



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Κατασκευή 4.0 (Construction 4.0) - Κατασκευές και 4^η Βιομηχανική Επανάσταση.»

ΝΑΤΣΙΟΣ Δ. ΙΩΑΝΝΗΣ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Α.Π.Θ.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΑΡΑΜΠΑΤΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΛΕΥΡΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ "ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ"

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΧΑΝΙΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2025



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής αποτελεί για εμένα έναν σημαντικό σταθμό τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Η πορεία μέχρι εδώ δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη συμβολή και στήριξη ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Σταυρουλάκη Γεώργιο και την επιστημονική συνεργάτιδα του Δρ. Χαραλαμπίδη Βαρβάρα, για την καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους σε όλα τα στάδια της παρούσας εργασίας. Η εμπιστοσύνη τους και η επιστημονική τους καθοδήγηση υπήρξαν καθοριστικές για την εξέλιξη της διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τους καθηγητές Αραμπατζή Γεώργιο και Αλευρά Παναγιώτη, για την αποδοχή της συμμετοχής τους, τις παρατηρήσεις και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στη μέλλουσα σύζυγό μου Χριστίνα αλλά και στους γονείς μου, για την αδιάκοπη στήριξη, την υπομονή και την πίστη τους σε εμένα.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταπτυχιακή διατριβή με τίτλο «Κατασκευή 4.0 (Construction 4.0) - Κατασκευές και 4η Βιομηχανική Επανάσταση» του Νατσιού Ιωάννη, Μηχανολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ. εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδίαση και Παραγωγή Προϊόντων» του Πολυτεχνείου Κρήτης και πραγματεύεται τον ψηφιακό μετασχηματισμό του κατασκευαστικού κλάδου μέσω της υιοθέτησης τεχνολογιών της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης.

Η εργασία ξεκινά με την εισαγωγή στην έννοια της Κατασκευής 4.0, η οποία ενσωματώνει τεχνολογίες όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το Μοντέλο Πληροφοριών Κτιρίων (BIM), τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins), η ρομποτική και η τρισδιάστατη εκτύπωση. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή στον κλάδο των κατασκευών, εστιάζοντας στην εξέλιξη των τεχνολογιών και των μεθόδων κατασκευής.

Ακολουθεί ανάλυση των κύριων οφελών της Κατασκευής 4.0, όπως η βελτίωση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας, η αύξηση της ποιότητας και της ακρίβειας, η μείωση του κόστους, η βελτίωση της ασφάλειας και η προώθηση της βιωσιμότητας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι προκλήσεις και τα εμπόδια που προκύπτουν κατά την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών, όπως η ανάγκη για εκπαίδευση, η διαχείριση μεγάλων δεδομένων και η κυβερνοασφάλεια.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις καινοτόμες τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0, με αναλυτική παρουσίαση του BIM, των UAVs/Drones, των σαρωτών λέιζερ, της επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, των αυτόνομων μηχανημάτων και των ρομποτικών κατασκευών. Περιλαμβάνονται επίσης μελέτες περίπτωσης που επιδεικνύουν την επιτυχή εφαρμογή των παραπάνω τεχνολογιών σε πραγματικά έργα. Τέλος, η εργασία καταλήγει σε συμπεράσματα σχετικά με το μέλλον της Κατασκευής 4.0 και τις προοπτικές που προσφέρει για έναν πιο αποδοτικό, ασφαλή και βιώσιμο κατασκευαστικό κλάδο.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Ορισμός και Βασικές Αρχές της Κατασκευής 4.0	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Η Έννοια της Κατασκευής 4.0.....	7
1.3 Βασικές τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0	8
Κεφάλαιο 2: Ιστορική Αναδρομή του Κλάδου των Κατασκευών	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Πρώιμες Εποχές: Προϊστορία και Αρχαιότητα	10
2.3 Μεσαίωνα: Θρησκευτικά και Οχυρωματικά Έργα.....	10
2.4 Αναγέννηση: Επιστροφή στα Κλασικά Πρότυπα και Νέες Προσεγγίσεις.....	11
2.5 Βιομηχανική Επανάσταση: Μηχανοποίηση και Νέα Υλικά	11
2.6 20ός Αιώνας: Μοντερνισμός, Λειτουργικότητα και Ψηφιακή Επανάσταση.....	12
2.7 21ος Αιώνας: Κατασκευή 4.0 και Βιώσιμη Ανάπτυξη	12
Κεφάλαιο 3: Οφέλη της Κατασκευής 4.0.	14
3.1 Εισαγωγή	14
3.2 Αυξημένη Παραγωγικότητα και Αποδοτικότητα	14
3.3 Βελτίωση της Ποιότητας και της Ακρίβειας.....	14
3.4 Βιωσιμότητα και Περιβαλλοντικά Οφέλη	15
3.5 Μείωση Κινδύνων και Αύξηση Ασφάλειας.....	15
3.6 Ενίσχυση της Συνεργασίας και της Επικοινωνίας.....	16
Κεφάλαιο 4: Οι καινοτόμες τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0.	17
4.1 BIM: Building Information Technology	17
4.2 Μη Επανδρωμένα Σκάφη (Unmanned Aerial Vehicles - UAV/Drones) & Σαρωτές Laser (Laser Scanners).....	21
4.3 Digital Twins – Ψηφιακά Δίδυμα	25
4.4 Internet of Things (IoT) – Διαδίκτυο των Πραγμάτων.....	27
4.5 Εικονική, Επαυξημένη και Μικτή Πραγματικότητα - Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Virtual, Augmented and Mixed Reality – VR, AR, MR - Extended Reality)	30
4.6 Τεχνητή Νοημοσύνη – Artificial Intelligence (AI)	32
4.7 Ρομποτικά Μηχανήματα - Αυτοματισμοί	34
4.8 Τρισδιάστατη Εκτύπωση / Προσθετική Κατασκευή	36
4.9 Lean Manufacturing.....	38



4.10 Προηγμένα υλικά.....	41
Κεφάλαιο 5: Προκλήσεις και εμπόδια.	43
5.1 Εισαγωγή	43
5.2 Τεχνολογικές Προκλήσεις και Ανάγκη για Υποδομές	43
5.3 Έλλειψη Εξειδικευμένου Ανθρώπινου Δυναμικού	43
5.4 Πολυπλοκότητα στην Ενοποίηση Συστημάτων	44
5.5 Ζητήματα Κυβερνοασφάλειας.....	44
5.6 Κόστος Υλοποίησης και Χρηματοδότηση.....	45
5.7 Ρυθμιστικά και Νομικά Εμπόδια.....	45
Κεφάλαιο 6: Μελέτες εφαρμογής.....	46
6.1 Εισαγωγή	46
6.2 Μελέτη Εφαρμογής 1: Η Χρήση Ψηφιακών Διδύμων στην Κατασκευή του Διεθνούς Αερολιμένα Heathrow, Λονδίνο	46
6.3 Μελέτη Εφαρμογής 2: Αυτοματοποιημένα Ρομποτικά Συστήματα στον Κατασκευαστικό Τομέα στη Σιγκαπούρη	47
6.4 Μελέτη Εφαρμογής 3: Εφαρμογή Ανάλυσης Δεδομένων και IoT στην Εταιρεία Kattera, Ηνωμένες Πολιτείες.....	47
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.....	49
7.1 Εισαγωγή	49
7.2 Αναβαθμισμένη Παραγωγικότητα και Αποδοτικότητα	49
7.3 Βελτιωμένη Ασφάλεια και Διαχείριση Κινδύνων	50
7.4 Ενίσχυση της Βιωσιμότητας και της Περιβαλλοντικής Υπευθυνότητας.....	50
7.5 Προκλήσεις και Αναγκαίες Προσαρμογές στο Ανθρώπινο Δυναμικό.....	51
7.6 Συμπεράσματα και Προοπτικές για το Μέλλον	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Κατασκευή 4.0 αντιπροσωπεύει μια νέα εποχή στον κατασκευαστικό τομέα, όπου η τεχνολογία διαδραματίζει κεντρικό ρόλο σε κάθε πτυχή της διαδικασίας κατασκευής. Μέσω της ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών, η Κατασκευή 4.0 επιδιώκει να βελτιώσει την αποδοτικότητα, την ποιότητα και την ασφάλεια στον τομέα των κατασκευαστικών έργων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ολοκληρωμένη διαχείριση και παρακολούθηση των έργων, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί νέες ευκαιρίες για καινοτόμες πρακτικές και προϊόντα στον κατασκευαστικό κλάδο.

Σε αυτήν τη μεταπτυχιακή εργασία, εξετάζουμε την επιρροή και τη σημασία της Κατασκευής 4.0 στον κατασκευαστικό κλάδο. Αναλύουμε τις κύριες αρχές και τεχνολογίες που ορίζουν αυτήν τη νέα εποχή, καθώς και τις επιπτώσεις τους στις διαδικασίες και τα αποτελέσματα των κατασκευαστικών έργων.

Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζουμε τις πρωτοποριακές τεχνολογίες που διαμορφώνουν την Κατασκευή 4.0, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το Μοντέλο Πληροφοριών του Κτιρίου (BIM) και άλλες. Εξετάζουμε πώς αυτές οι τεχνολογίες εφαρμόζονται στην πράξη και πώς επηρεάζουν την απόδοση, την ποιότητα και την ασφάλεια των κατασκευαστικών έργων. Επιπλέον, εξετάζουμε τις προκλήσεις που συναντά η Κατασκευή 4.0, όπως η ανάγκη για εκπαίδευση και κατάρτιση του προσωπικού, η διαχείριση των δεδομένων και η ασφάλεια της πληροφορίας, καθώς και η προσαρμογή σε νέες εργασιακές μεθόδους και δομές.

Τέλος, παρουσιάζουμε περιπτώσεις μελέτης και εφαρμογές που επιδεικνύουν την επιτυχή εφαρμογή της Κατασκευής 4.0 σε πραγματικά έργα και περιβάλλοντα. Αναδεικνύουμε τα οφέλη και τις δυνατότητες που προσφέρει αυτή η νέα προσέγγιση στην κατασκευή και διερευνούμε πιθανούς τρόπους για τη βελτίωση και την εξέλιξη του τομέα.



Κεφάλαιο 1: Ορισμός και Βασικές Αρχές της Κατασκευής 4.0

1.1 Εισαγωγή

Η Κατασκευή 4.0 αποτελεί τη νέα εποχή στην κατασκευαστική βιομηχανία, ενσωματώνοντας τεχνολογίες από την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), και η Ρομποτική, προκειμένου να αυξήσει την αποδοτικότητα, την ακρίβεια και τη βιωσιμότητα των κατασκευαστικών έργων (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Ο όρος "Κατασκευή 4.0" εμφανίζεται ως αναλογία προς τη Βιομηχανία 4.0 και περιγράφει την ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών στον κατασκευαστικό τομέα, ανοίγοντας νέες προοπτικές για την κατασκευή, τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των υποδομών (Alaloul et al., 2020).

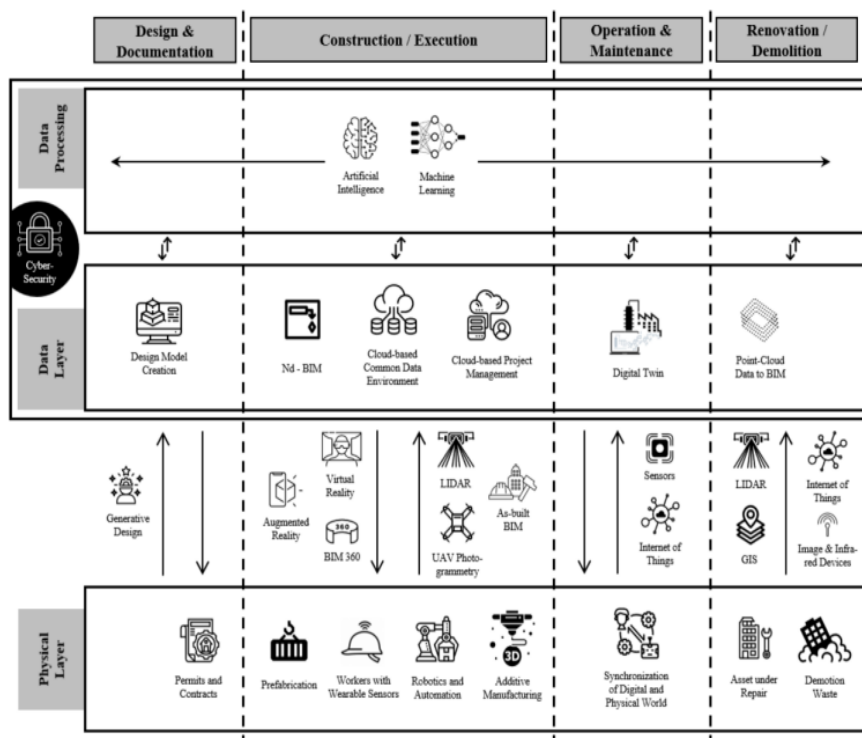
2.2 Η Έννοια της Κατασκευής 4.0

Όπως βασική ιδέα του Industry 4.0 είναι να συνδέσει τον ψηφιακό και το φυσικό κόσμο, το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της κατασκευής 4.0 (Construction 4.0). Στον κατασκευαστικό κλάδο, φυσικός κόσμος είναι το εργοτάξιο που λαμβάνει χώρα το έργο. Στόχος του Construction 4.0 είναι ο ψηφιακός μετασχηματισμός του εκάστοτε εργοταξίου, των διαδικασιών και μελλοντικά, η πλήρης αυτοματοποίησή του.

Η Κατασκευή 4.0, σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 1), διαχωρίζεται σε τέσσερα στρώματα. Πρώτον το φυσικό, δηλαδή το εργοτάξιο και τα υπόλοιπα τρία στρώματα τα οποία ανήκουν στην ψηφιακή διαδικασία της κατασκευής. Το στρώμα 1 περιλαμβάνει τα εργαλεία Κατασκευής 4.0 (Construction 4.0), που χρησιμοποιούνται πρακτικά στο εργοτάξιο, όπως για παράδειγμα τα Drones και τα Ρομποτικά Μηχήματα (Robotics). Το στρώμα 2 περιλαμβάνει τα εργαλεία αυτά που μεταδίδουν πληροφορία μεταξύ του φυσικού στρώματος 1 και του ψηφιακού στρώματος 3, όπως είναι οι Σαρωτές Λείζερ (Laser Scanners) και η Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality). Το ψηφιακό στρώμα 3 περιλαμβάνει τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για προβολή και διατήρηση δεδομένων, όπως είναι το BIM και τα Ψηφιακά Δίδυμα. Το στρώμα 4 περιλαμβάνει τα εργαλεία που αξιοποιούνται για ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων του στρώματος 4, είτε υποβοηθώντας



τον άνθρωπο είτε πλήρως αυτοματοποιημένα, όπως είναι η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence), η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) και η Αναλυτική Μεγάλων Δεδομένων (Big Data Analytics).



Εικόνα 1 Σχεδιάγραμμα κατηγοριοποίησης της Κατασκευής 4.0

Ο χάρτης αυτός μπορεί πέρα από τα στρώματα που αναλύσαμε να χωριστεί και σε 4 φάσεις, με βάση τον κύκλο ζωής του έργου. Δηλαδή την φάση 1 που είναι η μελέτη (σχεδιασμός, ο προγραμματισμός και οι προδιαγραφές του έργου), την φάση 2 που αφορά την κατασκευή, την φάση 3 που αφορά τη λειτουργία/συντήρηση του έργου και την φάση 4 η οποία περιλαμβάνει την ανακαίνιση ή κατεδάφιση του έργου.

Παρόλα αυτά δεν σημαίνει ότι η κατηγοριοποίηση αυτή αναιρεί το γεγονός ότι οι διάφορες τεχνολογίες αυτές μπορεί να έχουν εφαρμογή και σε άλλες φάσεις του κύκλου ζωής του έργου.

2.3 Βασικές τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0

Σε αντιστοιχία με τη Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0) υπάρχουν κάποιες βασικές τεχνολογίες που απαρτίζουν την Κατασκευή 4.0 (Construction 4.0). Μέσω της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, παρατηρήθηκε ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες απόψεις για το ποιες είναι οι κύριες τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0. Η παρούσα εργασία εντοπίζει οχτώ βασικές τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0 (Construction 4.0), οι οποίες και θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Οι τεχνολογίες αυτές είναι:



- BIM (Building Information Modeling)
- Μη Επανδρωμένα Σκάφη (Unmanned Aerial Vehicles - UAV/Drones) & Σαρωτές Laser (Laser Scanners)
- Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)
- Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things)
- Εικονική, Επαυξημένη και Μικτή Πραγματικότητα - Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Virtual, Augmented and Mixed Reality – VR, AR, MR - Extended Reality)
- Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)
- Ρομποτικά Μηχανήματα και Αυτοματισμοί (Robotics & Automation)
- Τρισδιάστατη Εκτύπωση/ Προσθετική Κατασκευή (3D-Printing/Additive Construction)
- Lean Manufacturing – Λιτή παραγωγή
- Προηγμένα υλικά



Κεφάλαιο 2: Ιστορική Αναδρομή του Κλάδου των Κατασκευών

2.1 Εισαγωγή

Η ιστορία του κλάδου των κατασκευών αποτελεί μια μακρά και πολυδιάστατη διαδρομή που συνδέεται στενά με την εξέλιξη των κοινωνιών και των πολιτισμών. Ο τομέας των κατασκευών έχει επηρεαστεί διαχρονικά από τεχνολογικές καινοτομίες, κοινωνικές ανάγκες και οικονομικές αλλαγές. Από τις πρώτες δομές που χρησίμευσαν για καταφύγιο του ανθρώπου έως τα σημερινά μεγαλεπήβολα έργα, η πρόοδος στον κλάδο των κατασκευών αντανακλά τις μεταβαλλόμενες ανθρώπινες ανάγκες, τις τεχνολογικές δυνατότητες και τις κοινωνικές αξίες. Κάθε εποχή έφερε νέες προσεγγίσεις και υλικά, τα οποία μετέτρεψαν ριζικά τις κατασκευαστικές πρακτικές (Kostof, 1995).

