναφοράς για μελλοντικές μελέτες στο συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο.

7.4 Πρακτική συνεισφορά

Παρότι η παρούσα εργασία έχει θεωρητικό χαρακτήρα και βασίζεται αποκλειστικά στη μεθοδολογία της Συστηματικής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Systematic Literature Review – SLR), τα ευρήματά της παρουσιάζουν ουσιαστική πρακτική αξία για τους επαγγελματίες και τους οργανισμούς του κατασκευαστικού κλάδου που επιδιώκουν να αξιοποιήσουν τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στις διαδικασίες διαχείρισης τεχνικών έργων. Η συστηματική καταγραφή και ερμηνεία της διεθνούς βιβλιογραφίας προσφέρει ένα αξιόπιστο πλαίσιο κατανόησης των δυνατοτήτων και των περιορισμών που συνοδεύουν την εφαρμογή της AI στο Construction Project Management.

Ένα από τα σημαντικότερα πρακτικά οφέλη της εργασίας είναι η συγκεντρωτική παρουσίαση των κυριότερων εφαρμογών της Τεχνητής Νοημοσύνης, των τεχνολογιών που αξιοποιούνται συχνότερα, καθώς και των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η οργανωμένη αυτή αποτύπωση μπορεί να βοηθήσει τους επαγγελματίες του κλάδου να αποκτήσουν σαφέστερη εικόνα των διαθέσιμων τεχνολογικών λύσεων και να αξιολογήσουν με μεγαλύτερη πληρότητα τις δυνατότητες αξιοποίησής τους στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε οργανισμού ή έργου.

Ιδιαίτερη πρακτική σημασία παρουσιάζει επίσης η ανάδειξη των παραγόντων που επηρεάζουν την επιτυχή υιοθέτηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον κατασκευαστικό κλάδο. Η εργασία συγκεντρώνει και οργανώνει τα ευρήματα που σχετίζονται με τις τεχνολογικές, οργανωσιακές, ανθρώπινες, οικονομικές και κανονιστικές διαστάσεις της υιοθέτησης, παρέχοντας ένα χρήσιμο πλαίσιο αναφοράς για οργανισμούς που σχεδιάζουν ή υλοποιούν δράσεις ψηφιακού μετασχηματισμού. Η κατανόηση των παραγόντων αυτών μπορεί να συμβάλει στη λήψη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων και στον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό της μετάβασης προς την αξιοποίηση εφαρμογών AI.

Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν ακόμη από τη συγκριτική αποτίμηση των ερευνητικών ευρημάτων, καθώς αναδεικνύονται τόσο οι περιοχές στις οποίες οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης εμφανίζουν υψηλό βαθμό ωριμότητας όσο και εκείνες όπου εξακολουθούν να υπάρχουν τεχνολογικοί ή οργανωσιακοί περιορισμοί. Η πληροφορία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από στελέχη επιχειρήσεων και διαχειριστές έργων κατά την επιλογή των καταλληλότερων πεδίων εφαρμογής της AI, αλλά και κατά τον καθορισμό προτεραιοτήτων για μελλοντικές επενδύσεις σε ψηφιακές τεχνολογίες.

Επιπρόσθετα, η παρούσα εργασία μπορεί να λειτουργήσει ως χρήσιμο σημείο αναφοράς για μηχανικούς, διαχειριστές έργων, συμβούλους, στελέχη επιχειρήσεων και ερευνητές που επιθυμούν να αποκτήσουν μια τεκμηριωμένη και επικαιροποιημένη εικόνα των εξελίξεων στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης για τη διαχείριση τεχνικών έργων. Η κριτική σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας διευκολύνει την κατανόηση του γνωστικού πεδίου, ενώ παράλληλα μπορεί να υποστηρίξει τόσο την

επαγγελματική πρακτική όσο και τον σχεδιασμό νέων ερευνητικών και αναπτυξιακών πρωτοβουλιών στον χώρο του Construction Project Management.

