

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# **Digital Twins: Μελέτη εφαρμογών cyber-physical συστημάτων κατασκευής κτιρίων**

**Σπουδαστής**

Αναστάσιος Παναγιώτης Κόκκινος (cv09093)

**Επιβλέπων Καθηγητής: Μέλισσας Δημήτρης, Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα, Ιούλιος 2022**

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	2
Abstract .....	3
Εισαγωγή .....	4
<b>Κεφάλαιο 1. Θεωρητικό Πλαίσιο και Τεχνολογίες.....</b>	<b>5</b>
1.1 Βασικές Έννοιες .....	5
1.2 Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη.....	7
1.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων.....	11
1.4 Industry 4.0 και Construction 4.0.....	13
1.5 Αρχιτεκτονική Cyber-Physical Συστημάτων στο κατασκευαστικό τομέα .....	16
1.6 Ενεργειακή Απόδοση και Μοντέλα Πρόβλεψης Φορτίου .....	21
1.7 Νομικό Πλαίσιο και Ρυθμίσεις .....	33
<b>Κεφάλαιο 2. Συστήματα Digital Twins και κατασκευή κτιρίων .....</b>	<b>36</b>
2.1 Εισαγωγή .....	36
2.2 Επίπεδα ενσωμάτωσης .....	37
2.3 Ενσωμάτωση Digital Twins στο μοντέλο κατασκευής BIM.....	42
2.4 Τεχνολογίες και εφαρμογές συλλογής δεδομένων και παρακολούθησης .....	46
2.5 Εμπόδια, Προκλήσεις και Νομικές Επιπλοκές .....	49
2.6 Μελλοντικά Σενάρια.....	53
<b>Κεφάλαιο 3. Digital Twins: Ανασκόπηση και Ανάλυση Πραγματικών Περιπτώσεων Εφαρμογής.....</b>	<b>58</b>
3.1 Εισαγωγή .....	58
3.2 Ανάπτυξη Ψηφιακών Διδύμων για Σιδηροδρομικές Γέφυρες.....	59
3.3 Ψηφιακό Δίδυμο Νοσοκομείου .....	63
3.4 Δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο της Πανεπιστημιούπολης του Cambridge .....	68
3.5 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις .....	74
<b>Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις .....</b>	<b>77</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>80</b>

# Περίληψη

Ο κατασκευαστικός τομέας και οι σύγχρονες εργοστασιακές μονάδες αντιμετωπίζουν τη συνεχή ανάγκη για ευθυγράμμιση με τις νέες τεχνολογίες πληροφοριών, ώστε να ανταποκριθούν με επιτυχία στις νέες προκλήσεις της αγοράς. Για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων παραγωγής καθώς και την επιλογή των προϊόντων, απαιτούνται καινοτόμες μέθοδοι ανάλυσης. Προς το παρόν, οι περισσότερες από τις γνωστές μεθόδους στοχεύουν στην ανάλυση σε φυσικό επίπεδο, αν και σύμφωνα με την έρευνα των τελευταίων ετών οι διαδικασίες ψηφιοποίησης προσφέρουν μεγάλο περιθώριο αύξησης της απόδοσης. Η κάθετη ενσωμάτωση των σύγχρονων τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων, Internet of Things (IoT), και τα κυβερνο-φυσικά συστήματα (CPS), όπως τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins) αποτελούν ένα καινοτόμο παράδειγμα στη νέα επανάσταση Industry 4.0. Τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν τα εικονικά αντίγραφα των πραγματικών φυσικών συστημάτων, που συγχρονίζονται πλήρως με τα πραγματικά σενάρια λειτουργίας που παρέχουν μοντέλα γνώσης και ερμηνείας με στόχο την υποστήριξη λήψης ορθών αποφάσεων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση της βιβλιογραφίας για τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών αλλά και των πλεονεκτημάτων της αξιοποίησης ψηφιακών διδύμων. Μέσα από την εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση γίνεται προσπάθεια απάντησης βασικών ερευνητικών ερωτημάτων που αφορούν τα συστατικά στοιχεία των ψηφιακών διδύμων, τις περιπτώσεις που ενδείκνυται η χρήση τους αλλά και τον προσδιορισμό των διαδικασιών που απαιτούνται για να αναπτυχθεί ένα ψηφιακό δίδυμο. Το παρόν έργο ολοκληρώνεται με τη μελέτη τριών διαφορετικών περιπτώσεων εφαρμογής του παραδείγματος των ψηφιακών διδύμων σε πραγματικές συνθήκες καθώς και τη σύνοψη των πλεονεκτημάτων εφαρμογής τους και μελλοντικές προτάσεις έρευνας.

**Λέξεις κλειδιά:** Ψηφιακά δίδυμα, Ψηφιοποίηση, Cyber-Physical Συστήματα Παραγωγής, Industry 4.0, Διαδικασία Παραγωγής, Διαδικασία Ανάπτυξης

# Abstract

Modern manufacturing and construction industry face the constant need of alignment with technologies and paradigms in order to successfully overcome new market challenges. Innovative product analysis methods are required for the design and optimization of production systems as well as the selection of optimal product development. Currently, most of the known methods consider analysis at physical level, although according to recently conducted research, digitization processes offer great scope for increasing performance.

Vertical integration of modern Internet of Things (IoT) technologies and cyber-physical systems (CPS), such as digital twins, is an innovative example in the new Industry 4.0 revolution. Digital twins are the virtual copies of real physical systems, fully synchronized with real operating scenarios that provide knowledge and interpretation models to support right decision making.

The present work focuses on the review of the literature, in order to identify the characteristics and advantages that are enabled by digital twins' utilization. Through the extensive review, this thesis aims to give meaningful answers to basic research questions concerning digital twins. Issues addressed include whether their usage is appropriate or required, what are their main elements, as well as the identification of the procedures required to develop a digital twin. This work concludes with the study of three different cases studies of different digital twin implementations as well as their advantages and proposals for future research.

**Keywords:** Digital Twins, Digitization, Cyber-Physical Production Systems, Industry 4.0, Production Process, Development Process

# Εισαγωγή

Η ταχεία ανάπτυξη των τελευταίων ετών στους τομείς των ηλεκτρονικών, της πληροφορικής και των επικοινωνιών, σηματοδοτεί την μετάβαση της παραγωγής και της βιομηχανίας σε προσεγγίσεις με βάση τις δυνατότητες της ψηφιακής εποχής για αξιοποίηση αυτοματισμών και διαχείριση της γνώσης (Chen, 2017). Η ιδέα του Digital Twin προήλθε από τον αεροδιαστημικό τομέα (Shafto κ.ά., 2010) και στη συνέχεια επεκτάθηκε στη βιομηχανική κατασκευή (Negri κ.ά., 2017; Kritzinger κ.ά., 2018; Tchana κ.ά., 2019), έχει προσελκύσει αυξανόμενη προσοχή στον τομέα του δομημένου περιβάλλοντος τα τελευταία χρόνια.