2.2 Πρώιμες Εποχές: Προϊστορία και Αρχαιότητα

Οι πρώτες κατασκευές είχαν ως στόχο την προστασία των ανθρώπων από την φύση. Οι άνθρωποι της προϊστορίας κατασκεύαζαν απλά καταφύγια από ξύλο, πέτρα και δέρματα ζώων, ενώ με την ανάπτυξη των πρώτων οργανωμένων κοινωνιών στην Εγγύς Ανατολή, την Αίγυπτο και τη Μεσοποταμία, αναπτύχθηκαν τα πρώτα μεγάλα αρχιτεκτονικά έργα, όπως ναοί και παλάτια. Σημαντικά μνημεία, όπως οι πυραμίδες της Αιγύπτου και οι ναοί της Αρχαίας Μεσοποταμίας, αντικατοπτρίζουν την αρχιτεκτονική ακρίβεια και τη θρησκευτική πίστη των κοινωνιών εκείνων (Ching, 2015).

Στην αρχαία Ελλάδα και στη Ρώμη, η κατασκευή έγινε πιο συστηματική, με την ανάπτυξη εργαλείων, υλικών και τεχνικών. Οι Έλληνες εστίασαν στην κατασκευή ναών και δημοσίων κτηρίων με καλαίσθητες αναλογίες και αρχιτεκτονικούς ρυθμούς (δωρικό, ιωνικό, κορινθιακό). Οι Ρωμαίοι προχώρησαν στην ανάπτυξη της αψίδας και του θόλου, και η χρήση του σκυροδέματος τους επέτρεψε να κατασκευάσουν εντυπωσιακά έργα, όπως το Κολοσσαίο και το Πάνθεον, θέτοντας τις βάσεις για την κατασκευαστική τεχνολογία (Vitruvius, 1960).

2.3 Μεσαίωνας: Θρησκευτικά και Οχυρωματικά Έργα

Κατά τον Μεσαίωνα, η αρχιτεκτονική επικεντρώθηκε κυρίως στα θρησκευτικά και αμυντικά έργα. Η κατασκευή καθεδρικών ναών σε όλη την Ευρώπη και η υιοθέτηση



του γοτθικού ρυθμού αποτέλεσε σημαντικό ορόσημο. Οι καθεδρικοί ναοί, όπως η Παναγία των Παρισίων στη Γαλλία και ο καθεδρικός του Μιλάνου στην Ιταλία, χαρακτηρίζονταν από οξυκόρυφες αψίδες, περίτεχνα παράθυρα με βιτρό και σκελετούς από πέτρα που μετέφεραν το βάρος προς τα θεμέλια, επιτρέποντας τη δημιουργία ψηλών, φωτεινών εσωτερικών χώρων (Wittkower, 1998).

Η ανάγκη για προστασία σε μια εποχή πολιτικής αστάθειας οδήγησε επίσης στην ανάπτυξη των κάστρων και των οχυρώσεων. Στρατιωτικές δομές όπως τα κάστρα και τα τείχη προστάτευαν τις πόλεις και τους κατοίκους από επιθέσεις. Η κατασκευή αυτών των οχυρώσεων απαιτούσε εξειδικευμένη γνώση μηχανικής και καινοτόμες στρατιωτικές αρχιτεκτονικές τεχνικές (Turnbull, 2003).

2.4 Αναγέννηση: Επιστροφή στα Κλασικά Πρότυπα και Νέες Προσεγγίσεις

Η Αναγέννηση αποτέλεσε μια περίοδο αναβίωσης της κλασικής αρχιτεκτονικής, με την υιοθέτηση των αρχών της συμμετρίας, της γεωμετρίας και των αρμονικών αναλογιών. Οι αρχιτέκτονες της εποχής εμπνεύστηκαν από τα πρότυπα της αρχαίας Ελλάδας και Ρώμης, αναπτύσσοντας νέα εργαλεία σχεδιασμού και προσαρμόζοντας τις αρχές αυτές στις ανάγκες της εποχής. Αρχιτέκτονες όπως ο Φιλίππino Μπρουνελέσκι και ο Αντρέα Παλλάντιο έφεραν καινοτομίες στον σχεδιασμό των δομών, χρησιμοποιώντας συμμετρικές αναλογίες στα κτίρια, ενώ η εφαρμογή των νέων επιστημονικών γνώσεων στα μαθηματικά και τη γεωμετρία βελτίωσε σημαντικά την κατασκευαστική ακρίβεια (Banister Fletcher, 1996).

2.5 Βιομηχανική Επανάσταση: Μηχανοποίηση και Νέα Υλικά

Η Βιομηχανική Επανάσταση έφερε ριζικές αλλαγές στον κλάδο των κατασκευών. Η εφεύρεση των μηχανών και η μαζική παραγωγή έδωσαν ώθηση στην κατασκευή νέων, πιο σύνθετων έργων. Υλικά όπως το ατσάλι και το οπλισμένο σκυρόδεμα αντικατέστησαν το ξύλο και την πέτρα σε πολλές κατασκευές, επιτρέποντας τη δημιουργία ψηλότερων και μεγαλύτερων δομών, όπως οι γέφυρες και οι σιδηροδρομικοί σταθμοί (Berman, 1988).

Ο Πύργος του Άιφελ, για παράδειγμα, αποτελεί ένα πρωτοποριακό έργο εκείνης της εποχής, καθώς κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου από σίδηρο και σηματοδότησε τη χρήση μεταλλικών κατασκευών για την οικοδόμηση ψηλών κτιρίων. Η βιομηχανική επανάσταση επίσης οδήγησε στην ανάπτυξη των πόλεων και στη δημιουργία αστικών



υποδομών, όπως δρόμοι, σιδηρόδρομοι και αποχετεύσεις, διευκολύνοντας την αστική ανάπτυξη και βελτιώνοντας τις συνθήκες διαβίωσης (Hobsbawm, 1999).

2.6 20ός Αιώνας: Μοντερνισμός, Λειτουργικότητα και Ψηφιακή Επανάσταση

Ο 20ός αιώνας χαρακτηρίστηκε από την εμφάνιση του Μοντερνισμού, ενός κινήματος που υποστήριξε την απλότητα και τη λειτουργικότητα των κατασκευών. Οι αρχιτέκτονες απομακρύνθηκαν από τις διακοσμητικές λεπτομέρειες και επικεντρώθηκαν στη χρήση νέων υλικών, όπως το σκυρόδεμα, το γυαλί και το αλουμίνιο. Παραδείγματα όπως το Bauhaus στη Γερμανία και το Seagram Building στη Νέα Υόρκη αντιπροσωπεύουν το στυλ αυτό, το οποίο επικεντρώθηκε στην απλότητα των μορφών και την αποφυγή διακοσμητικών στοιχείων (Curtis, 1996).

Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, η ανάπτυξη του λογισμικού CAD (Computer-Aided Design) έφερε επανάσταση στον σχεδιασμό και την κατασκευή. Η εισαγωγή των υπολογιστών στα αρχιτεκτονικά γραφεία επέτρεψε την ακριβή αναπαράσταση των σχεδίων και τη βελτίωση της προσομοίωσης των έργων. Επιπλέον, οι κατασκευαστικές εταιρείες άρχισαν να χρησιμοποιούν το Building Information Modeling (BIM), το οποίο επέτρεψε την καλύτερη διαχείριση των έργων και τον εντοπισμό προβλημάτων προτού αρχίσει η φυσική κατασκευή (Kalay, 2004).

2.7 21ος Αιώνας: Κατασκευή 4.0 και Βιώσιμη Ανάπτυξη

Στον 21ο αιώνα, ο κλάδος των κατασκευών εισήλθε σε μια νέα εποχή ψηφιοποίησης, η οποία συχνά αναφέρεται ως Κατασκευή 4.0. Αυτή η νέα εποχή χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η ρομποτική, η 3D εκτύπωση και η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) στα εργοτάξια (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Αυτές οι τεχνολογίες ενισχύουν την αποδοτικότητα, τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια των κατασκευαστικών έργων.

Παράλληλα, η βιωσιμότητα έχει αναδειχθεί ως σημαντικό ζητούμενο για τον κλάδο, με αυξημένη έμφαση στην ανάπτυξη πράσινων τεχνολογιών και φιλικών προς το περιβάλλον υλικών. Τα σύγχρονα έργα προσπαθούν να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα μέσω της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών, της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι έννοιες των έξυπνων πόλεων και της βιώσιμης ανάπτυξης επαναπροσδιορίζουν τον



ρόλο της κατασκευής στον σύγχρονο κόσμο, ενθαρρύνοντας την αειφορία και την ανθεκτικότητα των έργων (Alaloul et al., 2020).



Κεφάλαιο 3: Οφέλη της Κατασκευής 4.0

3.1 Εισαγωγή

Η Κατασκευή 4.0, ως όρος εμπνευσμένος από τη Βιομηχανία 4.0, αναφέρεται στη χρήση τεχνολογιών αιχμής, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η 3D εκτύπωση, η ρομποτική και το υπολογιστικό νέφος (cloud computing) στον κατασκευαστικό τομέα. Η τεχνολογία αυτή οδηγεί σε μια νέα εποχή ψηφιοποιημένης και συνδεδεμένης κατασκευής, με σημαντικά οφέλη για τις επιχειρήσεις, την αποδοτικότητα, την ποιότητα και τη βιωσιμότητα των κατασκευαστικών έργων. Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζονται τα βασικά οφέλη της Κατασκευής 4.0, με παραδείγματα και επιστημονικές αναφορές.

3.2 Αυξημένη Παραγωγικότητα και Αποδοτικότητα

Η Κατασκευή 4.0 οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας μέσω της αυτοματοποίησης των διαδικασιών και της μείωσης του χρόνου και κόστους των έργων. Η χρήση ρομποτικής και αυτοματοποιημένων μηχανών σε εργοτάξια και γραμμές παραγωγής εξαλείφει τις χρονοβόρες εργασίες και μειώνει τα ανθρώπινα λάθη. Σύμφωνα με τους Sacks et al. (2018), η αυτοματοποίηση των κατασκευαστικών εργασιών μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα έως και κατά 30%, κυρίως μέσω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα drones για επιθεώρηση και παρακολούθηση έργων.

Η αυξημένη αποδοτικότητα προκύπτει επίσης από την ικανότητα των εργατών να παρακολουθούν και να προσαρμόζουν τις διαδικασίες σε πραγματικό χρόνο. Ο καταιγισμός των δεδομένων (big data) από αισθητήρες IoT επιτρέπει στους υπευθύνους να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει ακριβών και έγκαιρων πληροφοριών, όπως δείχνουν έρευνες των Akhilesh et al. (2020).

3.3 Βελτίωση της Ποιότητας και της Ακρίβειας

Η Κατασκευή 4.0 επιτρέπει την κατασκευή υψηλής ακρίβειας και ποιότητας μέσω της χρήσης προηγμένων τεχνικών, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση και τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins). Η τρισδιάστατη εκτύπωση συμβάλλει στη δημιουργία



εξαρτημάτων με ακρίβεια μικρομέτρων, ενώ τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν την εξομίωση και τη δοκιμή μοντέλων σε εικονικό περιβάλλον πριν την υλοποίησή τους στον φυσικό κόσμο. Σύμφωνα με τον Wang et al. (2019), η χρήση ψηφιακών διδύμων μειώνει τα ελαττώματα των κατασκευαστικών προϊόντων έως και 25%, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας.

Η ακριβής κατασκευή είναι κρίσιμη, ιδίως σε κλάδους όπως η αεροδιαστημική και η βιοϊατρική, όπου η παραμικρή απόκλιση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα. Οι υψηλότερες ποιοτικές προδιαγραφές είναι συχνά απαραίτητες για την εξασφάλιση μακροχρόνιας αξιοπιστίας των έργων και υποδομών.

3.4 Βιωσιμότητα και Περιβαλλοντικά Οφέλη

Η Κατασκευή 4.0 προωθεί τη βιωσιμότητα μέσω της ελαχιστοποίησης των αποβλήτων και της βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Με τη χρήση τεχνολογιών, όπως το ΑΙ για τον βέλτιστο σχεδιασμό υλικών και την ανακύκλωση υλικών, μειώνεται η κατανάλωση φυσικών πόρων. Η κατασκευή με ελάχιστη σπατάλη και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης υλικών μέσω της χρήσης τεχνικών όπως το Building Information Modeling (BIM), συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Zhang et al., 2020).

Παράλληλα, η χρήση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων και αισθητήρων IoT βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα εργοτάξια, ενώ αυξάνει τη δυνατότητα παρακολούθησης της κατανάλωσης των υλικών και της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (Gbadamosi et al., 2021). Έτσι, οι κατασκευαστικές εταιρείες μπορούν να ακολουθούν πιο φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές, βελτιώνοντας ταυτόχρονα τη φήμη τους.

3.5 Μείωση Κινδύνων και Αύξηση Ασφάλειας

Η ψηφιοποίηση και η χρήση τεχνολογιών, όπως τα ψηφιακά δίδυμα και τα wearables, επιτρέπουν την πρόβλεψη και μείωση των κινδύνων στο εργοτάξιο. Τα συστήματα ανάλυσης δεδομένων σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες ρομποτικής μειώνουν την ανάγκη για εργαζομένους να εκτίθενται σε επικίνδυνες εργασίες, ενώ τα wearables παρέχουν ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο για πιθανούς κινδύνους (Li et al., 2019).

Οι αισθητήρες IoT επιτρέπουν επίσης την παρακολούθηση κρίσιμων δομών και εξοπλισμού, ώστε να προλαμβάνονται βλάβες και να αποτρέπονται ατυχήματα. Αυτό



όχι μόνο ενισχύει την ασφάλεια, αλλά και μειώνει το κόστος επισκευών και συντήρησης, όπως καταδεικνύουν οι ερευνητικές μελέτες των Marconi et al. (2021).

3.6 Ενίσχυση της Συνεργασίας και της Επικοινωνίας

Η Κατασκευή 4.0 επιτρέπει την ενισχυμένη συνεργασία και επικοινωνία ανάμεσα στις ομάδες μέσω της χρήσης ψηφιακών πλατφορμών και λογισμικών διαχείρισης έργων. Η χρήση συστημάτων διαχείρισης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει τη διαφάνεια, και οι διαφορετικές ομάδες μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση σε πληροφορίες που απαιτούνται για τη λήψη αποφάσεων. Η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο εντός εργοταξίων και με απομακρυσμένες ομάδες επιταχύνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, ενώ μειώνει τους κινδύνους από παρερμηνείες ή καθυστερήσεις.

Επιπλέον, η συνεργασία σε cloud-based συστήματα επιτρέπει στους μηχανικούς και τους αρχιτέκτονες να εργάζονται πάνω σε κοινά έργα, διευκολύνοντας τις αλλαγές και τις ενημερώσεις. Οι Zhang et al. (2022) δείχνουν ότι τέτοιες τεχνολογίες βελτιώνουν τη συνεργασία κατά 40%, εξασφαλίζοντας καλύτερη διαχείριση πόρων και χρόνου.

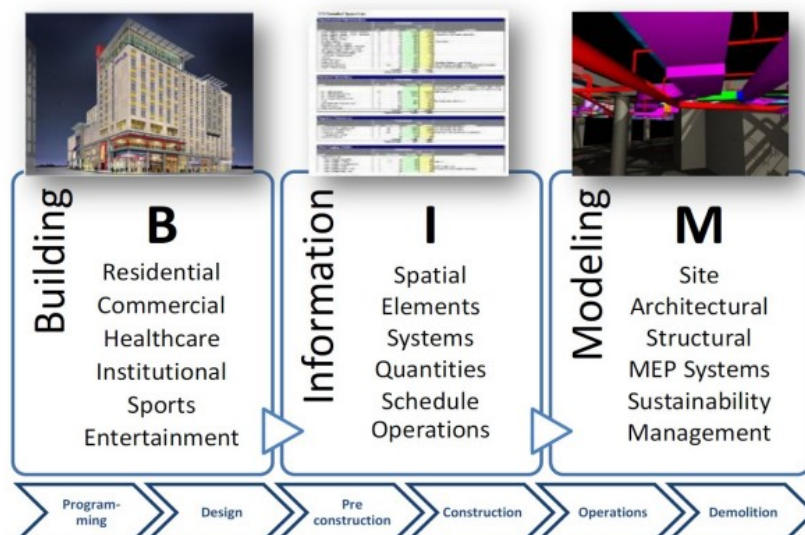


Κεφάλαιο 4: Οι καινοτόμες τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0

4.1 BIM: Building Information Technology

Το BIM είναι μια έννοια η οποία ξεκίνησε από το 1975. Από τότε, ο ορισμός του έχει αλλάξει πολλές φορές καθώς αυτό εξελίσσεται. Ο τελευταίος όμως ορισμός, το 2013, επεξηγεί πως το BIM είναι ένα σύνολο ψηφιακών εργαλείων που υποστηρίζουν τον τομέα Αρχιτεκτονικής-Μηχανικής-Κατασκευών, (AEC Industry- Architecture Engineering Construction) στον σχεδιασμό, τον προγραμματισμό, την κατασκευή και την λειτουργία του εργοταξίου. Το BIM έχει ορισθεί επίσημα από το Εθνικό Πρότυπο των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, ως «μια ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός εργοταξίου» (Stephen A. Jones et al., 2013).

Από τεχνικής απόψεως, αποτελεί ένα σύνολο τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων που περιέχουν τα στοιχεία της κατασκευής αλλά και πληροφορίες όσον αφορά τη μελέτη (σχεδιασμό & προγραμματισμό), την κατασκευή, την λειτουργία και την κατεδάφιση/ανακατασκευή του έργου. Δηλαδή, δεν είναι απλά ένα τρισδιάστατο σχέδιο CAD. Ένα σχέδιο CAD είναι μια τρισδιάστατη αναπαράσταση με χρήση όμως απλά γραμμών, σχημάτων και εξωθήσεων (extrusions). Το BIM από την άλλη, είναι ένα σχέδιο που περιλαμβάνει πραγματικά στοιχεία της κατασκευής, με συγκεκριμένες πληροφορίες για το κάθε μοντέλο προϊόντος που έχει χρησιμοποιηθεί και τα χαρακτηριστικά του. Αυτό είναι και το βασικό στοιχείο διαφοροποίησης και μοναδικότητας του εργαλείου BIM. Δηλαδή ενσωματώνει στο σχέδιο, το πραγματικό εξάρτημα, το κόστος και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του. Παραδείγματος χάριν ένα καλώδιο που θα υπάρχει στο σχέδιο, ένας διακόπτης, ένας πυρανιχνευτής, όλα θα συνοδεύονται στο BIM με στοιχεία του ακριβούς μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί (ή χρησιμοποιείται), τα χαρακτηριστικά του, την τιμή του, τον προμηθευτή κ.α. Το BIM λοιπόν είναι ένα ψηφιακό εργαλείο που εμπλέκεται σε ένα έργο από τη φάση του σχεδιασμού/μελέτης, της κατασκευής, της λειτουργίας/συντήρησης και φτάνει μέχρι και την κατεδάφιση, καλύπτοντας πλήρως τον κύκλο ζωής του.