7.5 Περιορισμοί της έρευνας

Παρά τη συστηματική μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε, η παρούσα έρευνα παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι είναι σκόπιμο να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των ευρημάτων και των συμπερασμάτων της.

Ο πρώτος περιορισμός σχετίζεται με τη φύση της ερευνητικής μεθοδολογίας που επιλέχθηκε. Η εργασία βασίζεται αποκλειστικά στη Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και, κατά συνέπεια, αξιοποιεί δευτερογενή δεδομένα που προέρχονται από ήδη δημοσιευμένες επιστημονικές μελέτες. Ως αποτέλεσμα, τα συμπεράσματα που διατυπώνονται εξαρτώνται από την ποιότητα, την πληρότητα και τη μεθοδολογική επάρκεια των επιλεγμένων δημοσιεύσεων και δεν συνοδεύονται από εμπειρική επαλήθευση μέσω συλλογής και ανάλυσης πρωτογενών δεδομένων.

Ένας ακόμη περιορισμός απορρέει από τον ιδιαίτερα δυναμικό χαρακτήρα της Τεχνητής Νοημοσύνης. Η συνεχής εμφάνιση νέων αλγορίθμων, εφαρμογών και επιστημονικών δημοσιεύσεων, ιδιαίτερα στους τομείς της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (Generative AI) και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs), σημαίνει ότι το γνωστικό πεδίο εξελίσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Είναι επομένως πιθανό, μετά την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής αναζήτησης, να έχουν δημοσιευθεί νέες μελέτες οι οποίες δεν ήταν δυνατό να συμπεριληφθούν στην παρούσα ανασκόπηση.

Επιπρόσθετα, η διαδικασία αναζήτησης επικεντρώθηκε κυρίως σε δημοσιεύσεις στην αγγλική γλώσσα και σε διεθνώς αναγνωρισμένες επιστημονικές βάσεις δεδομένων. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας των πηγών, ενδέχεται όμως να οδήγησε στον αποκλεισμό αξιόλογων δημοσιεύσεων που είναι διαθέσιμες σε άλλες γλώσσες ή φιλοξενούνται σε διαφορετικές επιστημονικές βάσεις.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν παρουσιάζουν σημαντική ετερογένεια ως προς τις τεχνολογίες που εξετάζουν, τις ερευνητικές

προσεγγίσεις που ακολουθούν, τα δεδομένα που αξιοποιούν και τους δείκτες με τους οποίους αξιολογούν τα αποτελέσματά τους. Η διαφοροποίηση αυτή περιορίσει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των επιμέρους ευρημάτων και, για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία υιοθέτησε κυρίως ποιοτική και συγκριτική προσέγγιση, χωρίς να προχωρήσει σε ποσοτική μετα-ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων.

Ένας τελευταίος περιορισμός αφορά τη διαδικασία θεματικής ταξινόμησης και σύνθεσης της βιβλιογραφίας. Παρότι εφαρμόστηκαν προκαθορισμένα κριτήρια επιλογής και ανάλυσης, ο διεπιστημονικός χαρακτήρας της Τεχνητής Νοημοσύνης και η πολυπλοκότητα των εφαρμογών της στις κατασκευές συνεπάγονται ότι ορισμένες δημοσιεύσεις θα μπορούσαν εύλογα να ενταχθούν σε περισσότερες από μία θεματικές κατηγορίες. Κατά συνέπεια, η ερμηνεία και η οργάνωση των ευρημάτων εμπεριέχουν αναπόφευκτα έναν βαθμό επιστημονικής κρίσης.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η αξιοπιστία της παρούσας έρευνας ενισχύεται από την εφαρμογή μιας συστηματικής και διαφανούς ερευνητικής διαδικασίας, τη χρήση πολλαπλών επιστημονικών βάσεων δεδομένων, την υιοθέτηση σαφώς καθορισμένων κριτηρίων επιλογής των δημοσιεύσεων και την κριτική σύνθεση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας. Μέσα από αυτή τη διαδικασία διαμορφώθηκε μια τεκμηριωμένη και συνεκτική αποτύπωση της υφιστάμενης γνώσης σχετικά με την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης στη διαχείριση τεχνικών έργων.