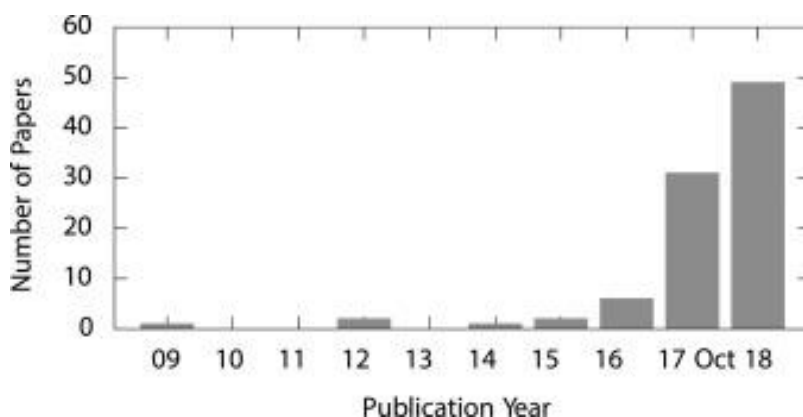
Ο συνδυασμός μεθόδων παραγωγής με τη σύγχρονη τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών αποτελεί βασικό στοιχείο της νέας εποχής για τη Βιομηχανία, Industry 4.0, και περιλαμβάνει cyber-physical συστήματα και ενσωμάτωση σημαντικών τεχνολογιών και παραδειγμάτων όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Ιστορικά, η κατασκευή ήταν μια εξαιρετικά γραμμική, εργατική και χρονοβόρα διαδικασία. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα πάντα, από τα σχέδια σχεδίασης έως τα λεπτομερή αρχιτεκτονικά γραμμικά σχέδια, τη μοντελοποίηση, τις δοκιμές και τις επαναληπτικές αλλαγές, πριν ένα έργο μπορεί να διαμορφωθεί στον φυσικό κόσμο. Και κάθε βήμα της διαδικασίας πρέπει να επικοινωνείται μεταξύ του αρχιτέκτονα, του μηχανικού και των κατασκευαστικών αλυσίδων.

Ένα «ψηφιακό δίδυμο» —ή ψηφιακό αντίγραφο μιας φυσικής οντότητας— μπορεί να βοηθήσει κατασκευαστικά έργα αυτοματοποιώντας τον παραδοσιακό σχεδιασμό, την παραγωγή και τις επιχειρησιακές διαδικασίες. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμεύσει ως η ραχοκοκαλιά για την προκατασκευή και ως ένα πιο σημαντικό μέσο για την επίτευξη βιομηχανοποιημένης απόδοσης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα κατασκευής, το ψηφιακό δίδυμο αναπαράγει κάθε λεπτομέρεια του αρχικού αντικειμένου, είτε πρόκειται για πολυώροφα κτίρια είτε για τζετ. Αυτό σημαίνει ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εξηγήσει τις συμπεριφορές και τις διαδικασίες που εμπλέκονται στην κατασκευή μέχρι τα μεμονωμένα υλικά και εξαρτήματα.

# Κεφάλαιο 1. Θεωρητικό Πλαίσιο και Τεχνολογίες

## 1.1 Βασικές Έννοιες

Ως ψηφιακό δίδυμο, ή digital twin, ορίζεται το ψηφιακό αντίστοιχο ενός φυσικού αντικειμένου, που έχει δημιουργηθεί ώστε να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την τρέχουσα κατάσταση του αντίστοιχου φυσικού διδύμου του. Συνήθως αποτελείται από μια φυσική οντότητα, μια εικονική ομολογη και τις ενδιάμεσες συνδέσεις δεδομένων. Προσφέρει πολυάριθμα οφέλη σε όλους τους χώρους τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Ως εκ τούτου, η έννοια του ψηφιακού διδύμου έχει κερδίσει όλο και μεγαλύτερη προσοχή και αναδεικνύεται σε μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογικές τάσεις για τον τομέα της βιομηχανίας .

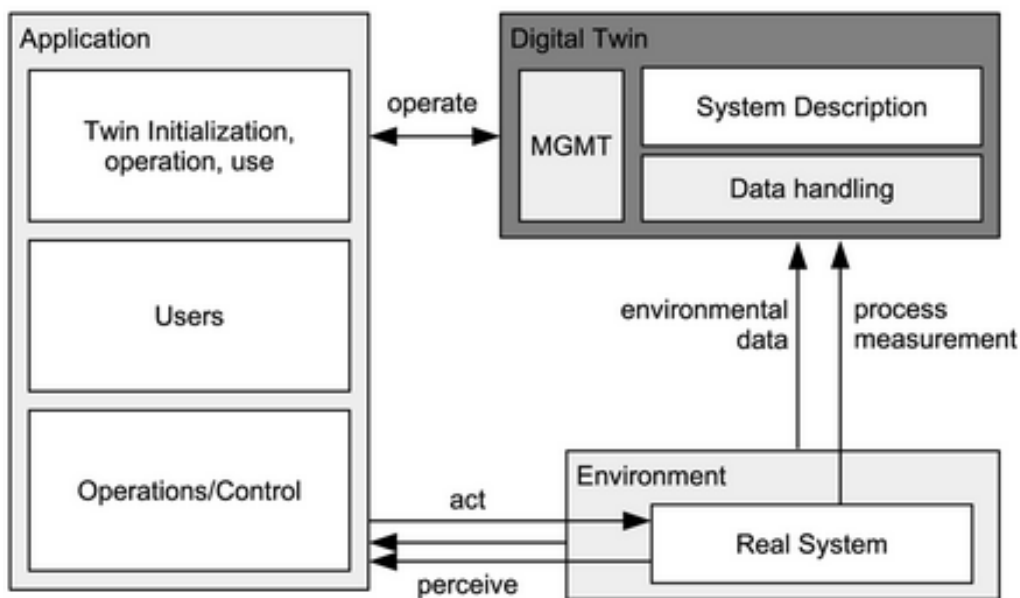


Εικόνα 1.1: Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικά με διαδικασίες και πλεονεκτήματα εφαρμογής ψηφιακών διδύμων

Παρά το ότι η έννοια των ψηφιακών διδύμων αναπτύσσεται συνεχώς, τόσο η βιβλιογραφία, όσο και οι υλοποιήσεις στον πραγματικό κόσμο προς το παρόν είναι περιορισμένες. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα ψηφιακό δίδυμο αποτελεί μία συλλογή πολλών διαφορετικών και πολύπλοκων συστημάτων, με πολυάριθμες λειτουργίες. Παρόλα αυτά,

οι εφαρμογές και οι δυνατότητες των Digital Twins διερευνώνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια (Εικόνα 1.1), κυρίως ως μέσο βελτίωσης της απόδοσης των φυσικών οντοτήτων μέσω της αξιοποίησης υπολογιστικών τεχνικών, οι οποίες ενεργοποιούνται μέσω του αντίστοιχου εικονικού δίδυμου.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και η ευρεία αποδοχή και διάδοση του αποτελούν μια από τις πιο κρίσιμες αιτίες που τα Ψηφιακά Δίδυμα συγκεντρώνουν σημαντικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Ένα ψηφιακό δίδυμο αντικατοπτρίζει ένα φυσικό αντικείμενο ή διαδικασία καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Παρέχοντας μια γέφυρα, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, αυτή η τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα για εξ αποστάσεως παρακολούθηση και ελέγχου του εξοπλισμού και των συστημάτων (Εικόνα 1.2). Μέσα από μοντέλα προσομοίωσης για τη δοκιμή και πρόβλεψη αλλαγών αλλά και την επεξεργασία δεδομένων για τη μελέτη σε διαφορετικά σενάρια, τα ψηφιακά δίδυμα, μπορούν να αξιοποιηθούν από τη βιομηχανία ώστε οι εταιρείες να είναι σε θέση να αποκομίσουν σημαντικά οφέλη, όπως βελτιωμένες λειτουργίες, καινοτομία προϊόντων και υπηρεσιών, αλλά και ταχύτερη διάθεση στην αγορά.