Εικόνα 2 Σχηματική περιγραφή του BIM.

Η διαδικασία της συμμετοχής του BIM σε κάθε φάση του κύκλου ζωής ενός έργου, συνδέεται και με ένα άλλο όρο του BIM που χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό τομέα και είναι το επίπεδο ανάπτυξης ή λεπτομέρειας του BIM (Level of Development or Level of Detail), συμβολιζόμενο με LOD. Το LOD προσδιορίζει το βαθμό λεπτομέρειας και εξέλιξης που έχει το BIM σε κάθε φάση του κύκλου ζωής ενός έργου. Συγκεκριμένα όπως έχει συμφωνηθεί από τους φορείς «The American Institute of Architects (AIA)» και «the Associated General Contractors of America (AGC)», υπάρχουν 6 επίπεδα ανάπτυξης (BIMForum, 2021), που έχουν ως εξής:

- LOD 100: Αρχική σύλληψη του έργου - δεν υπάρχουν λεπτομέρειες πέρα από το βασικό σχήμα και διαστάσεις της κατασκευής.
- LOD 200: Αρχικός σχεδιασμός – το μοντέλο γίνεται πιο συγκεκριμένο με προσεγγιστικές διαστάσεις, σχήματα και θέσεις, βοηθητικό για χωροταξική οργάνωση.
- LOD 300: Λεπτομερής σχεδιασμός – εδώ το μοντέλο πλέον είναι πλήρως ορισμένο από άποψη ακριβών διαστάσεων, σχημάτων και συγκεκριμένων εξαρτημάτων. Χρησιμοποιείται για την έκδοση συνοδευτικών εγγράφων του έργου.
- LOD 350: Έγγραφο Έργου – το μοντέλο συνοδεύεται με λεπτομερειακά συναρμολογήματα και πληροφορίες για την κατασκευή.
- LOD 400: Κατασκευαστικό Μοντέλο – αυτή είναι η φάση στην οποία το σχέδιο είναι τόσο λεπτομερειακά ορισμένο, με συναρμολογήματα και σχέσεις μεταξύ στοιχείων, που είναι έτοιμο προς κατασκευή.
- LOD 500: Το ως έχει μοντέλο – το σχέδιο που περιέχει την ακριβή και πραγματική κατασκευή με όλα τα στοιχεία της που είναι απαραίτητα από την διαχείριση της



κατασκευής μέχρι και την λειτουργία και την συντήρηση του.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του BIM είναι ότι μπορεί να συνεργάζεται με πολλές τεχνολογίες του Construction 4.0, όπως τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins), η Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality), τους Σαρωτές Λέιζερ (Laser Scanners) και άλλες. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης και των υπόλοιπων εργαλείων, με βάση το BIM, διότι είναι η βασικότερη και σημαντικότερη τεχνολογία του Construction 4.0 πάνω στην οποία βασίζεται και η ανάπτυξη των υπολοίπων. Η μεγάλη αξία λοιπόν του BIM δεν είναι οι ίδιες οι εφαρμογές του, αλλά το ότι αποτελεί τη βάση ώστε να «χτιστούν» πάνω σε αυτό αμέτρητες εφαρμογές των τεχνολογιών της Κατασκευής 4.0 μεγιστοποιώντας τα οφέλη του. Το BIM είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται και στα 4 στάδια του κύκλου ζωής ενός έργου, κατά την φάση του σχεδιασμού/μελέτης, της κατασκευής, της συντήρησης και λειτουργίας αλλά και στην κατεδάφιση/ανακατασκευή ενός έργου. Οι βασικές του εφαρμογές περιλαμβάνονται στις λεγόμενες διαστάσεις του BIM (Grace Ellis, 2023). Στην πραγματικότητα το BIM έχει n-D διαστάσεις και έχει τη δυνατότητα προσθήκης ανεξάντλητου αριθμού παραμέτρων αναλόγως την περίπτωση αλλά και τους στόχους του κατασκευαστή/μελετητή.



Εικόνα 3 Οι 7 διαστάσεις του BIM.



Οι εφαρμογές κατά την φάση της μελέτης: Είναι γνωστό ότι η 3^η διάσταση του BIM αφορά την τρισδιάστατη σχεδιαστική αποτύπωση του έργου με ακριβείς διαστάσεις, μορφολογίες και συνδέσεις αλλά και τα στοιχεία που το αποτελούν. Η 4^η διάσταση αφορά την προσθήκη του χρονικού προγραμματισμού. Εισάγεται στο BIM το μοντέλο των διεργασιών που πρέπει να γίνουν, η χρονική διάρκεια και οι αλληλουχίες μεταξύ τους. Έτσι, γίνεται δυνατή η εκτέλεση προσομοίωσης της φάσης της κατασκευής και άρα μπορούν να εντοπιστούν πιθανές δυναμικές συγκρούσεις και να προληφθούν πριν καν ξεκινήσει το έργο. Γίνεται λοιπόν αποφυγή του trial-and-error και επομένως εξοικονόμηση κόστους αλλά και χρόνου. Επίσης με το 4D-BIM, μπορεί να προγραμματιστεί καλύτερα η προμήθεια υλικών και η αναγνώριση και διαχείριση κινδύνων.

Εφαρμογές κατά την φάση της κατασκευής: Η 5^η διάσταση αφορά την προσθήκη του κόστους στο BIM. Προστίθενται δηλαδή στοιχεία κοστολόγησης διεργασιών και υλικών στο BIM με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει εκτίμηση του κόστους πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Παράλληλα σε συνδυασμό με το χρονικό προγραμματισμό μπορεί να γίνει και πολύ καλύτερη διαχείριση των χρηματικών ροών. Η 7^η διάσταση αφορά την ενεργειακή διαχείριση και βιωσιμότητα κατά την φάση της κατασκευής του έργου που με τη χρήση του προγραμματισμού μπορεί να γίνει από νωρίς πρόβλεψη και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της κατασκευής με βελτιστοποίηση μεταφορών, διαδικασιών και καθυστερήσεων. Η 8^η διάσταση εισάγει το κομμάτι της υγείας και της ασφάλειας στο εργοτάξιο. Με τη χρήση του BIM σε συνδυασμό με τεχνολογίες εκτεταμένης πραγματικότητας, του διαδικτύου των πραγμάτων και της τεχνητής νοημοσύνης, που έχουν θα αναλυθούν εκτενέστερα σε επόμενα κεφάλαια, πραγματοποιείται καλύτερη εκπαίδευση των εργατοτεχνιτών, πρόβλεψη πιθανών ατυχημάτων, καλύτερη επίβλεψη του εργοταξίου. Το BIM επομένως θεωρείται και ένα εργαλείο διοίκησης εργοταξίου. Συγκεντρώνει όλα τα σχέδια, τις πληροφορίες, τα χρονοδιαγράμματα και την τρέχουσα κατάσταση του εργοταξίου, δίνοντας στον Διευθυντή Έργου μια ολιστική εικόνα της εξέλιξης και τον έλεγχο αυτής. Παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα συνεργασίας και επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων τμημάτων, για τη βέλτιστη διεκπεραίωση του έργου.

Εφαρμογές κατά την φάση της λειτουργίας/συντήρησης: Οι εφαρμογές αυτές σχετίζονται με την 6^η διάσταση του BIM. Το BIM δίνει με μεγάλη ευκολία στον αποδέκτη του έργου, όλες τις πληροφορίες αυτές που χρειάζεται για την διαχείρισή του. Διαστάσεις, χωροταξία και εξαρτήματα, όλα σε ηλεκτρονική μορφή. Έτσι, είναι



πολύ αποδοτικότερη η συντήρηση του εξοπλισμού, αφού είναι γνωστό ακριβώς το μοντέλο, το ιστορικό συντηρήσεων, η ημερομηνία τοποθέτησης κ.α. Παράλληλα το BIM επιτρέπει την διαχείριση χώρου, των μετακινήσεων και των εκτάκτων συμβάντων που θα τύχουν στη φάση της λειτουργίας του.

Μέσω του BIM, μπορεί επίσης να διευκολυνθεί μελλοντική ανακατασκευή ή/και ανακαίνιση του κτιρίου. Τα δεδομένα που υπάρχουν στο BIM αποτελούν τη βάση και τον οδηγό για μελλοντικές αλλαγές και αναβαθμίσεις. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα κατάστρωσης σχεδίων ασφαλείας και πρόβλεψης ατυχημάτων του κτιρίου, μέτρηση θορύβου, σκόνης και δονήσεων κατά την φάση κατεδάφισης/ανακατασκευής ή και εργασιών συντήρησης. Τέλος, αποτελεί οδηγό επίσης και στην περίπτωση κατεδάφισης του κτιρίου, με τις πληροφορίες και το ιστορικό που διαθέτει για αυτό.

4.2 Μη Επανδρωμένα Σκάφη (Unmanned Aerial Vehicles - UAV/Drones) & Σαρωτές Laser (Laser Scanners)

Τα Μη Επανδρωμένα Σκάφη, (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs), ή απλώς Drones, είναι τα ιπτάμενα σκάφη τα οποία αρχικά δημιουργήθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς. Τα σκάφη αυτά μπορούν να πετούν είτε με τηλεχειρισμό, είτε με συνδυασμό τηλεχειρισμού και κάποιων αυτοματοποιήσεων, είτε πλήρως αυτόνομα. Είναι μια ευρέως γνωστή τεχνολογία, αναπτυγμένη πολύ τα τελευταία χρόνια σε διάφορους τομείς (Zhou & Gheisari, 2018). Στον κατασκευαστικό τομέα μπορούν να εφαρμοστούν πολλαπλά, καθώς πέραν του ότι είναι εξοπλισμένα με κάμερες, υπάρχει δυνατότητα εξοπλισής τους με πληθώρα αισθητήρων αλλά και εργαλείων για εξυπηρέτηση των ανάλογων αναγκών. Μπορούν να εξοπλιστούν με GPS, LiDAR αισθητήρες, αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, αισθητήρες θερμικής απεικόνισης (θερμοκάμερες) και άλλους (Greenwood, et al., 2019). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα συνδυασμού της τεχνολογίας των Drones με αυτή των σαρωτών λέιζερ, όπου γίνεται εξόπλιση του Drone με αισθητήρες λέιζερ για εφαρμογές που θα αναλυθούν παρακάτω. Όλοι αυτοί οι αισθητήρες βοηθούν τα drones να συλλέξουν πολλά και πολύ σημαντικά δεδομένα για το εργοτάξιο, τα οποία μπορούν αργότερα να επεξεργαστούν από ειδικά λογισμικά και να αποδώσουν μεγάλης αξίας πληροφορίες και συμπεράσματα για το εργοτάξιο και τη διεύθυνση του έργου. (Siebert & Teizer, 2014).

Οι Σαρωτές Λέιζερ (Laser Scanners), είναι συσκευές που μετρούν αποστάσεις επιφανειών από στο οπτικό εύρος του αισθητήρα, οι οποίες μετά μπορούν να μετατραπούν σε ένα σύνολο σημείων σε τρισδιάστατο χώρο, γνωστό ως «σύννεφο σημείων» (point cloud), με ακρίβεια εκατοστών ή και χιλιοστών αναλόγως την ποιότητα



της συσκευής, την απόσταση και τις επιφάνειες που μετρούνται. Για να γίνει μία πλήρης σάρωση (scan) ενός έργου, η συσκευή απαιτείται να τοποθετηθεί σε διάφορα σημεία του εργοταξίου. Ύστερα γίνεται μια επαλληλία των σημείων του σύννεφου με βάση ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων – διαδικασία γνωστή και ως «καταχώρηση» (registration) - και έτσι προκύπτει η τελική ολοκληρωμένη σάρωση (Xiong, et al., 2013). Το «σύννεφο σημείων» είναι στην πραγματικότητα μια τρισδιάστατη αναπαράσταση του πραγματικού μοντέλου εκείνη τη στιγμή, οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτό πόσες δυνατότητες μπορεί να ανοίξει αυτό σε συνεργασία με άλλες τεχνολογίες που έχουν αναλυθεί, όπως το BIM και τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins).

Εφαρμογές κατά την φάση της μελέτης: Τα drones εξοπλισμένα με ειδικές κάμερες μπορούν να συλλέξουν φωτογραφικά δεδομένα πολύ χρήσιμα για την αξιολόγησή και την μελέτη πριν την έναρξη της κατασκευής, όπως αναφορές για το έδαφος, το εμβαδόν και άλλες διαστάσεις. Μπορεί να γίνει επίσης χαρτογράφηση και τοπογραφική αποτύπωση. Επίσης είναι δυνατή η αποτύπωση υπάρχοντος έργου (σε οποιαδήποτε σημείο προόδου του) με σκοπό την ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων, την διάγνωση σφαλμάτων και την παρακολούθηση προόδου (Siebert & Teizer, 2014). Πέρα από την απλή τοπογραφική μελέτη υπάρχει και η δυνατότητα εξοπλισμού των drone με ειδικά ραντάρ που διεισδύουν στο έδαφος (GPR- Ground Penetrating Radars) και μπορούν να δώσουν χρήσιμα δεδομένα για το υπέδαφος (Greenwood, et al., 2019).

Εφαρμογές κατά την φάση της κατασκευής: Η αποδοτικότερη παρακολούθηση προόδου του έργου με χρήση Σαρωτών Λείζερ (Laser Scanners), σε συνδυασμό με το BIM, είναι μια πολύ σημαντική εφαρμογή. Αρχικά γίνεται σάρωση του εργοταξίου με λέιζερ (laser scan) και όπως εξηγήθηκε προκύπτει το σύννεφο σημείων ως ένα τρισδιάστατο μοντέλο του έργου στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή (as-built). Αυτό το (as-built) τρισδιάστατο σχέδιο μπορεί μετά να συγκριθεί με το 4D-BIM (δηλαδή το BIM με ενσωματωμένο τον χρονικό προγραμματισμό) της εκάστοτε χρονικής στιγμής και έτσι ο Διευθυντής Έργου να αποφανθεί για την πρόοδο του έργου. Ταυτόχρονα, μπορεί το σαρωμένο σχέδιο να βοηθήσει στην ενημέρωση του υπάρχοντος BIM και να διορθώσει επικαλύψεις και άλλα λάθη, με αυτόματο τρόπο, αρκεί ο χειριστής να τοποθετήσει στο σύστημα 3 κοινά σημεία των δύο σχεδίων, ούτως ώστε να γίνει σωστά η παράθεση (Turkan, et al., 2012).

Επιπλέον, τα drones δίνουν τη δυνατότητα αποδοτικότερης και υψηλότερων προτύπων επιθεώρησης του εργοταξίου. Γίνεται διαχείριση ποιότητας του έργου με αναγνώριση κατασκευαστικών σφαλμάτων, παραλήψεων, χαμηλής ποιότητας εργασιών, καθυστερήσεων, λανθασμένων επιλογών υλικών. Επίσης γίνεται χρονική



παρακολούθηση κάθε σταδίου του έργου με βιντεοσκόπηση όλων των σημείων του εργοταξίου και από όλες τις οπτικές γωνίες. Όλα αυτά φυσικά, ο Διευθυντής Έργου τα ελέγχει με παράλληλη χρήση του BIM (Li & Liu, 2018). Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν να διεξαχθούν έλεγχοι τήρησης προτύπων ασφάλειας, σωστού χειρισμού μηχανημάτων σε όλο το εργοτάξιο με τηλεχειριζόμενη πτήση drone. Υπάρχουν και πιο προχωρημένες δυνατότητες, όπως η αυτόματη πτήση του drone, η αναγνώριση φωνής και ατόμων και η επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης (Greenwood, et al., 2019). Υπάρχει επίσης η δυνατότητα προμήθειας υλικών μέσω drone και άμεση παράδοσή τους στο εργοτάξιο. Τέλος, είναι δυνατή η παρακολούθηση μεταφοράς εξοπλισμού με χρήση drone με κάμερες, GPS και RFID αισθητήρες (Li & Liu, 2018).

Εφαρμογές κατά τη φάση της λειτουργίας/συντήρησης. Η επιθεώρηση και αξιολόγηση της κατάστασης των έργων, είναι η πιο συχνή εφαρμογή των drones. Γίνεται χρήση τους με απλές και με θερμικές κάμερες με σκοπό την αξιολόγηση της κατάστασης των κτιρίων σε δύσβατες περιοχές ή σε δύσκολα προσεγγίσιμα σημεία όπως σε μεγάλες γέφυρες και ψηλά κτίρια. Παράλληλα είναι σημαντική η επιθεώρηση μακριών ηλεκτρικών καλωδιώσεων και δρόμων, κάτι που θα ήταν δύσκολο με άλλα μέσα. Η εργασία αυτή εκτελείται εύκολα, γρήγορα, αποδοτικά, με ασφάλεια και με μικρό κόστος (Zhou & Gheisari, 2018). Οι επιθεωρήσεις αυτές είναι πολύ σημαντικές για αναγνώριση βλαβών και επιδιόρθωση έργων αλλά και διατήρηση της ποιότητάς του σε υψηλά πρότυπα.