7.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι η έρευνα γύρω από την αξιοποίηση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) στη διαχείριση τεχνικών έργων εξελίσσεται με ιδιαίτερα γρήγορους ρυθμούς. Παρότι τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευθεί πολυάριθμες μελέτες και έχουν αναπτυχθεί νέες εφαρμογές, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά ερευνητικά κενά, τα οποία δημιουργούν πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω διερεύνηση.

Μία από τις βασικότερες προτεραιότητες της μελλοντικής έρευνας αφορά την πραγματοποίηση περισσότερων εμπειρικών μελετών σε πραγματικές συνθήκες

εφαρμογής. Σημαντικό μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας βασίζεται σε πιλοτικά έργα, προσομοιώσεις ή μελέτες περίπτωσης περιορισμένης κλίμακας. Η αξιολόγηση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης σε έργα διαφορετικού μεγέθους, πολυπλοκότητας και γεωγραφικού περιβάλλοντος θα μπορούσε να ενισχύσει σημαντικά την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την επιτυχή αξιοποίησή τους.

Εξίσου ενδιαφέρουσα προοπτική αποτελεί η διερεύνηση της συνεργασίας της Τεχνητής Νοημοσύνης με τις υπόλοιπες τεχνολογίες του Construction 4.0, όπως το Building Information Modeling (BIM), τα Digital Twins, το Internet of Things (IoT), τα Big Data και οι υπηρεσίες Cloud Computing. Αν και η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι η μεγαλύτερη προστιθέμενη αξία προκύπτει από τον συνδυασμό αυτών των τεχνολογιών, οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις εξακολουθούν να μην έχουν μελετηθεί επαρκώς.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η περαιτέρω διερεύνηση της Παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (Generative AI) και των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs). Οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο εφαρμογής στον κατασκευαστικό κλάδο, γεγονός που δημιουργεί σημαντικές δυνατότητες για μελλοντικές μελέτες σχετικά με τη διαχείριση τεχνικής τεκμηρίωσης, την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων, τη διοίκηση συμβάσεων, τη διαχείριση γνώσης και την αυτοματοποίηση διοικητικών διαδικασιών.

Δεν θα πρέπει, ωστόσο, η μελλοντική έρευνα να περιοριστεί αποκλειστικά στην τεχνολογική διάσταση. Η περαιτέρω διερεύνηση οργανωσιακών, ανθρώπινων και θεσμικών παραγόντων, όπως η ψηφιακή ωριμότητα των οργανισμών, η ανάπτυξη δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού, η διαχείριση της οργανωσιακής αλλαγής, η ποιότητα των δεδομένων, η διακυβέρνηση των πληροφοριών και οι ηθικές ή κανονιστικές απαιτήσεις, αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στην πληρέστερη κατανόηση της διαδικασίας υιοθέτησης της AI.

Χρήσιμη θα ήταν ακόμη η ανάπτυξη κοινών πλαισίων αξιολόγησης και τυποποιημένων δεικτών απόδοσης, ώστε να καταστεί ευκολότερη η σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών και αλγορίθμων στις επιμέρους λειτουργίες του Construction Project Management. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να ενισχύσει

τη συγκρισιμότητα των ερευνητικών αποτελεσμάτων και να υποστηρίζει την περαιτέρω ωρίμανση του επιστημονικού πεδίου.

Παράλληλα, ιδιαίτερη αξία παρουσιάζει η διερεύνηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της Τεχνητής Νοημοσύνης στον τρόπο οργάνωσης και διοίκησης των τεχνικών έργων. Η μελέτη της επίδρασής της στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, στη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκομένων, στη διαχείριση της οργανωσιακής γνώσης και στη συνολική λειτουργία των κατασκευαστικών οργανισμών μπορεί να προσφέρει ουσιαστικές απαντήσεις για τον μελλοντικό ρόλο των τεχνολογιών ΑΙ στον κλάδο.