Εικόνα 1.2: Διασύνδεση και διαχείριση (MGMT) ψηφιακού δίδυμου με το αντίστοιχο φυσικό και το περιβάλλον

Τα ψηφιακά δίδυμα, που πρωτοεμφανίστηκαν στην αεροδιαστημική βιομηχανία, κερδίζουν πλέον έδαφος τόσο στη βιομηχανία όσο και στον κατασκευαστικό τομέα. Είναι δυνατή η δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου σχεδόν για οτιδήποτε, ανεξάρτητα από το μέγεθός του, από μεμονωμένα εξαρτήματα και στοιχεία (στροφείς, ανεμογεννήτριες, αγωγοί κ.λπ.) έως πολύπλοκες διαδικασίες και περιβάλλοντα (γραμμές παραγωγής, εργοστάσια παραγωγής, αιολικά πάρκα κ.λπ.). Το επίπεδο πολυπλοκότητας και λεπτομέρειας των μοντέλων ψηφιακών δίδυμων εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα και την ωριμότητα υποδομών πληροφορικής. Τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες μπορούν να δημιουργήσουν προγνωστικές προσομοιώσεις για την καλύτερη κατανόηση της απόδοσης των κατασκευών στο παρόν και στο μέλλον, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

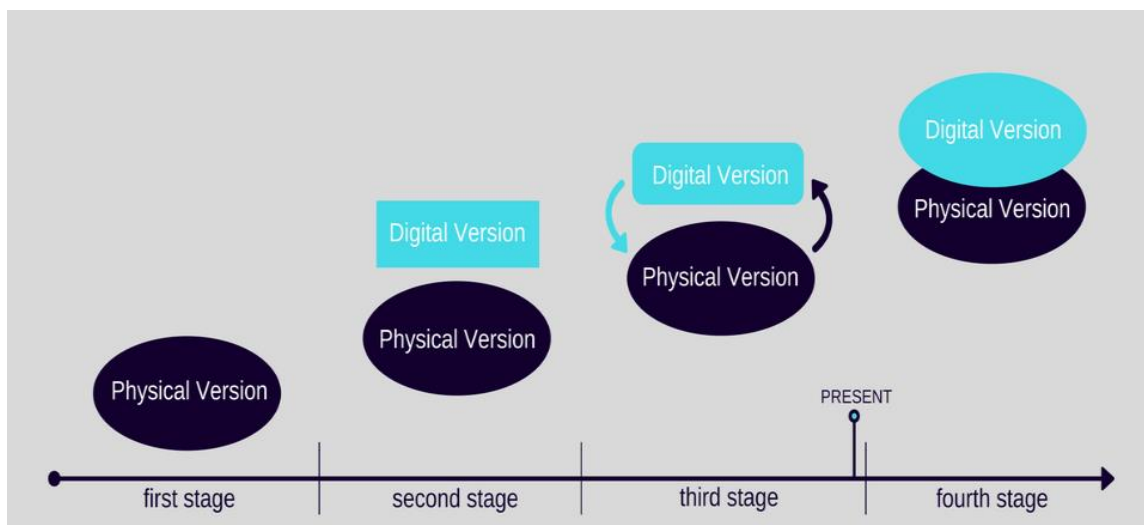
Οι αισθητήρες μπορούν επίσης να παρέχουν τη δυνατότητα εισαγωγής και ανάλυσης επιχειρησιακών, περιβαλλοντικών και οικονομικών δεδομένων για την παροχή μιας ολοκληρωμένης λύσης. Σε αντίθεση με την επιτόπια κατασκευή, η προκατασκευή πρέπει να βασίζεται σε ορισμένες από τις ίδιες συνθήκες: ένα παραγωγικό εργοστασιακό περιβάλλον για να είναι οικονομικά αποδοτικό, μια αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής, σε κάποιο βαθμό και οικονομίες κλίμακας που βασίζονται στη λεπτομερώς συντονισμένη επανάληψη. Ωστόσο, η τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη των οικονομικών κλίμακας και να προσφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας για να καταστήσει τη σπονδυλωτή κατασκευή πιο εφικτή και κερδοφόρα.

## **1.2 Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη**

Σύμφωνα με το Συμβούλιο Έξυπνων Πόλεων (2020) «Ο όρος «Digital Twin» συνδέεται συνήθως με την έξυπνη κατασκευή και το Industry 4.0, με το «δίδυμο» μέρος να χρονολογείται τουλάχιστον από τη δεκαετία του 1960. Ως κομμάτι του προγράμματος Apollo, η NASA δημιούργησε «δίδυμα» της Μονάδας Διοίκησης και Σεληνιακής Μονάδας. Τα δίδυμα έμειναν όλα στο έδαφος, αλλά χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς για συντήρηση, υποστήριξη και αντιμετώπιση προβλημάτων. Η «ψηφιοποίηση» της βιομηχανίας προχώρησε σταδιακά, σε μια σειρά βημάτων (Εικόνα 1.3), όπως ήταν το μοτίβο για την



εισαγωγή όλων των προηγμένων τεχνολογικών καινοτομιών στο σύστημα παραγωγής, από την ατμομηχανή έως την ηλεκτρική ενέργεια. Η λέξη «ψηφιακό δίδυμο» επινοήθηκε αρχικά από τη NASA, όταν κατασκεύασε ένα ακριβές αντίγραφο των πυραύλων. Το ονόμασαν μοντέλο κατοπτρισμού πληροφοριών όπου ο εικονικός χώρος ήταν ένα ακριβές αντίγραφο του πραγματικού χώρου που επέτρεπε τον πειραματισμό και την προσομοίωση μέσω της φυσικής. Ωστόσο, επί του παρόντος, η έννοια του «ψηφιακού διδύμου» σημαίνει αρκετά περισσότερα πράγματα. Για παράδειγμα, στη μηχανική αυτοκινήτων σημαίνει ουσιαστικά τη δημιουργία ενός ψηφιακού αντίγραφου του προϊόντος και την προσομοίωση των διαφόρων σεναρίων για βελτιστοποίηση και απόκτηση αποτελεσματικότητας (Miskinis, C., 2020).



**Εικόνα 1.3: Στάδια ανάπτυξης και ενσωμάτωσης φυσικών και ψηφιακών χώρων**

Ως εκ τούτου, το ψηφιακό δίδυμο είναι ένα ψηφιοποιημένο αντίγραφο σε πραγματικό χρόνο ενός φυσικού αντικειμένου με ελάχιστη συμμετοχή ανθρώπων. Σε παραδείγματα όπως αυτό της υγειονομικής περίθαλψης επιχειρείται η ψηφιακή δίδυμη δημιουργία ακόμη και του ανθρώπου για διάφορες δοκιμές φαρμάκων η οποία είναι εντελώς αντίθετη από αυτή της κατασκευής καθώς ουσιαστικά γίνεται όλος ο σχεδιασμός ανθρωποκεντρικός λαμβάνοντας υπόψιν τις συναισθηματικές, διανοητικές και σωματικές ικανότητες. Το ψηφιακό δίδυμο, αν και είναι εξαιρετικά σχετικό με τον κλάδο της

Αρχιτεκτονικής, Μηχανικής και τον Κατασκευαστικό Τομέα, εξακολουθεί να είναι ένας σχετικά νέος όρος. Ο κατασκευαστικός τομέας δεν επικεντρώνεται μόνο σε ένα προϊόν ή σε ανθρώπους. Στην πραγματικότητα είναι ένας συνδυασμός Προϊόντος, Διαδικασίας και Οργανισμού. Ως εκ τούτου, αξίζει να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι οντότητες μπορούν να αναπαρασταθούν ψηφιακά, τόσο μεμονωμένα, όσο και μαζί με τις αλληλεπιδράσεις τους.