Εφαρμογές κατά τη φάση της κατεδάφισης/ανακατασκευής: Η σάρωση προς σχέδιο BIM (scan-to-BIM), είναι η διαδικασία κατά την οποία το λείζερ σαρώνει εσωτερικά και εξωτερικά ένα κτίριο και δημιουργεί το νέφος σημείων, δηλαδή ένα πλήρες τρισδιάστατο σχέδιο που περιέχει τοίχους, ταβάνια, παράθυρα, κολόνες. Περιέχει τα περισσότερα δομικά στοιχεία αλλά όχι τα χρώματα, το είδος των επιφανειών, τα υλικά. Αυτά είναι στοιχεία που απαιτούν περαιτέρω εργαλεία όπως όραση υπολογιστών (computer vision) και Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) για να περαστούν αυτόματα. Παρότι η σάρωση σε BIM γίνεται από τον σαρωτή αυτόματα, απαιτείται και το φιλτράρισμα από χειριστή διότι το σύστημα δεν είναι αλάνθαστο (Xiong, et al., 2013). Η εφαρμογή σάρωσης προς σχέδιο BIM (scan-to-BIM) μπορεί να αξιοποιηθεί σε ανακαίνιση υπάρχοντος κτιρίου για το οποίο δεν υπάρχουν σχέδια και για συντήρηση/επιδιόρθωση. Επίσης αξιοποιείται και για την ψηφιοποίησή του για λόγους ύπαρξης ιστορικού, για την καλύτερη μετέπειτα λειτουργία/συντήρησή του και πιθανώς μετατροπή του σε έξυπνο κτίριο (smart building). Επιπροσθέτως, τα drone αξιοποιούνται στη διαχείριση αποβλήτων και στη βιντεοσκόπηση και παρακολούθηση



της διαδικασίας κατεδάφισης υψηλών – και όχι μόνο κτιρίων (Li & Liu, 2018). Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των UAVs είναι τα εξής:

- Ευκολία στον χειρισμό μέσω των εξελιγμένων αυτοματισμών που παρέχουν
- Άμεση πρόσβαση σε γεωχωρικά δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης όπως έγχρωμες, πολυφασματικές, υπερφασματικές και υπέρυθρες ψηφιακές λήψεις
- Γρήγορη κάλυψη περιοχών σχετικά περιορισμένης έκτασης .
- Χρήση σε καταστάσεις υψηλού κινδύνου (π.χ. πυρκαγιά), χωρίς να τίθεται κίνδυνος ανθρώπινων ζωών
- Χρήση σε δυσπρόσιτες περιοχές σε χαμηλό ύψος πτήσης, όπου τα επανδρωμένα αεροσκάφη αδυνατούν να επιχειρήσουν
- Δεν επηρεάζονται από την νεφοκάλυψη
- Χαμηλό κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας σε σχέση με τα επανδρωμένα αεροσκάφη (έξοδα αμοιβής πιλότων, δέσμευση αεροδρομίου, κόστος καυσίμου κ.λπ.) .

Τα UAVs (Αυτόνομα Πτητικά Μέσα) αποτελούν ίσως την πιο διαδεδομένη και ευέλικτη λύση για εναέριες αποτυπώσεις. Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί τεχνολογική πρόοδος με απότοκο την ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τύπων, με δυνατότητες προσαρμογής μεγάλου αριθμού αισθητήρων, που πετυχαίνουν υψηλές αποδόσεις ακόμα και στις πιο απαιτητικές συνθήκες. Η συμβολή τους στην ψηφιακή φωτογραμμετρία είναι καθοριστική, καθώς η λήψη των αεροφωτογραφιών από αυτόνομα μη επανδρωμένα εναέρια μέσα σε συνδυασμό με τα κατάλληλα λογισμικά επεξεργασίας αυτών οδηγούν στην τρισδιάστατη παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων σε πραγματικό χρόνο. Στα UAVs περιλαμβάνεται οποιοδήποτε μηχανοκίνητο εναέριο μέσο είναι ικανό να φέρει φωτογραμμετρικό εξοπλισμό (απλή φωτογραφική μηχανή, βιντεοκάμερα, θερμική ή υπέρυθρη κάμερα, σύστημα LIDAR κ.α.) και να λαμβάνει φωτογραφίες με ημιαυτόματη ή αυτοματοποιημένη λειτουργία πτήσης.

Τα βήματα που αφορούν την εναέρια σάρωση μίας περιοχής μελέτης είναι τα εξής:

1. Έλεγχος των καιρικών συνθηκών (Έντονος άνεμος > 4BF και βροχόπτωση δυσκολεύουν την πτήση)
2. Υπόδειξη του χώρου αποτύπωσης
3. Δημιουργία τριγωνομετρικού δικτύου ανάλογο των αναγκών
4. Τοποθέτηση φωτοσταθερών σε κατάλληλες θέσεις και αποτύπωση αυτών με GPS Γεωδαιτικό Σταθμό
5. Δημιουργία του σχεδίου πτήσης του UAV στο Ground Station
6. Αεροφωτογράφιση της περιοχής με κατάλληλη επικάλυψη κατά Χ και κατά Υ



7. Έλεγχος της ποιότητας των αεροφωτογραφιών μετά το πέρας της πτήσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή

4.3 Digital Twins – Ψηφιακά Δίδυμα

Το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin), όπως το όρισε ο Michael Grieves το 2002, αποτελεί «ένα σύνολο εικονικών μοντέλων πληροφορίας που περιγράφουν πλήρως ένα πραγματικό ή δυνητικά πραγματικό και φυσικό κατασκευασμένο προϊόν, από τον μικρόκοσμο έως τον μακρόκοσμο, δηλαδή από επίπεδο ατόμου έως το γεωμετρικό επίπεδο. Στην βέλτιστη περίπτωση, οποιαδήποτε πληροφορία θα μπορούσε κανείς να αντλήσει από το φυσικό αντικείμενο, θα μπορεί να την αντλήσει και από το ψηφιακό του δίδυμο» (Grieves, 2002). Έτσι λοιπόν ο όρος Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) περιλαμβάνει ένα φυσικό αντικείμενο (είτε έμβιο είτε άβιο), το ψηφιακό του δίδυμο, το οποίο αποτελεί την ψηφιακή του αναπαράσταση σε πραγματικό χρόνο και τέλος τον μηχανισμό σύνδεσης των δύο, δηλαδή την αμοιβαία αλλαγή δεδομένων μεταξύ των διδύμων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι και το βασικό χαρακτηριστικό προτέρημα αυτής της τεχνολογίας, ότι δηλαδή οτιδήποτε συμβαίνει στο ένα δίδυμο, είτε στο φυσικό είτε στο ψηφιακό, τότε το ίδιο αποτέλεσμα θα μεταδοθεί και στο άλλο, σε πραγματικό χρόνο.

Όπως γίνεται κατανοητό, η τεχνολογία αυτή των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins), μπορεί άριστα να συνεργαστεί με την τεχνολογία BIM που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στόχος πολλών κατασκευαστών είναι να κάνουν αναβάθμιση των BIM τους και να τα εξελίξουν σε ζωντανά ψηφιακά μοντέλα που θα μεταδίδουν σε πραγματικό χρόνο το τι ακριβώς συμβαίνει στο εργοτάξιο. Αυτό αποτελεί την αρχή για ένα σύνολο εφαρμογών των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) στον κατασκευαστικό τομέα. Στη λογική αυτή έρχεται να συμφωνήσει και ο Wei Hu, σύμφωνα με τον οποίο χρειάζεται μία συνθετική χρήση των τεχνολογιών Κατασκευής 4.0 ώστε η εφαρμογή τους στις κατασκευές να έχει το βέλτιστο αντίκρισμα (Hu, et al., 2022).

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής, όπως αναφέρθηκε, είναι ότι μπορεί να συνεργαστεί πολύ καλά με το BIM αλλά και με την Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality) και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things). Η συνεργασία αυτή δίνει βήμα και ανοίγει πολλές δυνατότητες εφαρμογών στον κατασκευαστικό τομέα. Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) είναι μια τεχνολογία που όπως το BIM, έχει συμμετοχή και συνεισφορά σε κάθε φάση του κύκλου ζωής του έργου.

Εφαρμογές κατά την φάση της μελέτης: Το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin)



μπορεί να γίνει η επέκταση του BIM και να ενισχύσει την λειτουργία του όπως η συνεργασία με αισθητήρες RFID (Radio Frequency Identification – ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων), με τεχνητή νοημοσύνη και μοντέλα προσομοίωσης. Παράλληλα, το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) με ανατροφοδότηση δεδομένων από τον φυσικό κόσμο «τρέχει» προσομοιώσεις και μπορεί να προβλέψει πιθανά λάθη, περιττές διαδικασίες και υλικά. Συγκρίνει τα δεδομένα που λαμβάνει σε ζωντανό χρόνο (real-time), με ιστορικά δεδομένα και με χρήση αλγορίθμων, κατορθώνει να προβλέψει τα ανωτέρω, να βελτιστοποιήσει τον προγραμματισμό και την λήψη αποφάσεων.

Εφαρμογές κατά την φάση της κατασκευής: Μία πολύ σημαντική εφαρμογή είναι η βελτίωση της ασφάλειας των εργαζομένων. Συγκεκριμένα είχε αναπτυχθεί ένα πλαίσιο με βάση το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) αλλά και χρήση γυαλιών επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality) (όπου ο χρήστης βλέπει τον πραγματικό κόσμο αλλά ενισχυμένο με ψηφιακό περιεχόμενο) με σκοπό την εργονομική εκπαίδευση εργατών και τη μείωση των σωματικών τους καταπονήσεων κατά τη διάρκεια της εργασίας τους. Οπότε γενικότερα η βελτίωση της υγείας και ασφάλειας στο εργοτάξιο και η εκπαίδευση των εργατών σε προσομοίωση πραγματικών συνθηκών αποτελεί εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins). Κάποιες ακόμη δυνατότητες των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) είναι η υποστήριξη στην διαχείριση πόρων, υλικών και σωστή τήρηση του προγραμματισμού. Η τήρηση των προδιαγραφών του κτιρίου, ο έλεγχος στατικής και δομικής επάρκειας (Attaran & Celik, 2023).

Εφαρμογές κατά την φάση της λειτουργίας/συντήρησης: Δύο αξιόλογες συμβολές του Ψηφιακού Δίδυμου (Digital Twin) είναι πρώτον, η ζωντανή παρακολούθηση των μεταφορών (logistics) και δεύτερον, η βελτιστοποίηση των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου μέσω προσομοιώσεων (Singh, et al., 2022). Με την συνεχή ζωντανή παρακολούθηση των καταναλώσεων του κτιρίου αλλά και την εκτέλεση προσομοιώσεων γίνεται δυνατή η ενεργειακή εξέλιξη του κτιρίου στο μέγιστο (Akanmu, et al., 2021). Ακόμη το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin), ως η μετεξέλιξη του BIM στη διαχείριση της εγκατάστασης, είναι εργαλείο παρακολούθησης των εξαρτημάτων και υλικών που εισέρχονται και εξέρχονται από το κτίριο. Γίνεται ζωντανή αναπαράσταση των αντικειμένων που μεταφέρονται στον πραγματικό κόσμο στο ψηφιακό μοντέλο, φτιάχνοντας έτσι το αποκορύφωμα της επίβλεψης και ελέγχου του κτιρίου από τον χρήστη (Akanmu, et al., 2021).

Εφαρμογές κατά τη φάση της κατεδάφισης/ανακατασκευής: Το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin), μέσω του ιστορικού που διαθέτει από διάφορα κτίρια μπορεί να



προβλέψει την έκβαση της κατεδάφισης ενός παρόμοιου κτιρίου, να προσομοιώσει την κατεδάφιση και να προειδοποιήσει για κινδύνους που πιθανόν να προκύψουν. Συμπερασματικά, συντελεί στη βέλτιστη λήψη αποφάσεων, προτείνει τεχνικές λύσεις και διασφαλίζει την ομαλότερη διεξαγωγή εργασιών ανακατασκευής. Όλα αυτά συνεισφέρουν εμφανώς στη μείωση κόστους και στη διασφάλιση της διατήρησης της αξίας των έργων.

4.4 Internet of Things (IoT) – Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0), είναι μια τεχνολογική επανάσταση που βασικός της στόχος είναι να συνδέσει φυσικό και ψηφιακό κόσμο. Αυτό ακριβώς κάνει και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) με το βασικό του στοιχείο να είναι η συλλογή δεδομένων (Huang & Liu, 2023). Αποτελεί στην πραγματικότητα μια σύνδεση του φυσικού κόσμου με χρήση αισθητήρων και εργαλείων καταγραφής δεδομένων, τα οποία μεταδίδει μέσω του διαδικτύου και του Υπολογιστικού Σύννεφου (Cloud Computing) στον χρήστη και παράλληλα τον υποστηρίζει στην ανάλυσή τους και στη λήψη αποφάσεων.

Ο όρος Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) έχει δημιουργηθεί από κάποια στελέχη εταιριών όταν ήθελαν κάπως να ονομάσουν την παρακολούθηση κατάστασης διαφόρων διαδικασιών με χρήση αισθητήρων αλλά και του διαδικτύου. Η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things), αποτελείται από 5 στρώματα (Khurshid, et al., 2023). Στη συγκεκριμένη εργασία θα διατυπώσουμε τη λειτουργία της τεχνολογίας αυτής με μοντέλο τριών στρωμάτων. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things), και εδώ επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διότι είναι σύντομη και περιεκτική. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) σύμφωνα με τους (Jia, et al., 2019) αποτελεί μια τεχνολογία που συνδυάζει τριπλή «όραση». «Όραση» μέσω των πραγμάτων, δηλαδή των αισθητήρων που συλλέγουν τα δεδομένα, «όραση» μέσω του διαδικτύου που μεταδίδει τα δεδομένα και «όραση» μέσω της γνώσης, δηλαδή του Υπολογιστικού Σύννεφου (Cloud Computing) όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα. Έτσι τελικά ο χρήστης λαμβάνει μια ολιστική επίβλεψη της κατάστασης του συστήματος που θέλει να παρακολουθήσει (ενός έξυπνου σπιτιού ή ακόμα και μιας εφοδιαστικής αλυσίδας για παράδειγμα). Η οπτική επαφή από την πλευρά του χρήστη αποτελεί την τέταρτη «όραση» του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things). Η λήψη δεδομένων γίνεται μέσω αισθητήρων και καμερών. Το βασικό μέσον είναι οι αισθητήρες RFID



(Radio Frequency Identification – Αναγνώριση μέσω ραδιοσυχνοτήτων), οι οποίοι με τη συναλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε ενεργό και παθητικό στέλεχος, ανοίγουν ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών για παρακολούθηση, συλλογή δεδομένων για κινητά αντικείμενα και πολλά άλλα. Για αυτό το λόγο αναλύεται μαζί με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων.

Τα τρία στρώματα στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) και άρα οι τρεις βασικές λειτουργίες που επιτελεί είναι:

1. Το στρώμα «Αντίληψης» - εκεί γίνεται η συλλογή των δεδομένων από τον φυσικό κόσμο, μέσω RFID και άλλων αισθητήρων, καμερών και GPS.
2. Το στρώμα του «Δικτύου» - είναι ο πυρήνας της μετάδοσης αλλά και επεξεργασίας των δεδομένων μέσω Wi-Fi, Bluetooth και άλλων τεχνολογιών συνδεσιμότητας.
3. Το στρώμα της «Εφαρμογής» - εκεί όπου θα καταλήξουν τα δεδομένα και θα αναλυθούν με χρήση Αναλυτική Μεγάλων Δεδομένων (Big Data Analytics) και Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning). Έτσι εξάγονται συμπεράσματα και γίνεται υποστήριξη αποφάσεων.

Οι εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) είναι πραγματικά ανεξάντλητες και μπορεί κανείς να βρίσκει συνεχώς νέους τρόπους να τα αξιοποιεί προς όφελός του. Παρακάτω έγινε μια κατά το δυνατόν κάλυψη των βασικότερων εφαρμογών της τεχνολογίας του του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) στον κατασκευαστικό τομέα. Γίνεται και αναφορά σε εφαρμογές όπου το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) συνεργάζεται με το BIM και παρέχει ένα ακόμα σύνολο χρήσιμων εφαρμογών (Tanga, et al., 2019).

Εφαρμογές κατά την φάση της κατασκευής: Είναι δυνατή η επίγνωση τοποθεσίας κάθε μηχανήματος, του εξοπλισμού και των εργατών στο εργοτάξιο με αποτέλεσμα την επίβλεψη, την παρακολούθηση και άμεση επιδιόρθωση και ταυτόχρονα την καταγραφή της συμπεριφοράς των εργατών (Tanga, et al., 2019). Επίσης βελτιώνεται η ασφάλεια μέσω της παρακολούθησης των ατυχημάτων των εργατών στο εργοτάξιο, με εφαρμογή αισθητήρων πάνω σε αυτούς και άμεση ενημέρωση του διευθυντή του εργοταξίου για πιθανό ατύχημα (Khurshid, et al., 2023). Επίσης είναι δυνατή η παρακολούθηση της τοποθεσίας των φορτηγών και άλλων οχημάτων καθώς και η κατάσταση της δραστηριότητάς τους (Khurshid, et al., 2023). Επίσης μπορεί να ελεγχθεί αν έχει στεγνώσει το σκυρόδεμα με ειδικούς αισθητήρες με αποτέλεσμα καλύτερο προγραμματισμό και μείωση των νεκρών χρόνων (Khurshid, et al., 2023). Επιπλέον μπορεί να προβλεφθεί πιθανό ατύχημα σύγκρουσης εργάτη με κάποιο όχημα ή πρόβλεψη άλλου ατυχήματος και προειδοποίησή του με δόνηση



συσκευής και χρήση αισθητήρων RFID (Kanan, et al., 2017). Πραγματοποιείται ανάλυση δεδομένων από κάποιο ατύχημα και έτσι πραγματοποιείται καλύτερη διαχείριση των κινδύνων για επόμενα ατυχήματα (Kanan, et al., 2017). Συνδυάζοντας το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things), το BIM και την Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality), μπορεί ο χρήστης να έχει τον πλήρη έλεγχο του εργοταξίου σε ζωντανό χρόνο. Επίσης μέσα από αυτή τη συνεργασία τεχνολογιών γίνεται δυνατός ο αυτοματοποιημένος χειρισμός μηχανημάτων (Tanga, et al., 2019)

Η εφαρμογή του BIM στην παρακολούθηση της εξέλιξης του έργου: Με την προσθήκη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) υπάρχει η δυνατότητα αυτοματοποιημένης ενημέρωσης της προόδου και ενημέρωση του προγραμματισμού του έργου. Η πλήρης αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας είναι ακόμα σε πειραματικά στάδια (Tanga, et al., 2019). Παρόμοια είναι η κατάσταση για την επίτευξη του «Lean Construction», όπου με τη χρήση των δεδομένων από τους αισθητήρες μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση των διαδικασιών και αυτοματοποίησή τους (Tanga, et al., 2019). Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) μπορεί επίσης να υποστηρίξει την νέα τεχνολογία της Προκατασκευής Εκτός Εργοταξίου (Off-site Construction), το οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω. Με την συλλογή δεδομένων και τους αισθητήρες σχετικής θέσης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η λήψη αποφάσεων, ο προγραμματισμός, η ασφάλεια και η πρόβλεψη σφαλμάτων στην επίβλεψη του έργου (Zhaia, et al., 2019).