Η εικόνα που προκύπτει από τη βιβλιογραφία δείχνει ότι η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί ένα από τα πλέον δυναμικά και εξελισσόμενα πεδία έρευνας στη διαχείριση τεχνικών έργων. Η περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση αναμένεται να εμπλουτίσει τη θεωρητική γνώση, αλλά και να ενισχύσει την αποτελεσματική αξιοποίηση των σχετικών τεχνολογιών στην επαγγελματική πρακτική, συμβάλλοντας στον συνεχή ψηφιακό μετασχηματισμό του κατασκευαστικού κλάδου.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O. O., & Ahmed, A. (2021). *Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges*. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>

Abishek, S., Prabakaran, P. A., Bharath, A. A., & Vaardhini, S. (2023). *Optimizing resource allocation and scheduling in construction projects using AI & optimization algorithms*. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 7(12), 1–10. <https://doi.org/10.55041/ijrem27863>

Adebayo, Y., Udoh, P., Kamudyariwa, X. B., & Osobajo, O. A. (2025). *Artificial intelligence in construction project management: A structured literature review of its evolution in application and future trends*. *Digital*, 5(3), 26. <https://doi.org/10.3390/digital5030026>

Amershi, S., Weld, D. S., Vorvoreanu, M., Fournery, A., Nushi, B., Collisson, P., Suh, J., Iqbal, S. T., Bennett, P. N., Inkpen, K., Teevan, J., Kikin-Gil, R., & Horvitz, E. (2019).

Guidelines for human-AI interaction. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1–13). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300233>

Baghalzadeh Shishehgarhaneh, M., Keivani, A., Moehler, R. C., Jelodari, N., & Roshdi Laleh, S. (2022). *Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in construction industry: A review, bibliometric, and network analysis. Buildings*, 12(10), 1503. <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>

Bello, S. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Bilal, M., Davila Delgado, J. M., Akanbi, L. A., Ajayi, A. O., & Owolabi, H. A. (2021). *Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. Automation in Construction*, 122, 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>

Berlato, M., Binni, L., Durmus, D., Gatto, C., Giusti, L., Massari, A., Toldo, B. M., Cascone, S., & Mirarchi, C. (2025). *Digital platforms for the built environment: A systematic review across sectors and scales. Buildings*, 15 (14), 2432. <https://doi.org/10.3390/buildings15142432>

Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2017, July 18). *The business of artificial intelligence. Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2017/07/the-business-of-artificial-intelligence>

Bughin, J., Seong, J., Manyika, J., Chui, M., & Joshi, R. (2018, September). *Notes from the AI frontier: Modeling the impact of AI on the world economy*. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-modeling-the-impact-of-ai-on-the-world-economy>

Chen, K., Zhou, X., Bao, Z., Skibniewski, M. J., & Fang, W. (2025). *Artificial intelligence in infrastructure construction: A critical review. Frontiers of Engineering Management*, 12(1), 24–38. <https://doi.org/10.1007/s42524-024-3128-5>

Chen, S., Zeng, Y., Majdi, A., Salameh, A. A., Alkhalifah, T., Alturise, F., & Ali, H. E. (2023). *Potential features of building information modelling for application of project management knowledge areas as advances modeling tools. Advances in Engineering Software*, 176, 103372. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103372>

Darko, A., Chan, A. P. C., Adabre, M. A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., & Ameyaw, E. E. (2020). *Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities*. *Automation in Construction*, 112, 103081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>

Davis, F. D. (1989). *Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology*. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>

Dikmen, I., Eken, G., Erol, H., & Birgonul, M. T. (2025). *Automated construction contract analysis for risk and responsibility assessment using natural language processing and machine learning*. *Computers in Industry*, 166, 104251. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104251>

Duan, Y., Edwards, J. S., & Dwivedi, Y. K. (2019). *Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data: Evolution, challenges and research agenda*. *International Journal of Information Management*, 48, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021>