Όπως φαίνεται στον πίνακα σύνοψης με βάση τη βιβλιογραφία, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες ορισμού της ακριβούς έννοιας του ψηφιακού δίδυμου (Πίνακας 1). Ο όρος «ψηφιακό δίδυμο» αναφέρεται σε ένα εικονικό μοντέλο ή αντίγραφο περιουσιακών στοιχείων, διαδικασιών, συστημάτων και άλλων οντοτήτων και έχει αποκτήσει ιδιαίτερη δημοτικότητα με την άνοδο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) που είναι η εφαρμογή μοναδικών αναγνωριστικών σε φυσικά αντικείμενα που τους επιτρέπει να συνδέονται σε ένα δίκτυο που επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων από και προς αυτά τα αντικείμενα. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο βελτιστοποίησης της λειτουργίας και της συντήρησης φυσικών κατασκευών, συστημάτων και διαδικασιών. Με την ανάλυση του εικονικού μοντέλου, μπορούν να αντληθούν μαθήματα και να αξιοποιηθούν ευκαιρίες στο πραγματικό φυσικό δίδυμο και πραγματοποιούνται ψηφιακές προσομοιώσεις που μπορούν να βοηθήσουν στην αποφυγή πραγματικών προβλημάτων.

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και τα data analytics μπορούν να ενημερώσουν το ψηφιακό δίδυμο καθώς αλλάζει το φυσικό του δίδυμο. Τα έξυπνα στοιχεία που συνδέονται με ένα σύστημα που βασίζεται σε cloud μπορούν να συλλέγουν δεδομένα χρησιμοποιώντας αισθητήρες που επιτρέπουν την ανάλυση της κατάστασης σε πραγματικό χρόνο και τις συγκρίσεις με ιστορικά δεδομένα. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια ρεαλιστική ψηφιακή αναπαράσταση κάτι φυσικού. Αυτό που διακρίνει ένα ψηφιακό δίδυμο από οποιοδήποτε άλλο ψηφιακό μοντέλο είναι η σύνδεσή του με το φυσικό δίδυμο. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και σε επίπεδο κράτους, όπως έχει συμβεί στο Ηνωμένο Βασίλειο με το έργο National Digital Twin (NDT) που αποτελεί «ένα οικοσύστημα ψηφιακών διδύμων που συνδέονται με ασφαλή κοινά δεδομένα και είναι ένας εθνικός πόρος για τη βελτίωση της απόδοσης, των υπηρεσιών και της αξίας που

παρέχεται από την υποδομή του Ηνωμένου Βασιλείου, παρέχοντας οφέλη στην κοινωνία, τις επιχειρήσεις, το περιβάλλον και την οικονομία».

<b>Πηγή</b>	<b>Ορισμός</b>
<b>Glaessgen Stargel, 2012</b>	<i>“Το Digital Twin είναι μια ολοκληρωμένη, πολλαπλής κλίμακας, πιθανολογική προσομοίωση ενός κατασκευασμένου οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, στόλο ιστορία, κ.λπ., για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου ιπτάμενου διδύμου του. Το Digital Twin είναι εξαιρετικά ρεαλιστικό και μπορεί να εξετάσει ένα ή περισσότερα σημαντικά και αλληλεξαρτώμενα συστήματα οχημάτων”</i>
<b>Lee, κ.ά., 2013</b>	<i>“Το συζευγμένο μοντέλο είναι ένα ψηφιακό δίδυμο της πραγματικής μηχανής που λειτουργεί στην πλατφόρμα cloud και προσομοιώνει την κατάσταση της υγείας με μια ολοκληρωμένη γνώση τόσο από αναλυτικούς αλγόριθμους που βασίζονται σε δεδομένα όσο και από άλλες διαθέσιμες φυσικές γνώσεις”</i>
<b>Rosen, κ.ά., 2015</b>	<i>«Ένα αυτόνομο σύστημα με πολύ ρεαλιστικά μοντέλα με την τρέχουσα κατάσταση των διαδικασιών και τη συμπεριφορά τους σε αντίδραση στο περιβάλλον τους στον πραγματικό κόσμο».</i>
<b>Canedo, 2016</b>	<i>«Είναι η δημιουργία μιας ψηφιακής αναπαράστασης ενός αντικειμένου του πραγματικού κόσμου με εστίαση στο ίδιο το αντικείμενο».</i>
<b>Schroeder, κ.ά., 2016</b>	<i>"Μια εικονική αναπαράσταση ενός πραγματικού προϊόντος με τις πληροφορίες του προϊόντος από την αρχή της ζωής του έως την απόρριψη στο πλαίσιο των φυσικών συστημάτων στον κυβερνοχώρο."</i>
<b>Schluse, κ.ά., 2018</b>	<i>"Εικονικό αντίγραφο ενός τεχνικού στοιχείου που περιέχει μοντέλα των δεδομένων του (γεωμετρία, δομή ...), της λειτουργικότητας (επεξεργασία δεδομένων, συμπεριφορά, ...) και της διεπαφής επικοινωνίας του."</i>

**Πίνακας 1: Διαφορετικοί ορισμοί για τα ψηφιακά δίδυμα σύμφωνα με τη βιβλιογραφία**

### 1.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Η σύνδεση απομακρυσμένων συσκευών, πηγών δεδομένων, ψηφιακών δίδυμων, μονάδων Τεχνητής Νοημοσύνης και έξυπνων φορητών συσκευών μεταξύ τους ή σε μια βάση μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση μιας ποικιλίας πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Στην εποχή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), υπάρχει μια σειρά από πρωτόκολλα επικοινωνίας που μπορούν να επιλεγούν. Ωστόσο, αυτά τα πρωτόκολλα έχουν και τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες τους ανάλογα με την εφαρμογή τους στην κατασκευή. Η δυνατότητα λήψης πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο από ένα εργοτάξιο επιτρέπει στους διαχειριστές εργοταξίου να γνωρίζουν πού βρίσκονται τα περιουσιακά στοιχεία και τους δίνει τη δυνατότητα να λαμβάνουν γρήγορες ενημερωμένες αποφάσεις. Αυτό παρέχει βελτιωμένο εύρος για έργα που πρέπει να ολοκληρωθούν εγκαίρως.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία που διερευνά μεθόδους για την αύξηση των δομικών αντικειμένων με αυτονομία, επίγνωση και ικανότητα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον τους είναι πλέον διαδεδομένη (Amezquita-Sanchez, Valtierra-Rodriguez, Aldwaik & Adeli, 2016). Με την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στο IoT, τέτοια έξυπνα κατασκευαστικά αντικείμενα θα μπορούσαν να προσφέρουν ασφαλέστερες, πιο πράσινες και πιο αποτελεσματικές δομές από ό,τι τις προηγούμενες δεκαετίες. Η δημιουργία ενός ψηφιακού δίδυμου απαιτεί διαφορετικά στοιχεία, όπως:

- **Αισθητήρες** που καταγράφουν λειτουργικές συμπεριφορές περιουσιακών στοιχείων και διαδικασιών (κραδασμοί, θερμοκρασία, πίεση κ.λπ.), παράλληλα με τα εξωτερικά περιβάλλοντα (θερμοκρασία αέρα, υγρασία κ.λπ.)
- **Δίκτυα επικοινωνιών** που παρέχουν ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων από φυσικές συσκευές στον ψηφιακό κόσμο
- Μια **ψηφιακή πλατφόρμα** που χρησιμεύει ως ένα σύγχρονο αποθετήριο δεδομένων που συγκεντρώνει και αποθηκεύει δεδομένα αισθητήρων με δεδομένα υψηλού επιπέδου (π.χ. MES, ERP).