Εφαρμογές κατά την φάση της λειτουργίας/συντήρησης: Υπάρχουν πολλές δυνατότητες τις οποίες η τεχνολογία του «Διαδικτύου των Πραγμάτων» (Internet of Things) επιτελεί άμεσα είτε έμμεσα. Αρχικά ένα πολύ μεγάλο κομμάτι είναι η υποστήριξη των «έξυπνων κτιρίων» (smart buildings) (Jia, et al., 2019). Επίσης, η εσωτερική καθοδήγηση σε άτομα που δεν γνωρίζουν το κτίριο, μέσα από την παρακολούθηση της θέσης τους σε αυτό. Είναι δυνατός επίσης ο άμεσος εντοπισμός του εξοπλισμού που χρήζει συντήρησης και επιδιόρθωσης μέσα στο κτίριο, εξοικονομώντας χρόνο (Jia, et al., 2019). Μπορεί επιπλέον να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου αλλά και βελτίωση της θερμικής άνεσης μέσα από ακριβή εντοπισμό του ατόμου και προσαρμογή των συνθηκών με βάση τη θέση του μέσα στο κτίριο (Jia, et al., 2019). Είναι δυνατή η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω αισθητήρων κατανάλωσης και προσαρμογής τους με βάση τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες και τον πληθυσμό ατόμων στο κάθε δωμάτιο (Jia, et al., 2019). Τέλος, είναι δυνατή η άμεση και σε ζωντανό χρόνο πρόσβαση σε δεδομένα λειτουργίας του κτιρίου για πιο αποδοτική συντήρηση, με μείωση κόστους, χρόνου και



ενεργειακής κατανάλωσης (Jia, et al., 2019) καθώς και η σε περίπτωση ανάγκης (φωτιά, σεισμός κτλ.) υποστήριξη μέσω αισθητήρων που μπορούν να εντοπιστούν εγκλωβισμένα άτομα, είτε να τους κατευθυνθούν στην έξοδο κινδύνου από την συντομότερη διαδρομή (Tanga, et al., 2019).

4.5 Εικονική, Επαυξημένη και Μικτή Πραγματικότητα - Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Virtual, Augmented and Mixed Reality – VR, AR, MR - Extended Reality)

Αρχικά έγινε μια επεξήγηση των όρων της τεχνολογίας αυτής, επειδή υπάρχει μια γενικότερη σύγχυση αυτών. Η ονομασία Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality) είναι ένας όρος «ομπρέλα» που περιλαμβάνει τις τρεις επόμενες τεχνολογίες (Hill, 2022) και φαίνονται για λόγους σαφήνειας.

- VR – Εικονική Πραγματικότητα (Virtual Reality) είναι η τεχνολογία που είτε με ειδικά γυαλιά είτε με οποιαδήποτε οθόνη, θέτει τον χρήστη σε έναν πλήρως ψηφιακό κόσμο με τον οποίο μπορεί να αλληλεπιδράσει.
- AR – Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality) είναι η τεχνολογία που θέτει τον χρήστη στο πραγματικό περιβάλλον εμπλουτισμένο όμως με ψηφιακά στοιχεία, με τα οποία δεν μπορεί όμως να αλληλεπιδράσει.
- MR – Μικτή Πραγματικότητα (Mixed or Merged Reality) είναι η τεχνολογία που θέτει τον χρήστη στο πραγματικό περιβάλλον εμπλουτισμένο με ψηφιακά στοιχεία, με τα οποία μπορεί να αλληλεπιδράσει. Οι περιπτώσεις Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality) και Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality), έχουν τις περισσότερες εφαρμογές στον κατασκευαστικό κλάδο.

Εφαρμογές κατά τη φάση της μελέτης: Μέσω της Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality) μπορεί να γίνει ζωντανά, εύκολα και γρήγορα κατανοητή η εξέλιξη του έργου, κάτι που βοηθά στον χρονικό προγραμματισμό και στην παρακολούθηση της προόδου του. Παρατίθεται η τρέχουσα πραγματική κατάσταση του έργου (as-built) και το προγραμματισμένο για τη συγκεκριμένη ημερομηνία σχέδιο, επιτρέποντας εύκολα τη εποπτεία του (Ahmed, 2019). Η τεχνολογία της Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality), χρησιμοποιείται στην οπτικοποίηση του έργου πριν αυτό καν ξεκινήσει να υλοποιείται. Έτσι καθίσταται δυνατή η προβολή του στους ενδιαφερόμενους διευκολύνοντας επίσης τον προγραμματισμό του. Προβάλλεται ρεαλιστικά το έργο και δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης και συγκεκριμένα κατά πόσο το έργο είναι δυνατό να κατασκευαστεί και κατά πόσο είναι δυνατή η υλοποίησή του. Επίσης συντελείται μείωση της προσπάθειας



κατανόησης του σχεδιασμού από εργάτες καθώς επίσης και μείωση του συνολικού κόστους του (Ahmed, 2019).

Εφαρμογές κατά τη φάση της κατασκευής: Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality) μπορεί να βοηθήσει πολύ σημαντικά στην βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών ενδιαφερόμενων μερών όσον αφορά το εργοτάξιο, την πρόοδο του έργου και τη διεύθυνση του έργου. Με χρήση της Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality) μπορούν οι ενδιαφερόμενοι να συλλέξουν πολύ αποδοτικά πληροφορίες από το εργοτάξιο, να ενημερώσουν την τρέχουσα κατάσταση και να μεταδώσουν τις πληροφορίες άμεσα σε άτομα διαφορετικού τομέα (παραδείγματος χάριν ο διευθυντής έργου στον εργολάβο) (Wen & Gheisari, 2020). Έτσι μειώνεται χρόνος και το κόστος μέσω της πρόβλεψη σφαλμάτων. Εξαιρετικά σημαντική εφαρμογή είναι η εκπαίδευση και η εξάσκηση των εργατών για αύξηση της ασφάλειας και μείωση των συχνών ατυχημάτων που συμβαίνουν καθημερινά στο εργοτάξιο. Αυτό γίνεται είτε με χρήση Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality) είτε Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality). Στην περίπτωση της Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality), ο χρήστης συμμετέχει σε ένα ψηφιακό παιχνίδι προσομοίωσης εργοταξίου που είτε βυθίζεται στο παιχνίδι με ειδικά γυαλιά είτε αυτό γίνεται σε απλό υπολογιστή. Έτσι, μαθαίνει μέσα από σενάρια πώς να χρησιμοποιεί σωστά τον εξοπλισμό και να χειρίζεται μηχανήματα, πώς να κινείται σωστά στο χώρο, να αποφεύγει κινδύνους και πολλά άλλα (Wang, et al., 2018).

Στην περίπτωση της Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality) η εκπαίδευση γίνεται στο πραγματικό εργοτάξιο όπου ο εργάτης υποστηρίζεται στις δραστηριότητές του με ειδικά γυαλιά Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality), παραδείγματος χάριν, ο εργάτης εκτελεί τις εργασίες του αλλά παράλληλα του τονίζονται λάθη, του δίνονται οδηγίες, ή του επισημαίνονται περιοχές κινδύνου, όλα σε ζωντανό χρόνο (Ahmed, 2019). Έτσι οι εργάτες θα διαμορφώσουν μηχανισμούς και θα γνωρίζουν πως να αντιμετωπίσουν πιθανούς κινδύνους όταν εργαστούν μόνοι τους. Αντίστοιχα σημαντική και συνυφασμένη με την εκπαίδευση των εργατών, είναι η διασφάλιση της ασφάλειας στο εργοτάξιο. Είναι η προέκταση του προηγούμενου, καθώς δεν είναι ανάγκη οι εργάτες να είναι τελικά «μόνοι» στο εργοτάξιο. Μπορούν να φορούν ειδικά γυαλιά τα οποία συνεχώς θα τους τονίζουν κινδύνους και θα επισημαίνουν απροσεξίες που εκείνοι ακούσια πραγματοποιούν και πιθανόν να τους προκαλέσουν ατύχημα. Παράλληλα μέσα από αυτό το σύστημα δέχονται καθοδήγηση για την σωστότερη και ασφαλέστερη ολοκλήρωση κάθε διαδικασίας (Xiao Lia, et al., 2018). Ένα παράδειγμα είναι ο χειρισμός γερανού. Με χρήση Επαυξημένης



Πραγματικότητας (Augmented Reality) και Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality) γίνεται δυνατή η επίβλεψη ποιότητας και η διάγνωση ελαττωμάτων με πολύ πιο άμεσο, αποδοτικό και ακούραστο για τον επιβλέποντα του εργοταξίου. Το σύστημα ενημερώνεται από την εκάστοτε τρέχουσα κατάσταση του BIM και αναγνωρίζει διαφορές του κτισμένου μέχρι τότε έργου (as-built), με αποτέλεσμα να επισημαίνει λάθη ή παραλείψεις ώστε αυτές να διορθωθούν προτού παραδοθεί το έργο (Ahmed, 2019). Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ο επιβλέπων του εργοταξίου πραγματοποιεί μια διαδικασία ελέγχου σε ζωντανό χρόνο στο εργοτάξιο, όπου μέσα από την επικοινωνία του με εργάτες κατορθώνει να επιθεωρήσει την ποιότητα σημαντικών διεργασιών. Αυτό προϋποθέτει συντονισμένη χρήση BIM, Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality) και ζωντανή λήψης εικόνων από τους εργάτες με χρήση Φορητών Υπολογιστών (Mobile Computing) (Park, et al., 2012). Έτσι ανεβαίνει επίπεδο η ποιότητα του παραδιδόμενου έργου. Πέρα από την απλή εξέταση ελαττωμάτων οι τεχνολογίες αυτές υποστηρίζουν και κάποιες εργασίες στο εργοτάξιο. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι ο έλεγχος ποιότητας μιας εκσκαφής, η επιβεβαίωση σωστών διαστάσεων, η σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση καλωδίων, εξακρίβωση κοπής, σύνδεσης υλικών και εξαρτημάτων (Shin & Dunston, 2008). Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι με χρήση τεχνολογιών Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality) οι Διευθυντές Έργων (Project Managers) μπορούν να αποφύγουν κόστη σφαλμάτων και παρερμηνειών στα σχέδια που κοστίζουν σε χρόνο. Έτσι δεν χρειάζεται να αναγκάσουν τους εργαζόμενους να δουλέψουν πέραν του ωραρίου ούτε όμως και να μείνει πίσω ο προγραμματισμός των εργασιών. (Ahmed, 2019).

Εφαρμογές κατά τη φάση της λειτουργίας/συντήρησης: Η τεχνολογία Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality) μπορεί να μειώσει την προσπάθεια και το κόστος της συντήρησης ενός έργου παρέχοντας οπτικοποίηση του (Ahmed, 2019). Και οι δύο τεχνολογίες παρέχουν τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης και ζωντανής ψηφιακής «παρουσίας» των ενδιαφερόμενων μερών μέσα στο ολοκληρωμένο έργο. Έτσι υποστηρίζεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων, αποφεύγονται οι παρερμηνείες, οπότε, οι απαιτήσεις του πελάτη πληρούνται άμεσα, ακούραστα και με ελάχιστο περιθώριο λάθους (Wen & Gheisari, 2020). Αυτό επίσης οδηγεί σε μείωση χρόνου και κατ' επέκταση κόστους.

4.6 Τεχνητή Νοημοσύνη – Artificial Intelligence (AI)

Όπως έχει γίνει κατανοητό μέσω της συγκεκριμένης εργασίας, οι τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0 (Construction 4.0) σχετίζονται μεταξύ τους και συμπληρώνουν η



μία την άλλη. Έτσι και η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence), που αποτελεί βασική τεχνολογία του Βιομηχανίας 4.0 (Industry 4.0), έχει παρακλάδια στην όραση υπολογιστών (computer vision), στα Ρομποτικά Μηχανήματα (Robotics), στη Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) και σε άλλες υποκατηγορίες (Abioye, et al., 2021). Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται οι εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) και της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning). Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) είναι ένα παρακλάδι της επιστήμης των υπολογιστών η οποία δίνει τη δυνατότητα τους υπολογιστές να εκτελούν ανθρώπινες εργασίες, να επεξεργάζονται ανθρώπινα δεδομένα, να έχουν αντίληψη, λογική και ικανότητες λήψης αποφάσεων και επίλυσης προβλημάτων (Zhang, et al., 2021). Με τη χρήση Μεγάλων Δεδομένων (Big Data) και Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) μπορεί η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) να συνεισφέρει στην κατασκευαστική βιομηχανία με διάφορες προηγμένες εφαρμογές.

Εφαρμογές κατά τη φάση της μελέτης Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) μπορεί να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία σχεδιασμού σε BIM και να απαλείψει την απαίτηση εξειδικευμένου σχεδιαστή (Pan & Zhang, 2023). Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) μπορεί να διαβάσει και να κατανοήσει το σχέδιο BIM και να δημιουργήσει μια αξιολόγηση για καλύτερη κατανόηση αλλά και βελτίωση. Επίσης μπορεί να μεγιστοποιήσει την αξία του συνεργατικού BIM όπου μπορεί να ενσωματώσει σχέδια από πολλούς χρήστες και να καταλήξει στην καλύτερη δυνατή λύση (Pan & Zhang, 2023).

Εφαρμογές κατά τη φάση της κατασκευής Η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) μπορεί εκμεταλλευτεί τα οφέλη του BIM ένα επίπεδο παραπάνω, καθώς αυτοματοποιεί κάθε εφαρμογή του χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Επίσης, μπορεί να διαβάσει το BIM, να αναγνωρίσει, να επισημάνει τα πιο επικίνδυνα ζητήματα και να παράξει μέτρα πρόληψης μειώνοντας σημαντικά το κόστος και το try-and-error (Pan & Zhang, 2023). Ο συνδυασμός του 4D – BIM, δηλαδή του BIM με ενσωματωμένο το χρονικό προγραμματισμό και της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence) με χρήση προσομοιώσεων μπορούν να οδηγήσει στο να βρεθούν βέλτιστες λύσεις για τη μεταφορά των υλικών και να αποφευχθούν τυχόν επικαλύψεις και λάθη, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα (Pan & Zhang, 2023). Ο συνδυασμός πολλών δεδομένων και οι δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να προβλέψουν και έτσι να αποτρέψουν ατυχήματα στο εργοτάξιο (Abioye, et al., 2021). Σημειώνεται επίσης πως η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) έχει τη δυνατότητα να αναλύσει και να κατανοήσει συμβόλαια, ακόμα και να τα διαχειριστεί πλήρως μειώνοντας σημαντικά τα



λάθη, το κόστος, το χρόνο, την πιθανή απώλεια καλής φήμης και αυξάνοντας την αποδοτικότητα και την ακρίβεια των συμβολαίων (Abioye, et al., 2021). Επίσης μπορεί να γίνει ανάγνωση συμβάσεων, αλλά και άλλων εγγράφων του έργου που πιθανόν είναι μεγάλης έκτασης και πολύ χρονοβόρα για το διευθυντή έργου να τα μελετήσει. Οπότε η τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) μπορεί να δώσει με ευκολία πολλές πληροφορίες στον διευθυντή έργου αναφορικά με αυτά τα έγγραφα, να τον υποστηρίξει στη λήψη αποφάσεων (Χυ, et al., 2021). Συνεπώς, συντελεί στη μεγάλη μείωση χρόνου, αύξηση αποδοτικότητας και ποιότητας αποφάσεων.

Εφαρμογές κατά τη φάση της λειτουργίας/συντήρησης Η άντληση δεδομένων από διάφορες τεχνολογίες της Κατασκευής 4.0 (Construction 4.0), όπως το BIM, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) και το Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing) μπορεί να τροφοδοτήσει την Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence). Έτσι, μπορούν να αναγνωριστούν αυτόματα και να προβλεφθούν πιθανά προβλήματα στα μηχανήματα ή στο ίδιο το κτίριο, αλλά και να πραγματοποιηθούν προληπτικές συντηρήσεις (Pan & Zhang, 2023).

4.7 Ρομποτικά Μηχανήματα - Αυτοματισμοί

Τα Ρομποτικά Μηχανήματα (Robotics) είναι μια ευρέως δημοφιλής τεχνολογία, η οποία έχει συντελέσει κυρίως στην αυτοματοποίηση της παραγωγής στα εργοστάσια, έχει όμως εφαρμοστεί και σε πολλούς άλλους τομείς. Για τον κατασκευαστικό τομέα η κατάσταση είναι διαφορετική και πιο περίπλοκη. Το περιβάλλον ενός εργοταξίου είναι δυναμικό, αλλάζει συνεχώς, επηρεάζεται από εξωτερικές συνθήκες και παράγοντες και γενικά οι παράμετροι ελέγχου του είναι πολλές και απρόβλεπτες. Για αυτό και τα Ρομποτικά Μηχανήματα (Robotics) που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα είναι προσαρμοσμένα σε αυτόν και σχεδιασμένα να επιτελούν συγκεκριμένες διεργασίες. Υπάρχουν και δυνατότητες εξέλιξης των Ρομποτικών Μηχανημάτων (Robotics) με όραση υπολογιστών (computer vision) και Μηχανική Μάθηση (Machine Learning), ώστε να επιτελούν σε πλήρη αυτοματοποίηση διεργασίες πάσης φύσεως (Χυ & Soto, 2020). Υπάρχουν επίσης δυνατότητες αναβάθμισης ήδη υπάρχοντων μηχανημάτων με αισθητήρες, κάμερες, GPS και με πληροφορίες από το BIM και τον χρονικό προγραμματισμό (4D-BIM). Σε κάθε περίπτωση, οι εφαρμογές που εξετάζουμε αφορούν Ρομποτικά Μηχανήματα (Robotics) τα οποία αξιοποιούν τα ψηφιακά εργαλεία του Construction 4.0 για να επιτελέσουν τις εργασίες τους. Η λειτουργία των Ρομποτικών Μηχανημάτων (Robotics) στο εργοτάξιο μπορεί να χαρακτηριστεί πολύ σημαντική καθώς βοηθά στην αποφυγή ατυχημάτων, μειώνει τον κίνδυνο για δύσκολες



εργασίες από τους εργάτες αλλά και την έκθεσή τους σε επικίνδυνα περιβάλλοντα και αέρια. Παράλληλα συντελεί στην αυτοματοποίηση του εργοταξίου, στην επίτευξη υψηλής ποιότητας και στη μείωση σφαλμάτων και κόστους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διάφορα είδη Ρομποτικών Μηχανημάτων (Robotics) τα οποία χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα. Γενικότερα, τα Ρομποτικά Μηχανήματα (Robotics) εκτελούν τις εργασίες τους είτε στο εργοτάξιο, είτε εκτός εργοταξίου. Η δεύτερη περίπτωση κατατάσσεται στην τεχνολογία Προκατασκευής Εκτός Εργοταξίου (Off-site Construction) και αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις εφαρμογές των Ρομποτικών Μηχανημάτων (Robotics) που εκτελούνται ζωντανά στο εργοτάξιο (on-site).