Dwivedi, Y. K., Kshetri, N., Hughes, L., Slade, E. L., Jeyaraj, A., Kar, A. K., Baabdullah, A. M., Koohang, A., Raghavan, V., Ahuja, M., Albanna, H., Albashrawi, M., Al-Busaidi, A. S., Balakrishnan, J., Barlette, Y., Basu, S., Bose, I., Brooks, L., Buhalis, D., ... Wright, R. (2023). *“So what if ChatGPT wrote it?” Multidisciplinary perspectives on opportunities, challenges and implications of generative conversational AI for research, practice and policy*. *International Journal of Information Management*, 71, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642>

Ellram, L. M. (1995). *Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing*. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(8), 4–23. <https://doi.org/10.1108/09600039510099928>

Eveland, J. D. (1990). *Technological innovation as a process*. In L. G. Tornatzky & M. Fleischer (Eds.), *The processes of technological innovation* (pp. 27–50). Lexington Books.

Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., Luetge, C., Madelin, R., Pagallo, U., Rossi, F., Schafer, B., Valcke, P., & Vayena, E. (2018). *AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations*. *Minds and Machines*, 28(4), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>

Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A., & Pulido-Arcas, J. A. (2020). *Construction 4.0: A literature review*. *Sustainability*, 12(22), 9755. <https://doi.org/10.3390/su12229755>

Gunning, D., & Aha, D. W. (2019). *DARPA's explainable artificial intelligence (XAI) program*. *AI Magazine*, 40(2), 44–58. <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>

Iheme Mary Jane. (2025). *Building success: A systematic review of the importance of project management in construction*. *International Journal of Science and Research Archive*, 15(2), 1315–1319. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.15.2.1415>

Kaur, R., Mwambelele, B. J., Abraham, A. G., Basheer, S. A., & Garia, S. (2025). *A comprehensive review on building information modelling (BIM), its implementations and applications*. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 177. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00342-5>

Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (Version 2.3, EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Software Engineering Group, School of Computer Science and Mathematics, Keele University, & Department of Computer Science, Durham University. https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf

Love, P. E. D., Matthews, J., Fang, W., Porter, S., Luo, H., & Ding, L. (n.d.). *Explainable artificial intelligence in construction: The content, context, process, outcome evaluation framework* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.06561>

Mahajan, G. (2019, March). *Applications of artificial intelligence in construction management* [Conference paper]. Symbiosis School of Architecture, Urban Development and Planning, Pune, India.

Memon, S. A., Shehata, W., Rowlinson, S., & Sunindijo, R. Y. (2025). *Generative artificial intelligence in architecture, engineering, construction, and operations: A systematic review*. *Buildings*, 15(13), 2270. <https://doi.org/10.3390/buildings15132270>

Munawar, H. S., Ullah, F., Qayyum, S., & Shahzad, D. (2022). *Big data in construction: Current applications and future opportunities*. *Big Data and Cognitive Computing*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.3390/bdcc6010018>

- Mundlamuri, R., Gunnam, G. R., Mysari, N. K., & Pujuri, J. (2025). *The evolution of AI: From classical machine learning to modern large language models*. *IEEE Access*, 13, 178302–178341. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3621344>
- N, S., & P. A., P. (2023). *Review on decision making in construction project management*. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(6), 3357–3359. <https://doi.org/10.55248/gengpi.4.623.41927>
- National Institute of Standards and Technology. (2023). *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0) (NIST AI 100-1)*. U.S. Department of Commerce. <https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1>
- Obianyo, J. I., Udeala, R. C., & Alaneme, G. U. (2023). *Application of neural networks and neuro-fuzzy models in construction scheduling*. *Scientific Reports*, 13(1), Article 9138. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35445-5>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019, May 22). *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence (OECD/LEGAL/0449)*. <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). *The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews*. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pal, A., Lin, J. J., Hsieh, S. H., & Golparvar-Fard, M. (2024). *Activity-level construction progress monitoring through semantic segmentation of 3D-informed orthographic images*. *Automation in Construction*, 157, 105157. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105157>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). *Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends*. *Automation in Construction*, 122, 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), 64–88.
- Rabbi, A. B. K., & Jeelani, I. (2024). *AI integration in construction safety: Current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio based*

applications. Automation in Construction, 164, 105443.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105443>

Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R. Y. M. (2022). *Opportunities and adoption challenges of AI in the construction industry: A PRISMA review. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), 45.