Συνδυάζοντας αυτές τις πηγές δεδομένων, μπορούν να ληφθούν ενεργητικές γνώσεις που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων με γνώμονα τα δεδομένα-

χρησιμοποιώντας προηγμένους αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης / μηχανικής μάθησης. Οι συσκευές IoT αποτελούνται συνήθως από αισθητήρες, μια πλακέτα με περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους και ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας (Moreu, Kim & Spencer, 2016). Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας θα μπορούσαν να κυμαίνονται από λίγα μέτρα - όπως στην περίπτωση του Bluetooth - έως αρκετές χιλιάδες μέτρα στην περίπτωση της κυψελοειδούς τεχνολογίας. Εκτός από τη χρήση τους για τη συλλογή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο από έναν ιστότοπο και τον συντονισμό των ανιχνευόμενων γεγονότων, οι συσκευές εξοπλισμένες με IoT έχουν διερευνηθεί στο πλαίσιο της παρακολούθησης του πόσο κοντά είναι οι εργαζόμενοι και οι ξένοι στις επικίνδυνες ζώνες ανά πάσα στιγμή, με στόχο την πρόληψη ατυχημάτων σε εργοτάξια μεγάλης και μικρής κλίμακας (Park & Kim, 2013; Jo et al., 2019).

Οι τεχνολογίες ανίχνευσης Ultra-Wideband (UWB) χρησιμοποιήθηκαν για να επιτρέψουν τον έλεγχο των ηλεκτρονικών ενεργοποιητών ελέγχου σε βαρύ εξοπλισμό και να σταματήσουν τους ελιγμούς τους εάν ένας εργαζόμενος βρίσκεται σε κίνδυνο. Αυτό κατέστη δυνατό λόγω της δυνατότητας επίτευξης ενός τοπικού δικτύου διασυνδεδεμένων συσκευών σε ένα εργοτάξιο. Ωστόσο, η πιθανότητα για πιθανές παραβιάσεις της ασφάλειας του εργοταξίου ανοίγει μόλις συνδεθεί ψηφιακά η υποδομή του χώρου μέσω Διαδικτύου. Αυτός ο κίνδυνος έχει επίσης διερευνηθεί στη βιβλιογραφία και εντοπίστηκαν κενά ασφαλείας σε μηχανήματα κατασκευής που ελέγχονται με ραδιοσυχνότητες (Maggi κ.ά., 2019). Οι συγγραφείς προτείνουν ότι οι κατασκευαστές τέτοιων εγκαταστάσεων ελεγχόμενης με ραδιοσυχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιούν πρακτικές που έχουν αναπτυχθεί για την τεχνολογία και το σχεδιασμό των καταναλωτών σε μέτρα όπως κυλιόμενοι κώδικες, για να παρέχουν ένα πρόσθετο επίπεδο ασφάλειας.

Ο κίνδυνος στον κυβερνοχώρο των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και των αλληλεπιδράσεών τους με συστήματα πληροφοριών επιχειρήσεων εγείρεται μαζί με ανησυχίες σχετικά με τα επίπεδα πρόσβασης δεδομένων σε τέτοιες συνεργατικές οργανωτικές δομές. Ένα σημαντικό εμπόδιο στην επικοινωνία δεδομένων με το IoT είναι η έλλειψη γενικών διεπαφών μεταξύ των στοιχείων των προμηθευτών λογισμικού στα Πρότυπα IoT (Oesterreich & Teuteberg, 2016; Ioannidou & Sklavos, 2021). Πρότυπα όπως το

MTConnect επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση συμβατών στοιχείων παραγωγής χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο τύπος μηχανής ή ο κατασκευαστής (Dave κ.ά., 2015).

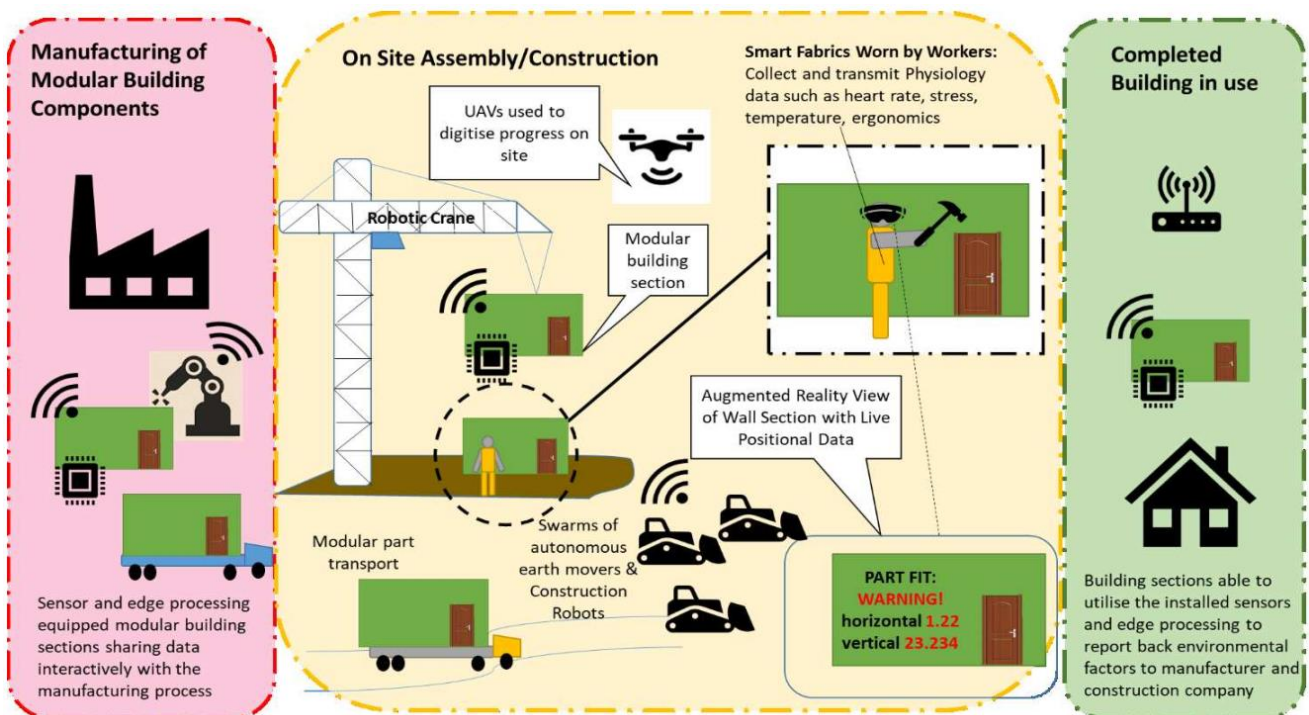
Το πρότυπο χαμηλής ενέργειας Bluetooth (BLE) χρησιμοποιήθηκε με την ικανότητα ενός Smartphone να ανιχνεύει πολλές συνδεδεμένες συσκευές σε ένα τοπικό περιβάλλον (Bisio et al., 2018). αλλά και την παρακολούθηση των στοιχείων του εργοταξίου μέσω της χρήσης μιας προσαρμοσμένης εφαρμογής παρακολούθησης. Μέσω του εντοπισμού και της παρακολούθησης των στοιχείων του εργοταξίου μπορεί να διερευνηθεί η δημιουργία και η παροχή πληροφοριών συμπεριφοράς του περιβάλλοντος σε συνδεδεμένες συσκευές. Αυτή η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι αξιοσημείωτη λόγω της ικανότητάς της να παρακολουθεί κτίρια σε περιβάλλοντα που είναι συνήθως αρκετά απαιτητικά για τη λειτουργία κανονικών δικτύων αισθητήρων IoT.