Εφαρμογές κατά την φάση της κατασκευής: Μια ευρέως διαδεδομένη χρήση ρομποτικών μηχανημάτων στις κατασκευές είναι η αυτοματοποιημένη συγκόλληση χάλυβα, πετυχαίνοντας τέλεια ποιότητα και ταυτόχρονα προστατεύοντας τον εργάτη από τους κινδύνους της συγκόλλησης (Saidi, et al., 2016). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα ενίσχυση σκυροδέματος με τοποθέτηση ράβδων οπλισμού από τηλεχειριζόμενα ρομπότ καθώς και ο αυτοματοποιημένος διαμοιρασμός σκυροδέματος (Saidi, et al., 2016). Επιπλέον μπορεί να ομαλοποιηθεί το δάπεδο του κτιρίου αφού έχει εγχυθεί το σκυρόδεμα (Vähä, et al., 2013). Μια άλλη χρήση τους είναι η αυτοματοποίηση και μετατροπή μηχανημάτων εκσκαφής, μπουλντόζων, και γερανών που επιτελούν εργασίες εκσκαφής, μεταφοράς γης. Μάλιστα ορισμένα αυτοματοποιημένα φορτηγά έχει αποδειχθεί πρακτικά ότι φορτώνουν με την ίδια ταχύτητα όσο οι άνθρωποι (Vähä, et al., 2013). Υπάρχουν και αναδυόμενες τεχνολογίες με αυτόματα ρομπότ κατασκευασμένα για αυτό το λόγο και όχι αναβαθμισμένες ήδη υπάρχουσες μηχανές, αλλά είναι ακόμα σε αρχικά στάδια, για παράδειγμα χτίσιμο με εκτόξευση σκυροδέματος σε εξωγήινα περιβάλλοντα (Melenbrink, et al., 2020). Επίσης, είναι δυνατή η αυτόματη τοποθέτηση τούβλων μέσω ρομπότ που τροφοδοτείται με τούβλα και τα τοποθετεί αυτόματα. Μια απλή επαναληπτική διαδικασία που γίνεται εύκολα από ρομπότ. Το επόμενο βήμα (πειραματικό στάδιο) είναι η σύνθεση νέων μεγαλύτερων τούβλων (block) συμβατών μόνο με τα ρομπότ για ακόμα γρηγορότερη και ακριβέστερη ολοκλήρωση της εργασίας αυτής (Balzan, et al., 2022). Επιπροσθέτως, χρησιμοποιούνται ρομπότ για τα μεταφορικά και διαχείριση των υλικών εντός του εργοταξίου οι οποίοι βελτιστοποιούν τις μεταφορές υλικών από σημείο σε σημείο με βάση το BIM αλλά και τον προγραμματισμό του έργου (Balzan, et al., 2022). Μπορούν επίσης να κατασκευαστούν τα θεμέλια από σκυρόδεμα (footing),



καθώς και να δημιουργηθεί βαθιά θεμελίωση με εισχώρηση πασσάλων μέσα στο έδαφος από ειδικό μηχάνημα αυτοματοποιημένου σφυριού (Melenbrink, et al., 2020). Άλλη εφαρμογή είναι η κατασκευή ολόκληρου συναρμολογημένου τοίχου από ρομπότ που λαμβάνει πληροφορίες από ψηφιακό σχέδιο (πλαίσιο ROCCO - Robot Assembly System for Computer Integrated Construction) (Vähä, et al., 2013). Ακόμα μια εφαρμογή είναι το βάψιμο από ρομπότ με ψεκασμό (Vähä, et al., 2013). Με ψεκασμό γίνεται και η επικάλυψη των επιφανειών με πυρίμαχη επίστρωση (Saidi, et al., 2016). Επίσης, χρησιμοποιούνται κατά την τοποθέτηση της πρόσοψης του κτιρίου (façade) όπως πάνελ τζαμιών ή εξωτερικούς τοίχους και επιφάνειες από ρομπότ (Saidi, et al., 2016). Τέλος, υπάρχουν ειδικά ρομπότ που μπορούν να επιτελέσουν την εργασία της χάραξης δαπέδου (floor marking), με βάση τα στοιχεία από αρχεία BIM, προσφέροντας εξαιρετική ακρίβεια και ευκολία.

Εφαρμογές κατά τη φάση της λειτουργίας/συντήρησης. Υπάρχουν ειδικά ρομπότ που σκοπό έχουν την επισκευή και διαμόρφωση εσωτερικού χώρου κτιρίων, όπως είναι η τοποθέτηση/αλλαγή των πάνελ στο ταβάνι, τοποθέτηση γυάλινων τζαμιών, κουφωμάτων πόρτας και παραθύρων (Saidi, et al., 2016). Μια άλλη εφαρμογή κατά την φάση λειτουργίας/συντήρησης ενός έργου είναι η επιδιόρθωση ρωγμών και λακούβων στο δρόμο με αυτοματοποιημένο τρόπο από ειδικό ρομποτικό μηχάνημα (Saidi, et al., 2016).

Εφαρμογές κατά τη φάση της κατεδάφισης/ανακατασκευής. Ρομποτικά συστήματα επίσης εφαρμόζονται για την ελεγχόμενη κατεδάφιση κτιρίου και υποστήριξη ανακύκλωσης ή/και επαναχρησιμοποίησης στοιχείων της οικοδομής. Τα δομημένα στοιχεία του έργου αποσυναρμολογούνται από ειδικά ρομποτικά μηχανήματα τηλεχειριζόμενα από εξειδικευμένο χειριστή. Έτσι είναι δυνατή η αποφυγή της πλήρους καταστροφής των εξαρτημάτων, υλικών και συναρμολογημάτων του κτιρίου με σκοπό να επανενταχθούν σε κάποιο άλλο έργο και παράλληλα η αποφυγή ρίσκου τραυματισμού εργατών (Saidi, et al., 2016). Υπάρχουν και μηχανήματα κατεδάφισης που χρησιμοποιούνται για ανακαίνιση και αναβάθμιση κτιρίων, τα οποία με ειδικό πίδακα νερού (water jet) και σκούπα κενού αέρος μπορούν να απομακρύνουν πολυκαιρισμένο σκυρόδεμα και να το ανανεώσουν με φρέσκο (Balzan, et al., 2022).

4.8 Τρισδιάστατη Εκτύπωση / Προσθετική Κατασκευή

Η Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D-Printing) είναι μια τεχνολογία που έχει εξελιχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και έχει φέρει την επανάσταση κυρίως στο κομμάτι της μαζικής παραγωγής αντικειμένων, εξαρτημάτων, ιατρικού εξοπλισμού και πολλών



άλλων. Πρόσφατα έχει εισέλθει και στον κατασκευαστικό τομέα, στον οποίο θεωρείται από πολλούς ότι θα δώσει μεγάλη αξία. Όπως ορίζεται με βάση τους (Labonnote, et al., 2016), «η Προσθετική Κατασκευή είναι η διαδικασία ένωσης υλικών προς δημιουργία κατασκευών από ένα τρισδιάστατο μοντέλο». Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή, ο σχεδιασμός και η συναρμολόγηση ελέγχονται ως ένα βαθμό ψηφιακά. Η αυτοματοποίηση, ο προγραμματισμός και ο ψηφιακός έλεγχος είναι και οι λόγοι για τους οποίους η Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing) κατατάσσεται στις τεχνολογίες του Construction 4.0. Οι δύο όροι, Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) και Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing) για χρήση στις κατασκευές, μέσα από τη βιβλιογραφία, θεωρείται ότι είναι το ίδιο και το αυτό, οπότε για λόγους ευκολίας και απλότητας της μετάδοσης της πληροφορίας.

Διακρίνονται 5 κύριες κατηγορίες «Τρισδιάστατης Εκτύπωσης» (3D Printing) στον κατασκευαστικό τομέα σύμφωνα με τον Labonnote, et al., 2016.

1. Ο «εκτυπωτής ατσάλινου σκελετού» (gantry), δηλαδή στην πραγματικότητα ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής τεραστίων διατάσεων, με τη διαφορά ότι εγχέει σκυρόδεμα αντί για πλαστικό.
2. «Πλατφόρμες αιωρούμενες από συρματόσχοινα» (cable-suspended platforms), οι οποίες δίνουν την δυνατότητα εκτύπωσης μερών ή ολόκληρων κτισμάτων, σε μεγάλα ύψη.
3. «Η προσέγγιση σμήνους» (swarm approach). Η συγκεκριμένη κατηγορία αφορά μικρά αυτόνομα ρομπότ, τα οποία κινούνται με τροχούς, είτε σε ράγες ή γραπώνοντας στο κτίριο και φέρουν κεφαλή εκτύπωσης. Αυτά είναι χρήσιμα σε περιστάσεις που δεν μπορεί να στηθεί συμβατικός εκτυπωτής και είναι κατάλληλα για δύσβατα σημεία.
4. «Ο ρομποτικός βραχίονας» (robotic arm). Αποτελεί έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή πολλαπλού σκοπού που έχει μεγάλη ελευθερία κίνησης.
5. «Η προσέγγιση του ξεδιπλώματος και της αυτοσυναρμολόγησης» (folding and selfassembly), μια πολύ προηγμένη τεχνολογία που αφορά την εκτύπωση, όχι στρωμάτων υλικού όπως οι παραδοσιακοί εκτυπωτές, αλλά επιφανειών που με τον κατάλληλο τρόπο ξεδιπλώνουν αυτόματα και σχηματίζουν μια κανονική δομή.

Προς το παρόν η τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D-Printing) είναι αρκετά περιορισμένη, σε πολλές περιπτώσεις σε πειραματικά στάδια και με μεγαλύτερη εφαρμογή στην Προκατασκευή εκτός Εργοταξίου (Off-site Construction). Υπάρχουν βέβαια εφαρμογές της αλλά σε συγκεκριμένες ειδικές περιπτώσεις και συνθήκες. Συγκεκριμένα, είναι δυνατή η Εκτύπωση συμβατικού τοίχου κτιρίου σε στρώσεις σκυροδέματος.



Κάποιες άλλες περιπτώσεις χρήσης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing), ώστε να καταλάβει ο αναγνώστης πιο παραστατικά σε τι είδους έργα αξιοποιείται η τεχνολογία αυτή είναι:

- Κατασκευή πρωτοποριακών σχεδιασμών, ελεύθερης μορφής, που δεν θα ήταν δυνατό χωρίς τη χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών.
- Κατασκευή προσόψεων κτιρίων (façade).
- Κατασκευή και δημιουργία εξατομικευμένων κτιρίων

Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μηδενική περίσσεια υλικού και άρα η μείωση του κ. Επίσης, γίνεται δυνατή η βελτιστοποίηση του κτιρίου ενεργειακά και περιβαλλοντικά, καθώς μπορεί να γίνει προσαρμογή του πάχους της εκτύπωσης ανάλογα με τις ανάγκες του κτιρίου (παχύτερο τοίχωμα στο μέρος που δεν βρίσκει ο ήλιος) είτε κατασκευής ελαφρότερων κατασκευών με δημιουργία λεπτότερων σκελετών όπου χρειάζεται.

4.9 Lean Manufacturing

Η λιτή παραγωγή είναι μια μέθοδος παραγωγής που προέρχεται από το λειτουργικό μοντέλο της Toyota του 1930 "To Toyota Way" (Toyota Production System, TPS). Ο όρος Lean (λιτός) δημιουργήθηκε το 1988 από τον John Krafcik και ορίστηκε το 1996 από τους James Womack και Daniel Jones ότι αποτελείται από πέντε βασικές αρχές: *«Καθορίστε επακριβώς την αξία ανά συγκεκριμένο προϊόν, αναγνωρίστε την ροή αξίας για κάθε προϊόν, κάντε την αξία να κυκλοφορεί συνεχώς, αφήστε τον πελάτη να έλξει την αξία του προϊόντος από τον παραγωγό και επιδιώξτε την τελειότητα»*.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις 8 βασικές μορφές σπατάλης (Lean Wastes) στη Λιτή Παραγωγή (Lean Manufacturing), οι οποίες οδηγούν σε κρίσεις στην παραγωγική διαδικασία.

Οι σπατάλες διακρίνονται σε δύο ομάδες:

Πρώτη ομάδα:

- **Defects (Ελαττωματικά προϊόντα):** Προβλήματα ποιότητας που απαιτούν επιδιόρθωση ή απόρριψη.
- **Over-Production (Υπερπαραγωγή):** Παραγωγή περισσότερων προϊόντων από την απαιτούμενη ζήτηση.



- **Waiting (Αναμονή):** Χρόνος αδράνειας λόγω καθυστερήσεων στη διαδικασία.
- **Non-Utilized Talents (Μη αξιοποίηση ταλέντων):** Υποχρησιμοποίηση δεξιοτήτων και γνώσεων του προσωπικού.

Δεύτερη ομάδα:

- **Transportation (Μεταφορά):** Περιττές μετακινήσεις υλικών ή προϊόντων.
- **Inventory (Αποθέματα):** Υπερβολικά αποθέματα που αυξάνουν το κόστος.
- **Motion (Κίνηση):** Αχρείαστες κινήσεις εργαζομένων ή εξοπλισμού.
- **Excessive Processing (Υπερβολική επεξεργασία):** Περιττές διαδικασίες που δεν προσθέτουν αξία.

Στο κέντρο, η εικόνα τονίζει ότι η ύπαρξη αυτών των σπατάλων οδηγεί σε **κρίση** στη λειτουργία της παραγωγής.



Εικόνα 4 Σπατάλες κατά την Λιτή Παραγωγή.

Το Lean είναι αυτό που χρειάζεται η βιομηχανία για την εξάλειψη της φύρας/σπατάλης. Οι Womack και Jones ορίζουν το Lean ως «έναν τρόπο να κάνεις όλο και περισσότερα με λιγότερη ανθρώπινη προσπάθεια, λιγότερους εξοπλισμούς, λιγότερο χρόνο και λιγότερο χώρο - πλησιάζοντας όλο και περισσότερο στο να παρέχεις στους πελάτες ακριβώς αυτό που θέλουν» (Womach, et al., 1996)), και στη συνέχεια το μεταφράζουν σε πέντε θεμελιώδεις έννοιες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5 Οι 5 βασικές αρχές του Lean Manufacturing.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, μετά την επιτυχία των αρχών Lean στην Toyota και στη συνέχεια στη μεταποίηση και σε άλλους τομείς, αρκετοί ερευνητές και επαγγελματίες συνέβαλαν στην παρουσίαση της φιλοσοφίας Lean στον κατασκευαστικό κλάδο. Η πρώτη εργασία ήταν η παρουσίαση της «νέας φιλοσοφίας παραγωγής στις κατασκευές» από τον Lauri Koskela (1992), η οποία στη συνέχεια ακολουθήθηκε από τη θεωρία μετασχηματισμού-ροής-αξίας (TFV) το 2000. Η θεωρία TFV έχει τρεις κεντρικές έννοιες. Η πρώτη (*Μετασχηματισμός*) είναι η μετατροπή των εισροών σε εκροές με την αποσύνθεση της εργασίας σε εργασίες, στη συνέχεια ελαχιστοποιώντας το κόστος αυτών ώστε να πραγματοποιηθούν αποτελεσματικότερα οι δραστηριότητες προστιθέμενης αξίας. Η δεύτερη έννοια (*Ροή*) είναι η ροή των υλικών και πληροφοριών που περιλαμβάνει, εκτός από το μετασχηματισμό, την επιθεώρηση, τη μετακίνηση και την αναμονή. Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού και της βελτίωσης της ροής είναι η ελαχιστοποίηση της σπατάλης των δραστηριοτήτων μη προστιθέμενης αξίας. Η τρίτη έννοια (*Αξία*) είναι η αξία που παράγεται από την άποψη του πελάτη εξασφαλίζοντας την κατανόηση των αναγκών του πελάτη και την ικανοποίηση αυτών των αναγκών.

Ο κατασκευαστικός κλάδος έχει επωφεληθεί από την εφαρμογή αρκετών εργαλείων Lean και πρακτικών όπως LPS, Ολοκληρωμένη Παράδοση Έργου (ΟΠΕ), Παράδοση Έργου-Στόχος (ΠΣΣ), Αξία-Στόχος Design (TVD), και Virtual Design and Construction (VDC) είναι παραδείγματα των εργαλείων και πρακτικών που αναπτύχθηκαν στο κατασκευαστικό περιβάλλον. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα άλλα εργαλεία ήταν ήδη ανεπτυγμένα σε άλλους τομείς. Ο Hannis Ansah (2016) ταξινομήσε τα εργαλεία Λιτής Κατασκευής σε τρεις κύριες κατηγορίες, οι οποίες είναι εργαλεία ανίχνευσης αποβλήτων (π.χ. VSM, ανάλυση κατασκευαστικής διαδικασίας, περίπατος



Muda και διάγραμμα σπαγγέτι), εργαλεία αντιμετώπισης αποβλήτων (π.χ. διάγραμμα Fishbone), και εργαλεία αντιμετώπισης αποβλήτων (π.χ. 5S, LPS, τυποποίηση εργασιών, λίστες ελέγχου, JIT και επίλυση προβλημάτων A3). Με τη σειρά τους, σε ανασκόπηση, ο Babalola (2019) εντόπισε τέσσερις κύριες περιοχές για εφαρμογές των πρακτικών της Λιτής Κατασκευής, οι οποίες είναι:

1. Σχεδιασμός και μηχανική (π.χ. VDC, πίνακας δομής σχεδιασμού-DSM, προκατασκευή, IPD, TVD και ταυτόχρονη μηχανική).
2. Σχεδιασμός και έλεγχος (π.χ. LPS, σύστημα διαχείρισης με βάση τη θέση-LBMS, VSM και προστασία από σφάλματα ή Poka-Yoke).
3. Διαχείριση κατασκευών και εργοταξίου (Gemba Walk, Total productive/preventive συντήρηση-TPM, Kanban, 5S, JIT και οπτική διαχείριση-VM).
4. Διαχείριση της υγείας και της ασφάλειας (π.χ. fail safe για την ποιότητα και την ασφάλεια, σχέδιο συνθηκών και περιβάλλοντος εργασίας, και διαχείριση της βελτίωσης της υγείας και της ασφάλειας).