<https://doi.org/10.3390/joitmc8010045>

Ronanki, R., & Nguyen, A. (2023). *Artificial intelligence for the real world. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5(7). <https://doi.org/10.56726/irjmets42512>

Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). *Construction with digital twin information systems. Data-Centric Engineering*, 1, e14.

<https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

Sacks, R., Girolami, M., & Brilakis, I. (2020). *Building information modelling, artificial intelligence and construction tech. Developments in the Built Environment*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>

Samuelson, O., & Stehn, L. (2023). *Digital transformation in construction: A review. Journal of Information Technology in Construction*, 28, 385–404.

<https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.020>

Shamim, M. M. I., Hamid, A. B. A., Nyamasvisva, T. E., & Rafi, N. S. B. (2025). *Advancement of artificial intelligence in cost estimation for project management success: A systematic review of machine learning, deep learning, regression, and hybrid models. Modelling*, 6(2), 35. <https://doi.org/10.3390/modelling6020035>

Smuha, N. A. (2025). *Regulation 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of June 13, 2024 (EU Artificial Intelligence Act). International Legal Materials*, 64(2), 283–390. <https://doi.org/10.1017/ilm.2024.46>

Snyder, H. (2019). *Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research*, 104, 333–339.

<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>

Soni, C. (2025). *Leveraging artificial intelligence for predictive and adaptive decision-making in construction project management. International Journal of Technology, Management and Humanities*, 11(4), 5–15.

<https://doi.org/10.21590/ijtmh.11.04.02>

- Taiwo, R., Bello, I. T., Abdulai, S. F., Yussif, A. M., Salami, B. A., Saka, A., Ben Seghier, M. E. A., & Zayed, T. (2025). *Generative artificial intelligence in construction: A Delphi approach, framework, and case study*. *Alexandria Engineering Journal*, 116, 672–698. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.079>
- Tian, J., Jin, Q., Wang, Y., Yang, J., Zhang, S., & Sun, D. (2024). *Performance analysis of deep learning-based object detection algorithms on COCO benchmark: A comparative study*. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00411-z>
- Tian, K., Zhu, Z., Mbachu, J., Ghanbaripour, A., & Moorhead, M. (2025). *Artificial intelligence in risk management within the realm of construction projects: A bibliometric analysis and systematic literature review*. *Journal of Innovation and Knowledge*, 10(3), 100711. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100711>
- Tornatzky, L. G., & Fleischer, M. (1990). *The processes of technological innovation*. Lexington Books.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). *Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review*. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Turner, R. (2007). *Review of the book Diffusion of innovations* (5th ed.), by E. M. Rogers. *Journal of Minimally Invasive Gynecology*, 14(6), 776. <https://doi.org/10.1016/j.jmig.2007.07.001>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2021). *Recommendation on the ethics of artificial intelligence*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). *User acceptance of information technology: Toward a unified view*. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Vial, G. (2019). *Understanding digital transformation: A review and a research agenda*. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118–144. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
- Voigt, P., & von dem Bussche, A. (2017). *The EU General Data Protection Regulation (GDPR): A practical guide* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57959-7>

Wang, T., & Chen, H. M. (2023). *Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle*. *Automation in Construction*, 150, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104832>

Zhang, C., & Lu, Y. (2021). *Study on artificial intelligence: The state of the art and future prospects*. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100224>

Zhang, D., Li, M., Tian, D., Song, L., & Shen, Y. (2022). *Intelligent text recognition based on multi-feature channels network for construction quality control*. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101669. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101669>

Zhang, L., Pan, Y., Wu, X., & Skibniewski, M. J. (2021). *Artificial intelligence in construction engineering and management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2842-9>