#### **1.4 Industry 4.0 και Construction 4.0**

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών, οι περισσότερες βιομηχανίες έχουν υποστεί μια εξέλιξη και έχουν ενσταλάξει καινοτομίες προϊόντων και διαδικασιών στον πυρήνα των δραστηριοτήτων τους. Ο τομέας της μηχανικής και των κατασκευών δεν έχει συμβαδίσει όσον αφορά τις τεχνολογικές ευκαιρίες που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της παραγωγής και της παραγωγικότητας, με αποτέλεσμα επίσης τη στασιμότητα της παραγωγικότητας της εργασίας. Πολλές εσωτερικές και εξωτερικές προκλήσεις ευθύνονται για αυτήν την κατάσταση, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας που αντιμετωπίζει σταθερό κατακερματισμό, δυσκολία στην πρόσληψη εργατικού δυναμικού με το κατάλληλο ταλέντο, ανεπαρκείς δεσμούς με εργολάβους και προμηθευτές και ανεπαρκή μεταφορά γνώσης από το ένα έργο στο άλλο.

Παρά τις τεράστιες δυνατότητες του κλάδου, η αύξηση της αποτελεσματικότητας και της παραγωγικότητας μπορεί να προκύψει μόνο από την ψηφιοποίηση, τις νέες τεχνικές για την κατασκευή και τις καινοτομίες. Εργαλεία όπως η τρισδιάστατη (3D) σάρωση, η μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίων (BIM), τα drones και η επαυξημένη πραγματικότητα έχουν ωριμάσει στην αγορά (Son, Kim and Kim, 2012). Με την ενσωμάτωση αυτών των

καινοτομιών, οι επιχειρήσεις μπορούν να τις εκμεταλλευτούν για να αυξήσουν το επίπεδο παραγωγικότητας, την ασφάλεια και την ποιότητα και να βελτιώσουν τη διαχείριση έργων. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το δυναμικό, πρέπει να σχεδιαστεί μια στρατηγική για συντονισμένες και αφοσιωμένες προσπάθειες σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών, της τεχνολογίας, του προσωπικού και των κανονισμών. Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση 4.0 ή Industry 4.0, εισήγαγε ψηφιακές τεχνολογίες, συστήματα αισθητήρων, έξυπνες μηχανές και έξυπνα υλικά στον κατασκευαστικό κλάδο όπου το BIM έχει γίνει το κεντρικό αποθετήριο για τη συλλογή ψηφιακών πληροφοριών σχετικά με ένα έργο (Zhang, Xiong, Shi and Ou, 2016, ).



Εικόνα 1.4: Μεθοδολογία αξιοποίησης τεχνολογιών Construction 4.0 κατά την σχεδίαση και κατασκευή κτιρίων

Το BIM είναι ένα ιδανικό πλαίσιο για την ανάπτυξη ισχυρών και καινοτόμων εφαρμογών για τον κατασκευαστικό κλάδο παρέχοντας ένα πρόσθετο επίπεδο δεδομένων που είναι σε θέση να αλληλεπιδρούν και να συνεργάζονται σε πραγματικό χρόνο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου (Son, Kim & Kim, 2012). Η καινοτομία του BIM

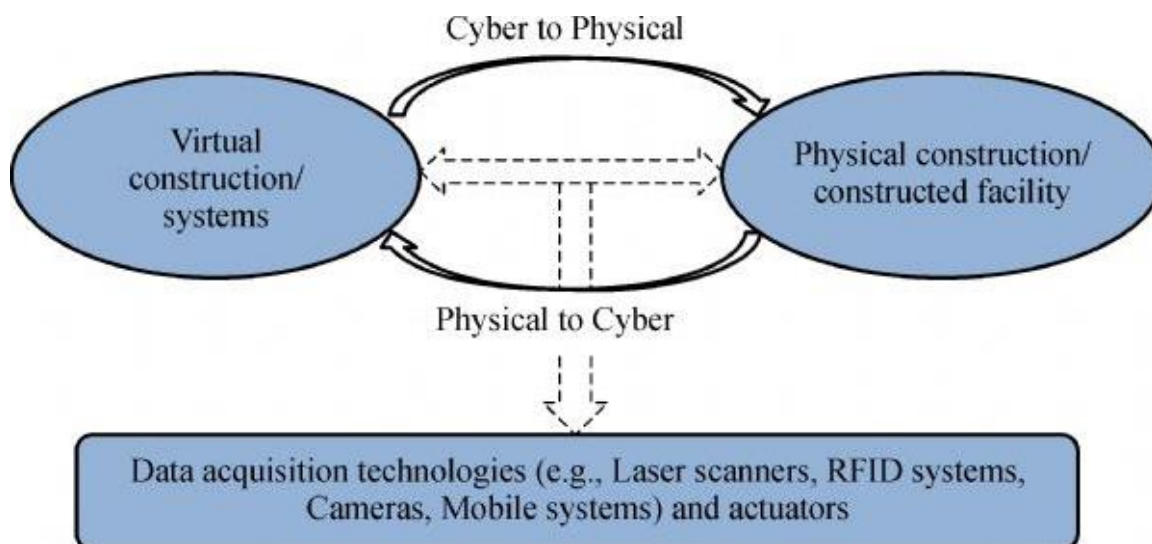
διαχειρίζεται υπολογιστικά δεδομένα για τη βελτίωση της κατασκευαστικής απόδοσης και οικονομίας. Με το ανοιχτό BIM, τα υπάρχοντα εργαλεία διαχείρισης κατασκευών μπορούν να ενσωματωθούν με το BIM για να επεκτείνουν τις δυνατότητές του στο οικοσύστημα κατασκευής (Moselhi and Alshibani, 2009). Στο κεφάλαιο 2.3 της παρούσας εργασίας γίνεται εκτενέστερη ανάλυση της ενσωμάτωσης των ψηφιακών διδύμων στο BIM, καθώς έχει γίνει ευρέως αποδεκτό στον κατασκευαστικό κλάδο (Asadi, Alsubaey and Makatsoris, 2015) αν και πολλές εταιρείες δεν έχουν εκμεταλλευτεί πλήρως τις δυνατότητές του, παρά το γεγονός ότι η επένδυση στο BIM έχει αποδειχθεί ότι αξίζει το κόστος εφαρμογής για τους οργανισμούς .

Η βιομηχανία 4.0 αναφέρεται σε ένα συνδεδεμένο δίκτυο πληροφοριών με ανθρώπους και μηχανές εξοπλισμένες με αισθητήρες και ενεργοποιητές που μπορούν να εξαγάγουν δεδομένα σε τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων (Negri, Macchi & Fumagalli, 2017). Οι συνδεδεμένες και συνεργαζόμενες οντότητες με χρήση υπολογιστικού νέφους καθιστούν το φυσικό σύστημα και τις τρέχουσες διαδικασίες διαθέσιμες στο διαδίκτυο και ως εκ τούτου θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν την επιστήμη δεδομένων και αναλυτικά μοντέλα για την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από πολλαπλές πηγές. Οι πραγματικές δραστηριότητες μπορούν στη συνέχεια να συγχρονιστούν με τον εικονικό χώρο, ο οποίος θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της αμφίδρομης σύνδεσης. Η εικονική κατασκευή και το ψηφιακό περιβάλλον θα μπορούσε στη συνέχεια να αξιοποιηθεί για την αξιολόγηση και επαλήθευση της φυσικής λειτουργίας ώστε να επιτευχθεί βελτιστοποίηση και να σχεδιαστούν νέες δυνατότητες (Negri κ.ά., 2017). Με την ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών ανίχνευσης και ελέγχου που επιτρέπουν νέες δυνατότητες οπτικοποίησης και αυτοματοποίησης, προκύπτουν νέες δυσκολίες και προκλήσεις που περιλαμβάνουν τον τρόπο επεξεργασίας του μεγάλου φάσματος δεδομένων και τον τρόπο μετάφρασής τους σε γνώσεις για τη βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων κατά την κατασκευή.