4.10 Προηγμένα υλικά

Τα προηγμένα υλικά στην Κατασκευή 4.0 τόσο νέα όσο και προερχόμενα από την τροποποίηση υπαρχόντων υλικών, σχεδιασμένα να διαθέτουν νέες ή βελτιωμένες τεχνικές ιδιότητες ή περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με υλικά που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για την εκτέλεση των ίδιων λειτουργιών (Μαυρογιάννης, 2018). Η εισαγωγή προηγμένων υλικών στον κατασκευαστικό κλάδο συμβάλλει στην αειφορία για τη βελτίωση της παραγωγικότητας του τομέα. Τα κύρια προηγμένα υλικά για τον κατασκευαστικό τομέα περιλαμβάνουν νανοϋλικά και έξυπνα υλικά, υλικά βιολογικής βάσης, προηγμένο σκυρόδεμα, μηχανικές ξύλινες κατασκευές μάζας, μονώσεις υψηλής απόδοσης, δυναμικά παράθυρα, έξυπνες επιστρώσεις και μιμητικά φωτοβολταϊκά (Καλυβάς, 2022). Η νέα κατηγορία των έξυπνων υλικών βρίσκουν εφαρμογή στην αρχιτεκτονική σε ένα μεγάλο εύρος προϊόντων και συστημάτων, ειδικά στα δομικά υλικά τα οποία επωφελούνται από την προσαρμογή των ιδιοτήτων στις διάφορες συνθήκες. Η ανάπτυξη μιας νέας γενιάς πολυλειτουργικών νάνο και έξυπνων μονώσεων στοχεύει στη διάρκεια, στην ασφάλεια, στην κλιματική προστασία και στην αυτοεπούλωση (self-healing) (Μαυρογιάννης, 2018).

Ο στόχος να σχεδιασθούν περισσότερα έξυπνα κτίρια οδηγεί στη ψηφιοποίηση των δομικών υλικών μέσω της ενσωμάτωσης μικρο- και νάνο- αισθητήρων σε αυτά ώστε να συλλεχθούν τα κατάλληλα δεδομένα. Οι αισθητήρες αυτοί θα συλλέγουν



πληροφορίες από το γύρω περιβάλλον , την θερμοφυσική κατάσταση των επιμέρους υλικών και θα γίνεται διαχείριση του κτιρίου τόσο για την ενεργειακή του κατάσταση όσο και για την συμμόρφωση ως προς την κτιριακή νομοθεσία, όσο και την συντήρηση και αντικατάσταση τους διαμέσου των συστημάτων ψηφιακών διδύμων (Μαυρογιάννης, 2018).

Νέα προηγμένα εκτυπώσιμα υλικά εισέρχονται στην αγορά , διευρύνουν τις τεχνικές της προσθετικής κατασκευής και βελτιώνουν την παραγωγικότητα όλου του κατασκευαστικού τομέα. Στην πραγματικότητα τα υλικά για τη κατασκευή 3D δομικών υλικών είναι περιορισμένα και απαιτούν επιπλέον ανάπτυξη για να ξεπεράσουν τους περιορισμούς, όπως τη δομική αντοχή. Όπως το 3D printable concrete , οι νέες έρευνες επικεντρώνονται στο να δημιουργήσουν υλικά μνήμης για να εκτυπώσουν δυναμικά δομικά στοιχεία ή αυτοσυναρμολογούμενα (4D printing) και να επιτευχθεί ο συνδυασμός βιολογίας και τεχνολογίας με στόχο να κατασκευαστούν βιώσιμα δομικά στοιχεία (Χαρδαλιάς, 2019).



Κεφάλαιο 5: Προκλήσεις και εμπόδια

5.1 Εισαγωγή

Η Κατασκευή 4.0 αντιπροσωπεύει την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση στον κατασκευαστικό τομέα, ενσωματώνοντας τεχνολογίες αιχμής όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), την τεχνητή νοημοσύνη, την ανάλυση δεδομένων, τη ρομποτική και την ψηφιακή προσομοίωση. Αν και η μεταρρύθμιση αυτή προσφέρει πολλά υποσχόμενα οφέλη, όπως βελτιωμένη παραγωγικότητα, μείωση κόστους και ταχύτερους χρόνους παράδοσης, αντιμετωπίζει επίσης σημαντικές προκλήσεις και εμπόδια. Στο παρόν κεφάλαιο, αναλύονται μερικές από τις κύριες προκλήσεις που εμποδίζουν την εφαρμογή της Κατασκευής 4.0 στον σύγχρονο κατασκευαστικό τομέα, με σχετικές αναφορές στη βιβλιογραφία.

5.2 Τεχνολογικές Προκλήσεις και Ανάγκη για Υποδομές

Οι τεχνολογικές προκλήσεις αποτελούν έναν από τους κύριους περιορισμούς στην υιοθέτηση της Κατασκευής 4.0. Η ανάγκη για υποδομές που υποστηρίζουν τεχνολογίες όπως το IoT, η τεχνητή νοημοσύνη και τα μεγάλα δεδομένα (Big Data) απαιτεί σημαντικές επενδύσεις. Τα εργοτάξια πρέπει να εξοπλιστούν με αισθητήρες και δίκτυα που υποστηρίζουν την επικοινωνία και τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (Sacks et al., 2020). Αυτή η πρόκληση καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη για μικρότερες κατασκευαστικές επιχειρήσεις, οι οποίες δεν διαθέτουν την απαιτούμενη οικονομική ρευστότητα για να προχωρήσουν σε τέτοιες επενδύσεις.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση ρομποτικών συστημάτων και προηγμένων εργαλείων απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και συντήρηση υψηλής ποιότητας. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών συνεπάγεται, μεταξύ άλλων, σημαντικές επενδύσεις τόσο στην αγορά των συστημάτων αυτών όσο και στην εκπαίδευση του προσωπικού που θα τα διαχειρίζεται (Bello, 2021).

5.3 Έλλειψη Εξειδικευμένου Ανθρώπινου Δυναμικού

Η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού αποτελεί μία από τις βασικές προκλήσεις. Η μετακίνηση προς την Κατασκευή 4.0 απαιτεί νέα, εξειδικευμένα προσόντα, όπως



γνώσεις μηχανικής λογισμικού, ανάλυσης δεδομένων και διαχείρισης σύνθετων συστημάτων. Η ανεπάρκεια εξειδικευμένων επαγγελματιών με τις δεξιότητες αυτές δημιουργεί σημαντικά κενά που δυσχεραίνουν την ευρύτερη υιοθέτηση της Κατασκευής 4.0.

Παράλληλα, η ανάγκη συνεχούς εκπαίδευσης και ανάπτυξης δεξιοτήτων προσθέτει επιπλέον κόστος στις κατασκευαστικές εταιρείες. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται γρήγορα, οι εργαζόμενοι χρειάζονται διαρκή κατάρτιση, κάτι που επιβαρύνει τις εταιρείες οικονομικά και απαιτεί την αφοσίωση τόσο της διοίκησης όσο και των εργαζομένων.

5.4 Πολυπλοκότητα στην Ενοποίηση Συστημάτων

Η ολοκλήρωση των διαφόρων ψηφιακών συστημάτων και εργαλείων σε μια ενιαία πλατφόρμα αποτελεί μία από τις βασικές προκλήσεις της Κατασκευής 4.0. Καθώς πολλές τεχνολογίες είναι νέες και συχνά δεν σχεδιάστηκαν για να είναι συμβατές μεταξύ τους, οι εταιρείες αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην ενοποίηση των διαφόρων λύσεων. Η ενοποίηση και η διαλειτουργικότητα αποτελούν κρίσιμους παράγοντες, καθώς οποιαδήποτε ασυμβατότητα μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις και απώλειες δεδομένων.

Επιπλέον, τα προβλήματα ασφάλειας δεδομένων καθιστούν την ενοποίηση συστημάτων ακόμα πιο δύσκολη, καθώς τα προσωπικά και ευαίσθητα δεδομένα πρέπει να προστατεύονται αποτελεσματικά, ειδικά σε έναν τομέα όπου η απομακρυσμένη διαχείριση και ο έλεγχος αποτελούν καίρια στοιχεία.

5.5 Ζητήματα Κυβερνοασφάλειας

Η κυβερνοασφάλεια είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που ανακύπτει από την ενσωμάτωση των τεχνολογιών της Κατασκευής 4.0. Καθώς τα κατασκευαστικά έργα βασίζονται σε διασυνδεδεμένα συστήματα που συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα, η προστασία των δεδομένων αυτών από κυβερνοεπιθέσεις είναι ζωτικής σημασίας. Οι επιθέσεις μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές διαταραχές στις διαδικασίες, ενώ τα δεδομένα που περιλαμβάνουν πληροφορίες έργων ή ευαίσθητα οικονομικά στοιχεία κινδυνεύουν να διαρρεύσουν.

Η προστασία των δεδομένων απαιτεί την ανάπτυξη συστημάτων ασφαλείας τελευταίας τεχνολογίας, αλλά και την υιοθέτηση ασφαλών πρακτικών από το προσωπικό. Ωστόσο, οι κατασκευαστικές εταιρείες συχνά δεν διαθέτουν επαρκή εμπειρία ή τεχνογνωσία στην κυβερνοασφάλεια, γεγονός που τις καθιστά ευάλωτες.



5.6 Κόστος Υλοποίησης και Χρηματοδότηση

Το κόστος εφαρμογής των νέων τεχνολογιών αποτελεί βασικό εμπόδιο για πολλές εταιρείες στον κατασκευαστικό τομέα. Η μετάβαση στην Κατασκευή 4.0 απαιτεί σημαντική οικονομική επένδυση σε εξοπλισμό, τεχνολογία και εκπαίδευση του προσωπικού. Για πολλές μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, το κόστος αυτό είναι απαγορευτικό.

Παράλληλα, η έλλειψη κατάλληλων χρηματοδοτικών μέσων και πολιτικών που να υποστηρίζουν τη μετάβαση στην Κατασκευή 4.0 επιδεινώνει την κατάσταση. Η έλλειψη πρόσβασης σε χρηματοδότηση αποτρέπει πολλές εταιρείες από το να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες και να βελτιώσουν τη διαδικασία παραγωγής τους.

5.7 Ρυθμιστικά και Νομικά Εμπόδια

Οι νομικές ρυθμίσεις και η ελλιπής κανονιστική βάση αποτελούν εμπόδια στην εφαρμογή της Κατασκευής 4.0. Καθώς οι κανονισμοί συχνά δεν συμβαδίζουν με τον ταχύ ρυθμό τεχνολογικής εξέλιξης, οι κατασκευαστικές εταιρείες βρίσκονται αντιμέτωπες με νομικές αβεβαιότητες που περιορίζουν την καινοτομία και αυξάνουν το ρίσκο εφαρμογής νέων τεχνολογιών.

Ειδικότερα, ζητήματα προστασίας δεδομένων και κυβερνοασφάλειας απαιτούν συνεχή ενημέρωση των κανονισμών και των προτύπων, αλλά και στενή συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστικών εταιρειών και των κρατικών φορέων.



Κεφάλαιο 6: Μελέτες εφαρμογής

6.1 Εισαγωγή

Η ενσωμάτωση της Κατασκευής 4.0 στον κατασκευαστικό τομέα έχει αρχίσει να υλοποιείται μέσω διαφόρων πρωτοπόρων προγραμμάτων και έργων. Παρακάτω παρατίθενται τρεις μελέτες περίπτωσης που αναδεικνύουν πώς η Κατασκευή 4.0 βελτίωσε τις διαδικασίες, μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την αποδοτικότητα σε πραγματικά έργα.

6.2 Μελέτη Εφαρμογής 1: Η Χρήση Ψηφιακών Διδύμων στην Κατασκευή του Διεθνούς Αερολιμένα Heathrow, Λονδίνο

Το διεθνές αεροδρόμιο Heathrow στο Λονδίνο χρησιμοποίησε ψηφιακά δίδυμα (digital twins) για την κατασκευή νέων εγκαταστάσεων και τη βελτίωση της συντήρησης των υποδομών του. Το έργο αυτό εφάρμοσε μοντέλα ψηφιακών διδύμων για να επιτρέψει την παρακολούθηση, την ανάλυση και τη διαχείριση του έργου σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας πλήρη επίγνωση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του αεροδρομίου (Sacks et al., 2020).

Η χρήση ψηφιακών διδύμων επέτρεψε την ακριβή προσομοίωση των υποδομών και τη δυνατότητα εκτέλεσης σεναρίων "τι θα συνέβαινε αν", επιτρέποντας την αποφυγή σφαλμάτων κατά την κατασκευή και μείωση του κόστους επισκευών. Επίσης, βοήθησε στη μείωση του χρόνου απόκρισης κατά τη διάρκεια της κατασκευής, καθώς οι κατασκευαστικές ομάδες μπορούσαν να προβλέπουν προβλήματα πριν εμφανιστούν. Έτσι, οι καθυστερήσεις που προκλήθηκαν από προβλήματα συντονισμού μεταξύ των ομάδων ήταν μειωμένες, ενώ η ποιότητα κατασκευής βελτιώθηκε σημαντικά (Bello, 2021).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής στο αεροδρόμιο Heathrow αποτελεί μια πρότυπη εφαρμογή της Κατασκευής 4.0, δείχνοντας πώς οι ψηφιακές τεχνολογίες μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα και την απόδοση μεγάλων κατασκευαστικών έργων.



6.3 Μελέτη Εφαρμογής 2: Αυτοματοποιημένα Ρομποτικά Συστήματα στον Κατασκευαστικό Τομέα στη Σιγκαπούρη

Στη Σιγκαπούρη, η κυβέρνηση ενίσχυσε την εφαρμογή αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων στον τομέα της κατασκευής προκειμένου να αυξήσει την παραγωγικότητα και να μειώσει την εξάρτηση από ανθρώπινο εργατικό δυναμικό. Σε πολλά μεγάλα έργα, όπως η κατασκευή κατοικιών και δημόσιων υποδομών, ενσωματώθηκαν ρομποτικά συστήματα, όπως ρομπότ τοποθέτησης τούβλων και αυτόνομα μηχανήματα εκσκαφής (Darko et al., 2020).

Ένα συγκεκριμένο έργο, η κατασκευή του συγκροτήματος κατοικιών Punggol Digital District, επωφεληθήκε από την αυτοματοποίηση των διαδικασιών τοποθέτησης και κατασκευής. Χρησιμοποιώντας αυτόνομα ρομποτικά συστήματα, μειώθηκαν οι απαιτούμενοι άνθρωποι στο εργοτάξιο και παράλληλα αυξήθηκε η ακρίβεια και η ταχύτητα κατασκευής. Οι μηχανές ήταν σε θέση να λειτουργούν συνεχώς, χωρίς την ανάγκη διακοπών για ξεκούραση, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας τους χρόνους κατασκευής κατά περίπου 25% (Jain et al., 2021).

Η εφαρμογή αυτή δεν ήταν χωρίς προκλήσεις, καθώς υπήρχε ανάγκη εκπαίδευσης του προσωπικού για τη διαχείριση των συστημάτων και αντιμετώπιση πιθανών τεχνικών δυσλειτουργιών. Ωστόσο, η Σιγκαπούρη κατόρθωσε να καθιερώσει ένα λειτουργικό πρότυπο αυτοματοποίησης κατασκευής, δείχνοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ρομποτικών συστημάτων στον κατασκευαστικό τομέα, κάτι που διευκολύνει την πρόοδο της Κατασκευής 4.0.

6.4 Μελέτη Εφαρμογής 3: Εφαρμογή Ανάλυσης Δεδομένων και IoT στην Εταιρεία Katerra, Ηνωμένες Πολιτείες

Η εταιρεία Katerra, που δραστηριοποιείται στον τομέα των κατασκευών στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχει υιοθετήσει τεχνολογίες IoT και ανάλυσης δεδομένων για να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες παραγωγής και κατασκευής της. Η Katerra χρησιμοποίησε αισθητήρες IoT για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από εργοτάξια και εργοστασιακές εγκαταστάσεις της, επιτρέποντας την ανάλυση δεδομένων που αφορά τη χρήση υλικών, την απόδοση μηχανημάτων και τον χρόνο εκτέλεσης κάθε φάσης του έργου (Nnaji & Karakhan, 2020).

Χάρη στη συνεχή παρακολούθηση των εργοταξίων, η Katerra κατάφερε να εντοπίζει γρήγορα προβλήματα σε διαδικασίες και να λαμβάνει διορθωτικές ενέργειες,



πριν αυτά οδηγήσουν σε καθυστερήσεις ή περιττό κόστος. Οι αισθητήρες IoT που τοποθετήθηκαν σε μηχανήματα και εξοπλισμό παρείχαν δεδομένα για τη συντήρηση των μηχανών, ελαχιστοποιώντας τις απρογραμματίστες διακοπές και επιμηκύνοντας τη διάρκεια ζωής των μηχανών.

Επιπλέον, η ανάλυση δεδομένων συνέβαλε στην αποδοτική διαχείριση των υλικών, καθώς η εταιρεία μπορούσε να προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια την ποσότητα που χρειαζόταν ανά φάση του έργου, μειώνοντας τη σπατάλη. Η Katterra κατάφερε έτσι να εξοικονομήσει έως και 30% στα κόστη υλικών και να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, προωθώντας τη βιωσιμότητα (Osunsanmi et al., 2020).



Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή

Η Κατασκευή 4.0 αναδεικνύεται ως μια θεμελιώδης αλλαγή στον τρόπο που λειτουργεί ο κατασκευαστικός τομέας, ενσωματώνοντας τεχνολογίες αιχμής όπως η τεχνητή νοημοσύνη (ΑΙ), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), τα ψηφιακά δίδυμα και τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση της Κατασκευής 4.0 προσφέρει σημαντικές γνώσεις σχετικά με τις δυνατότητες, τις προκλήσεις και τις προοπτικές αυτής της επανάστασης, και παρέχει σαφείς ενδείξεις για το πώς οι καινοτομίες αυτές διαμορφώνουν τις μελλοντικές κατευθύνσεις του κλάδου. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανασκόπηση των σύγχρονων πηγών σχετικά με την Κατασκευή 4.0.

7.2 Αναβαθμισμένη Παραγωγικότητα και Αποδοτικότητα

Ένα από τα κυριότερα συμπεράσματα είναι ότι η Κατασκευή 4.0 προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας. Οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες, τα ρομποτικά συστήματα και οι τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων επιτρέπουν την ακριβέστερη και ταχύτερη εκτέλεση εργασιών, μειώνοντας έτσι τον απαιτούμενο χρόνο και κόστος των κατασκευαστικών έργων. Για παράδειγμα, η χρήση ψηφιακών διδύμων για την προσομοίωση και τον έλεγχο των διαδικασιών επιτρέπει στις εταιρείες να βελτιώνουν τον σχεδιασμό και την εκτέλεση του έργου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η αυτοματοποίηση συμβάλλει στη μείωση της χειρωνακτικής εργασίας και των ανθρώπινων σφαλμάτων, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη και τα μεγάλα δεδομένα (big data) παρέχουν πληροφορίες που μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση των εργοταξίων.

Ωστόσο, ενώ οι τεχνολογίες αυτές δείχνουν μεγάλη δυναμική, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όσον αφορά την πλήρη υιοθέτησή τους, ιδιαίτερα λόγω του κόστους που σχετίζεται με την αγορά και την εγκατάσταση του εξοπλισμού και των εφαρμογών. Επιπλέον, οι μικρές και μεσαίες κατασκευαστικές επιχειρήσεις δυσκολεύονται να ανταπεξέλθουν στις επενδύσεις που απαιτούνται για την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών, γεγονός που περιορίζει την ευρεία διάδοση των πρακτικών της Κατασκευής 4.0.



7.3 Βελτιωμένη Ασφάλεια και Διαχείριση Κινδύνων

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως η ανάλυση δεδομένων, τα συστήματα παρακολούθησης IoT και η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει στις εταιρείες να εντοπίζουν και να διαχειρίζονται τους κινδύνους πιο αποτελεσματικά. Με τη χρήση αισθητήρων IoT, οι κατασκευαστικές εταιρείες μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο τις συνθήκες στα εργοτάξια και να εντοπίζουν επικίνδυνες καταστάσεις, όπως ακραίες θερμοκρασίες ή δυσλειτουργίες μηχανημάτων. Επιπλέον, τα δεδομένα από συστήματα παρακολούθησης και ανάλυσης μπορούν να συμβάλλουν στην εκπαίδευση του προσωπικού σχετικά με την ασφάλεια και στην πρόληψη ατυχημάτων, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα τραυματισμών και απωλειών.

Η ψηφιακή ανίχνευση κινδύνων έχει τη δυνατότητα να μειώσει τα ατυχήματα και τις διακοπές στις κατασκευαστικές εργασίες, ενισχύοντας την ασφάλεια των εργαζομένων και μειώνοντας τα συναφή κόστη. Παρά τα οφέλη, όμως, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις στη διαχείριση της κυβερνοασφάλειας των συστημάτων που χρησιμοποιούν τα εργοτάξια. Οι κατασκευαστικές εταιρείες πρέπει να διασφαλίσουν την προστασία των δεδομένων τους από κυβερνοεπιθέσεις, ειδικά δεδομένου ότι οι ψηφιακές πλατφόρμες και τα IoT συστήματα είναι ευάλωτα σε παραβιάσεις ασφάλειας.

7.4 Ενίσχυση της Βιωσιμότητας και της Περιβαλλοντικής Υπευθυνότητας

Η Κατασκευή 4.0 επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση των πόρων και την προώθηση της βιωσιμότητας, γεγονός που αποτελεί σημαντικό κίνητρο για την υιοθέτησή της. Η χρήση αναλύσεων δεδομένων και προσομοιώσεων επιτρέπει τον βέλτιστο σχεδιασμό των έργων και τη μείωση των αποβλήτων, ενώ οι τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων δίνουν τη δυνατότητα για ακριβή πρόβλεψη των αναγκών σε υλικά, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης πόρων. Οι νέες τεχνολογίες συμβάλλουν, επίσης, στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια της κατασκευής, προωθώντας μια πιο υπεύθυνη προσέγγιση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Επιπλέον, με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι κατασκευαστικές εταιρείες μπορούν να περιορίσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της βιώσιμης ανάπτυξης. Ωστόσο, η υιοθέτηση πρακτικών βιωσιμότητας απαιτεί αλλαγή στις προτεραιότητες των εταιρειών και



συνήθως συνεπάγεται αρχικό υψηλό κόστος, γεγονός που αποθαρρύνει τις μικρότερες επιχειρήσεις από τη λήψη ανάλογων πρωτοβουλιών.

7.5 Προκλήσεις και Αναγκαίες Προσαρμογές στο Ανθρώπινο

Δυναμικό

Ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που επισημαίνονται στη βιβλιογραφία είναι η ανάγκη εκπαίδευσης και κατάρτισης του ανθρώπινου δυναμικού για τη διαχείριση των νέων τεχνολογιών. Η ενσωμάτωση συστημάτων Κατασκευής 4.0 απαιτεί προσωπικό με εξειδικευμένες γνώσεις σε τομείς όπως η ανάλυση δεδομένων, η διαχείριση ψηφιακών πλατφορμών και η λειτουργία αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων. Η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού παραμένει μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τον κλάδο, καθώς οι παραδοσιακοί επαγγελματίες δυσκολεύονται να προσαρμοστούν στις νέες τεχνολογίες.

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών Κατασκευής 4.0 απαιτεί αλλαγή στη νοοτροπία και στην εκπαίδευση των εργαζομένων. Προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας προγραμμάτων κατάρτισης και συνεχούς εκπαίδευσης, ώστε οι εργαζόμενοι να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευαστικών έργων. Η συνεργασία μεταξύ των εκπαιδευτικών ιδρυμάτων και των κατασκευαστικών εταιρειών κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η επόμενη γενιά επαγγελματιών θα είναι κατάλληλα εκπαιδευμένη για τις νέες προκλήσεις του κλάδου.

7.6 Συμπεράσματα και Προοπτικές για το Μέλλον

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση καταδεικνύει ότι η Κατασκευή 4.0 έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίσει τον κατασκευαστικό τομέα, προσφέροντας βελτιώσεις στην παραγωγικότητα, την ασφάλεια, τη βιωσιμότητα και την απόδοση των έργων. Οι καινοτόμες τεχνολογίες που υποστηρίζουν την Κατασκευή 4.0 ενισχύουν τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων και προωθούν τη χρήση αυτοματοποιημένων και ψηφιακών εργαλείων που επιταχύνουν τη διαδικασία κατασκευής και μειώνουν τα κόστη.

Παρά τα σημαντικά οφέλη, η πλήρης υιοθέτηση της Κατασκευής 4.0 εξακολουθεί να αντιμετωπίζει δυσκολίες, όπως το υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού και οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια δεδομένων. Το μέλλον της Κατασκευής 4.0 εξαρτάται από τη δυνατότητα των



εταιρειών να αντιμετωπίσουν αυτά τα εμπόδια και να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις της σύγχρονης ψηφιακής εποχής.

Συμπερασματικά, η Κατασκευή 4.0 είναι μια συναρπαστική εξέλιξη με την προοπτική να μετασχηματίσει τον κλάδο και να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για αποδοτικότερες, ασφαλέστερες και πιο βιώσιμες κατασκευαστικές διαδικασίες. Οι εταιρείες και οι επαγγελματίες πρέπει να επενδύσουν στις τεχνολογίες αυτές και να προσαρμοστούν στις νέες απαιτήσεις, ώστε να είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν πλήρως τις δυνατότητες που προσφέρει η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση στον τομέα της κατασκευής.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitization and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.
2. Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Kennedy, I. B. (2020). Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1), 225-231.
3. Kostof, S. (1995). *A History of Architecture: Settings and Rituals*. Oxford University Press.
4. Ching, F. D. K. (2015). *A Global History of Architecture*. John Wiley & Sons.
5. Vitruvius. (1960). *The Ten Books on Architecture*. Translated by M. H. Morgan. Cambridge: Harvard University Press.
6. Wittkower, R. (1998). *Architectural Principles in the Age of Humanism*. Academy Editions.
7. Banister Fletcher, A. (1996). *A History of Architecture*. Oxford University Press.
8. Hobsbawm, E. (1999). *The Age of Capital: 1848–1875*. Vintage.
9. Curtis, W. J. R. (1996). *Modern Architecture Since 1900*. Phaidon Press.
10. Kalay, Y. E. (2004). *Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design*. MIT Press.
11. Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Kennedy, I. B. (2020). Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1), 225-231.
12. Sacks, R., et al. (2018). "Building Information Modeling in Construction: Current Trends and Future Directions." *Automation in Construction*, 91, 288-293
13. Akhilesh, K., et al. (2020). "The Role of IoT and Automation in Construction 4.0." *Construction Innovation Journal*, 22(3), 330-345.



14. Wang, X., et al. (2019). "Digital Twins for Enhanced Construction Quality." *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(12), 1-12
15. Zhang, Y., et al. (2020). "Sustainable Construction Practices in the Era of Industry 4.0." *Journal of Cleaner Production*
16. Gbadamosi, A. Q., Oyedele, L. O., Delgado, J. M. D., Kusimo, H., Akanbi, L., Olawale, O., & Muhammed-yakubu, N. (2021). IoT for predictive assets monitoring and maintenance: An implementation strategy for the UK rail industry. *Automation in Construction*, 122, Article 103486.
17. Li, J., Greenwood, D., & Kassem, M. (2019). Blockchain in the built environment and construction industry: A systematic review, conceptual models and practical use cases. *Automation in Construction*, 102, 288-307.
18. Marconi, M., et al. (2021). "IoT-Enabled Predictive Maintenance in Construction." *Construction Management and Economics*, 39(4), 356-367.
19. Zhang, Q., et al. (2022). "Collaboration and Cloud Computing in Construction Projects." *International Journal of Project Management*, 40(5), 678-693
20. Stephen A. Jones, McGraw Hill, Construction Board of Direction building SMART alliance, National BIM Standard – United States, Joint APEC-ASEAN Workshop - How Building Information Modeling Standards Can Improve Building Performance Medan, Indonesia 24-25 June 2013
21. BIMForum (2021). *Level of Development (LOD) Specification*. BIMForum.
22. Grace Ellis, The Evolution of BIM Dimensions: 3D, 4D, 5D & Beyond, <https://www.autodesk.com/blogs/construction/bim-dimensions/>, 2023
23. Zhou, S. and Gheisari, M. (2018), "Unmanned aerial system applications in construction: a systematic review", *Construction Innovation*, Vol. 18 No. 4, pp. 453-468.
24. Greenwood, William & Lynch, Jerome & Zekkos, Dimitrios. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*. 25. 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464.
25. Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41, 1-14.
26. Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325-337.



27. Turkan, Y., Bosch , F., Haas, C. T., & Haas, R. (2012). Automated progress tracking using 4D BIM and 3D imaging technologies. *Automation in Construction*, 22, 414–421.
28. Grieves, M. (2002). Conceptual ideal for product lifecycle management. Presentation at the University of Michigan.
29. Li, C. Z., & Liu, X. (2018). An Internet of Things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction. *Automation in Construction*, 89, 146–161.
30. Hu, W., Lim, K. Y. H., & Cai, Y. (2022). Digital twin and Industry 4.0 enablers in building and construction: A survey. *Buildings*, 12(11), 2004.
31. Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165
32. Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2022). Applications of digital twin across industries: A review. *Applied Sciences*, 12(11), 5727.
33. Akanmu, A. A., Anumba, C. J., & Ogunseiju, O. O. (2021). Towards next-generation cyber-physical systems and digital twins for construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 505–525
34. Huang, Y., Liu, L., Yu, J., Fang, Y., & Gong, W. (2023). Energy-Efficient WiFi Backscatter Communication for Green IoTs. arXiv preprint arXiv:2305.09331.
35. Khurshid, K., Usman, M., & Aslam, M. (2023). The challenges of the Internet of Things (IoT) in the construction industry: A critical review. *Journal of Architecture, Planning and Construction Management*, 13(1), 1-15.
36. Jia, X., Zhou, C., Yang, S., & Zhang, X. (2019). Cognitive computing for big data systems over internet of things. *Enterprise Information Systems*, 14(9-10), 1374-1394.
37. Tanga, P., et al. (2019). Blockchain technologies for the Internet of Things: Research issues and challenges. *IEEE Access*, 7, 164820–164839.
38. Kanan, T., Arslan, V., Ulubeyli, S., & Kazaz, A. (2019). A review of Internet of Things (IoT) in construction industry (Building a better future). In *Proceedings of the 2019 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* (pp. 1-6).
39. Hill, J. (2022). Exploring the impact of augmented and virtual reality in education. McGraw Hill Education. Retrieved from <https://www.mheducation.com>



40. Ahmed, S. (2019). A review on using opportunities of augmented reality and virtual reality in construction project management. *Organization, Technology and Management in Construction*, 11(1), 1839–1852.
41. Wen, J., & Gheisari, M. (2020). Using virtual reality to facilitate communication in the AEC domain: A systematic review. *Automation in Construction*, 113, 103144.
42. Li, X., Yi, W., Chi, H.-L., Wang, X., & Chan, A. P. C. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction*, 86, 150–162.
43. Park, H., Lee, S., & Lee, S. (2012). A brief discussion on augmented reality and virtual reality in construction project management. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 7(3), 1–5.
44. Shin, D. H., & Dunston, P. S. (2008). Identification of application areas for augmented reality in industrial construction based on technology suitability. *Automation in Construction*, 17(6), 682–691.
45. 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.
46. Zhang, D., Pee, L. G., & Cui, L. (2021). Artificial intelligence in E-commerce fulfillment: A case study of resource orchestration at Alibaba's Smart Warehouse. *International Journal of Information Management*, 57, 102124.
47. Zhang, P., Dong, X., Wang, B., Cao, Y., Xu, C., Ouyang, L., Zhao, Z., Duan, H., Zhang, S., Ding, S., Zhang, W., Yan, H., Zhang, X., Li, W., Li, J., Chen, K., He, C., Zhang, X., Qiao, Y., Lin, D., & Wang, J. (2023). InternLM-XComposer: A vision-language large model for advanced text-image comprehension and composition. *arXiv preprint arXiv:2309.00001*
48. Xu, Y., Liu, X., Cao, X., Huang, C., Liu, E., Qian, S., Liu, X., Wu, Y., Dong, F., Qiu, C.-W., Qiu, J., Hua, K., Su, W., Wu, J., Xu, H., Han, Y., & Zhang, Y. (2021). Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research. *Innovation*, 2(4)
49. Xu, T., & Soto, F. (2020). Medical micro/nanorobots in precision medicine. *Advanced Science*, 7(18), 2002203
50. Saidi, K. S., Bock, T., & Georgoulas, C. (2016). Robotics in construction. In B. Siciliano & O. Khatib (Eds.), *Springer handbook of robotics* (pp. 1493–1520).



51. Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., & Gambao, E. (2013). Extending automation of building construction—Survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in Construction*, 36, 168–178.
52. Melenbrink, N., Werfel, J., & Menges, A. (2020). On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in Construction*, 119, 103312.
53. Balzan, A., Cabrera Aparicio, C., & Trabucco, D. (2020). Schindler R.I.S.E.: Elevator installation robot. In *Robotics in Tall Building Construction: CTBUH Research Report* (pp. 146–150). Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
54. Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366.
55. Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*. Simon & Schuster.
56. Koskela, L. (1992). Application of the new production philosophy to construction (Technical Report No. 72). VTT Technical Research Centre of Finland.
57. Koskela, L. (2000). An exploration towards a production theory and its application to construction (Doctoral dissertation). VTT Technical Research Centre of Finland.
58. Ansah, R. H., Sorooshian, S., & Mustafa, S. B. (2016). Lean construction: An effective approach for project management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3), 1607-1612.
59. Babalola, O., Ibem, E. O., & Ezema, I. C. (2019). Implementation of lean practices in the construction industry: A systematic review. *Building and Environment*, 148, 34-43.
60. Καλυβάς, Β. (2022). Έξυπνα υλικά σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
61. Μαυρογιάννης, Ν. (2018). Έξυπνα υλικά. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
62. Μαυρογιάννης, Ν. (2018). Τεχνολογικές δυνατότητες και χρήση της προσθετικής κατασκευής στην κυκλική οικονομία. Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
63. Χαρδαλιάς, Γ. Η. (2019). Σύνθετα και προηγμένα υλικά στην κατασκευή κτιρίων. Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο



64. Mohammed, H., & Rashid, K. (2020). Technological Challenges in Construction 4.0. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(5), 1083-1098.
65. Sacks, R., et al. (2020). Cost of Adopting Construction 4.0 Technologies. *Construction Economics and Building*, 20(2), 88-104.
66. Bello, S. (2021). Implementing Industry 4.0 in Construction: Opportunities and Challenges. *Journal of Construction Management*, 34(4), 489-502.
67. Osunsanmi, T., et al. (2020). Skilled Workforce Requirements for Construction 4.0. *Journal of Building Engineering*, 32, 101584.
68. Pallot, M., et al. (2019). Workforce Training for Construction 4.0. *Automation in Construction*, 105, 102836.
69. Jain, R., Osunsanmi, A., & Pallot, M. (2021). System Integration Issues in Construction 4.0. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101218.
70. Nnaji, C., & Karakhan, A. (2020). Regulatory Frameworks for Data Protection in Construction 4.0. *International Journal of Project Management*, 38(7), 653-663.
71. Darko, A., et al. (2020). Cybersecurity Challenges in Construction Industry 4.0. *Construction Innovation*, 20(3), 251-265.