## 1.5 Αρχιτεκτονική Cyber-Physical Συστημάτων στο κατασκευαστικό τομέα

Ένας τρόπος με τον οποίο μπορούν να αναπτυχθούν cyber-physical συστήματα στον κατασκευαστικό κλάδο είναι με την αυστηρή ενσωμάτωση των φυσικών συστημάτων με τις εικονικές τους αναπαραστάσεις για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων αναλυτικών συστημάτων με επίγνωση του περιβάλλοντος, ικανά να προσαρμόζονται στις αλλαγές στο φυσικό εργοτάξιο ή τη φυσική εγκατάσταση. Τέτοια συστήματα γεφυρώνουν τον εικονικό κόσμο με τον φυσικό κόσμο χρησιμοποιώντας αισθητήρες και τεχνολογίες απόκτησης και μετάδοσης δεδομένων για να σχηματίσουν συστήματα ανάδρασης (Dillon κ.ά., 2011; Chen κ.ά., 2015). Η ανάγκη για ανατροφοδότηση στις κατασκευαστικές δραστηριότητες έχει εντοπιστεί από πολλούς ερευνητές (Navon και Sacks, 2007). Ένα cyber-physical σύστημα αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία: τη γέφυρα «από το φυσικό χώρο στον ψηφιακό χώρο» και τη γέφυρα «από τον ψηφιακό χώρο στο φυσικό χώρο» (Bordel κ.ά., 2017), όπως αυτά επεξηγούνται στο διάγραμμα της εικόνας 1.5:

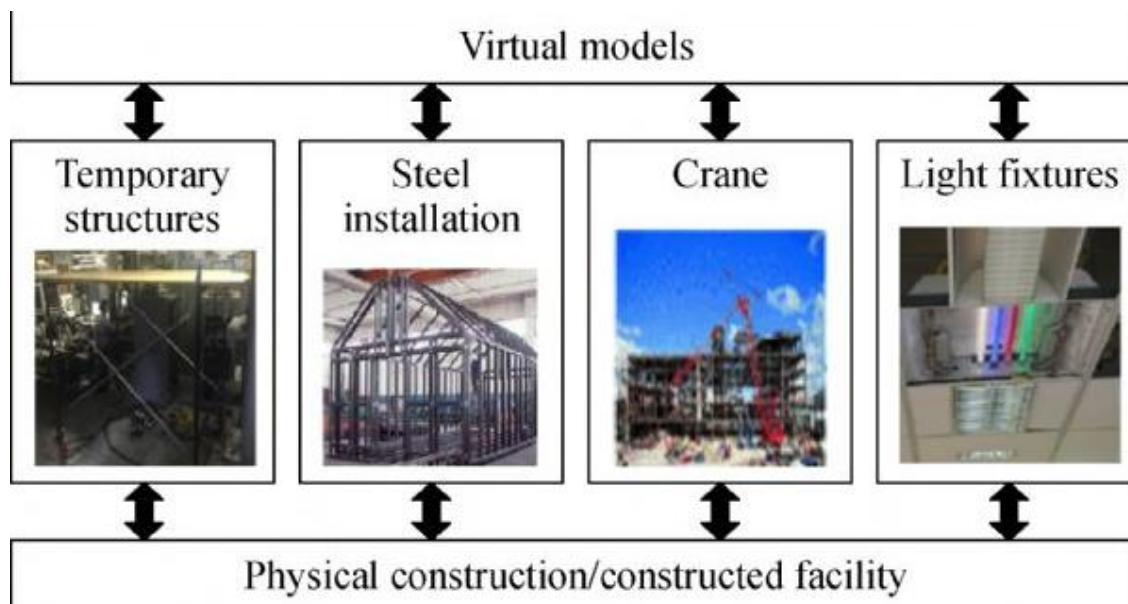


Εικόνα 1.5: Διασύνδεση φυσικού χώρου και κυβερνοχώρου σε cyber-physical συστήματα (Anumba, Akanmu, Yuan and Kan, 2020)

Τα κατασκευαστικά στοιχεία και οι διαδικασίες παρακολουθούνται με χρήση αισθητήρων και άλλων συστημάτων παρακολούθησης. Η πρόοδος και οι αλλαγές στη

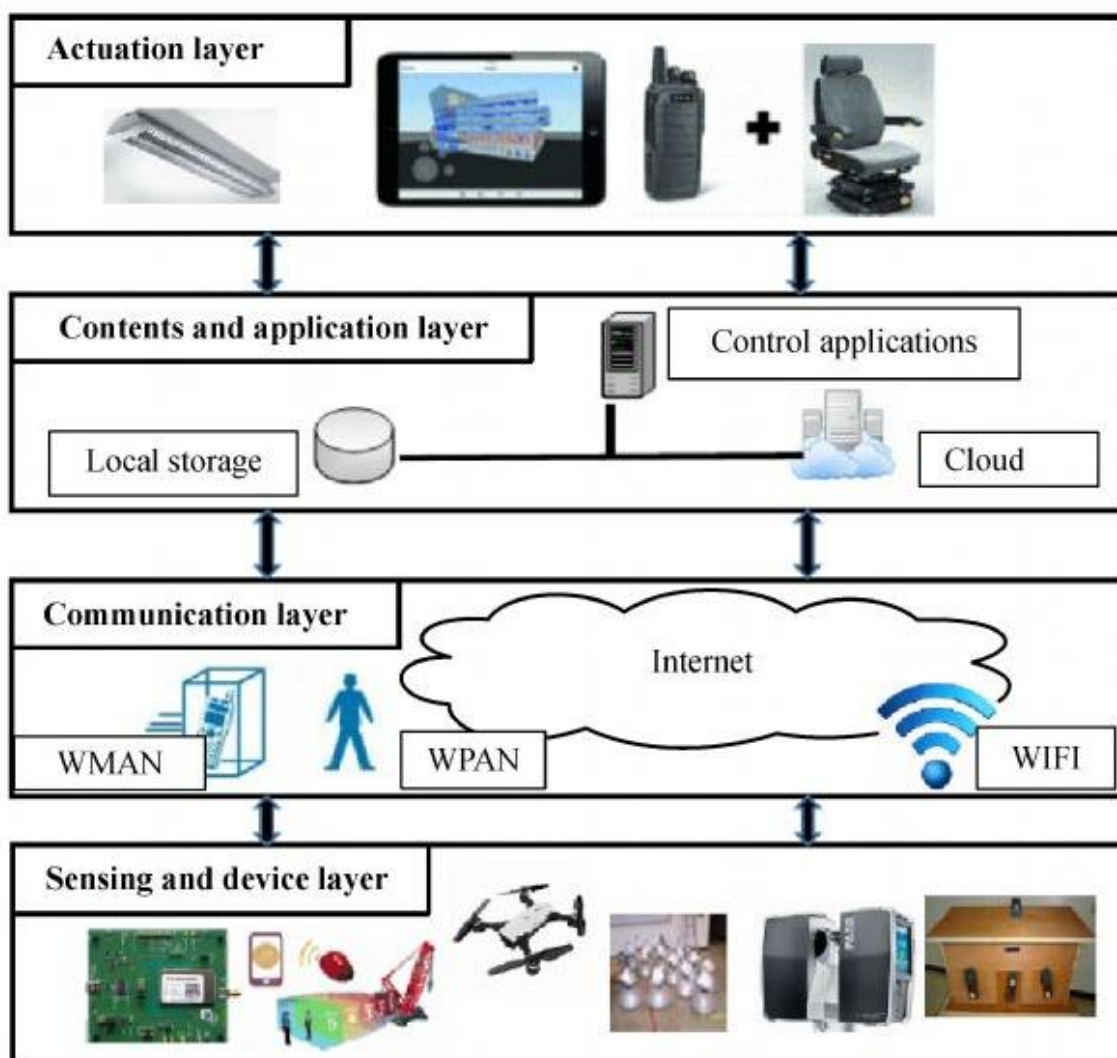
διαδικασία κατασκευής παρακολουθούνται και συντονίζονται με το αντίστοιχο ψηφιακό δίδυμο στον εικονικό χώρο για περαιτέρω δράση. Οι γέφυρες από τον ψηφιακό στο φυσικό χώρο καλύπτουν τη διάσταση ενεργοποίησης και υπαγορεύουν τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες από τους αισθητήρες για τη διαχείριση του συστήματος. Η ενεργοποίηση με αυτή την έννοια περιλαμβάνει τη μετάδοση κατάλληλων πληροφοριών για να καταστεί δυνατή η άμεση λήψη αποφάσεων ή/και η χρήση των συλλεγόμενων πληροφοριών για ενεργό έλεγχο επιτόπιων δραστηριοτήτων, πόρων ή στοιχείων κτιρίου.

Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η συνοχή μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων και της φυσικής κατασκευασμένης εγκατάστασης, η οποία απαιτεί την ανάπτυξη μιας προσέγγισης αμφίδρομου συντονισμού. Οι συμβατικές μέθοδοι ολοκλήρωσης παρακολουθούν μόνο παθητικά το φυσικό περιβάλλον, ενώ αυτή η προσέγγιση διευκολύνει τη στενή σύζευξη και τον συντονισμό μεταξύ του εικονικού και του φυσικού περιβάλλοντος. Οι υπάρχουσες προσπάθειες για την ανάπτυξη cyber-physical συστημάτων μέσω της αμφίδρομης προσέγγισης περιλαμβάνουν την παρακολούθηση και τοποθέτηση κατασκευαστικών στοιχείων (Akanmu κ.ά.,2014), την παρακολούθηση προσωρινών κατασκευών (Yuan κ.ά., 2016) και την ασφάλεια και απόδοση κινητού γερανού (Kan κ.ά., 2018).



Εικόνα 1.6: Γεφύρωση ανάμεσα σε εικονικές και φυσικές εγκαταστάσεις ψηφιακών δίδυμων

Η αρχιτεκτονική συστήματος απεικονίζει την προσέγγιση αμφίδρομου συντονισμού, η οποία βασίζεται σε τέσσερα επίπεδα, και δείχνει πώς αλληλεπιδρούν οι βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν τη διευκόλυνση του αμφίδρομου συντονισμού μεταξύ των εικονικών μοντέλων και των φυσικών τους αναπαραστάσεων. Οι λειτουργίες κάθε στρώματος της τυπικής αρχιτεκτονικής τεσσάρων επιπέδων περιγράφονται στο διάγραμμα της εικόνας 1.7.



Εικόνα 1.7: Αρχιτεκτονική τεσσάρων επιπέδων με προσέγγιση αμφίδρομου συντονισμού για cyber-physical συστήματα

### **Επίπεδο ανίχνευσης και συσκευής**

Αυτό το επίπεδο αποτελείται από αισθητήρες και άλλα συστήματα λήψης δεδομένων. Ο ρόλος των αισθητήρων είναι να παρακολουθούν διαφορετικές δραστηριότητες στη διαδικασία κατασκευής ή στοιχεία στην εγκατάσταση που κατασκευάζεται. Για παράδειγμα, το σύστημα ανίχνευσης θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTLS) παρακολουθεί τη θέση (ή τις συντεταγμένες) των κατασκευαστικών πόρων. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες παρέχουν επίσης στο προσωπικό κατασκευής πληροφορίες που απαιτούνται για τη λήψη αποφάσεων ελέγχου (π.χ. οι συντεταγμένες από το RTLS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση πιθανών κινδύνων και παρ' ολίγον ατυχημάτων). Άλλα συστήματα συλλογής δεδομένων, όπως κινητές συσκευές, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν από το προσωπικό πεδίου για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του έργου. Αυτό το επίπεδο παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα από αυτές τις πηγές και επιτρέπει την ανάκτηση πληροφοριών μέσω της διεπαφής χρήστη (UI).

### **Επίπεδο επικοινωνίας**

Αυτό το επίπεδο αναλαμβάνει σημαντικό όγκο επεξεργασίας δεδομένων και μετάδοσης πληροφοριών. Μετατρέπει τα ακατέργαστα δεδομένα που λαμβάνονται από το επίπεδο ανίχνευσης σε μορφές που μπορούν να διαβαστούν από το επίπεδο περιεχομένου και εφαρμογής. Το Διαδίκτυο και τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας βρίσκονται σε αυτό το επίπεδο. Συνδέει επίσης τους αισθητήρες και τα συστήματα λήψης δεδομένων για να επιτρέψει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των εργαζομένων στον χώρο εργασίας και άλλων στο γραφείο.

### **Περιεχόμενα και επίπεδο εφαρμογής**

Αυτό το επίπεδο αποθηκεύει τα ακατέργαστα και επεξεργασμένα δεδομένα στην τοπική βάση δεδομένων και τον διακομιστή βάσης δεδομένων, και επίσης επιτρέπει την επεξεργασία αυτών των δεδομένων μέσω εφαρμογών ελέγχου. Σε αυτό το επίπεδο, τα δεδομένα από το επίπεδο ανίχνευσης και συσκευής αποθηκεύονται και αναλύονται. Οι

πληροφορίες που αποθηκεύονται εδώ μπορεί να περιλαμβάνουν δεδομένα διαχείρισης έργου (π.χ. πόρους, κόστος, χρονοδιάγραμμα και άλλες πληροφορίες). Αυτό το επίπεδο ενημερώνεται συνεχώς με πληροφορίες που λαμβάνονται από τα επίπεδα επικοινωνίας και ενεργοποίησης. Οι εφαρμογές ελέγχου χρησιμοποιούν τα ανιχνευόμενα δεδομένα από τη βάση δεδομένων για να λάβουν αποφάσεις ελέγχου, οι οποίες μπορούν είτε να οπτικοποιηθούν χρησιμοποιώντας το εικονικό πρωτότυπο στο επίπεδο ενεργοποίησης είτε να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του φυσικού συστήματος όπως ο εξοπλισμός και οι προσωρινές δομές.

### **Επίπεδο ενεργοποίησης**

Το επίπεδο ενεργοποίησης επιτρέπει τα ακόλουθα: 1) τον φυσικό έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας ενεργοποιητές και 2) την ανάκτηση σημαντικών πληροφοριών βάσει των οποίων μπορούν να ληφθούν αποφάσεις. Αυτά μπορούν να επιτευχθούν μέσω του εικονικού μοντέλου, το οποίο μπορεί να προσπελαστεί μέσω του UI ή ενός περιβάλλοντος μικτής πραγματικότητας. Εντός του εικονικού μοντέλου, οι χρήστες έχουν ευκαιρίες για οπτικοποίηση της επίδρασης των ανιχνευόμενων πληροφοριών (από το περιεχόμενο και το επίπεδο εφαρμογής) στο σύστημα. Με τη διεπαφή χρήστη, οι χρήστες μπορούν να παρατηρούν και να παρακολουθούν τις ακατέργαστες και επεξεργασμένες πληροφορίες από το περιεχόμενο και το επίπεδο εφαρμογής. Οι χρήστες μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν τη διεπαφή χρήστη για την ενσωμάτωση βασικών αποφάσεων ελέγχου στο εικονικό μοντέλο, το οποίο είναι προσβάσιμο από το επίπεδο ανίχνευσης και συσκευής.

## 1.6 Ενεργειακή Απόδοση και Μοντέλα Πρόβλεψης Φορτίου

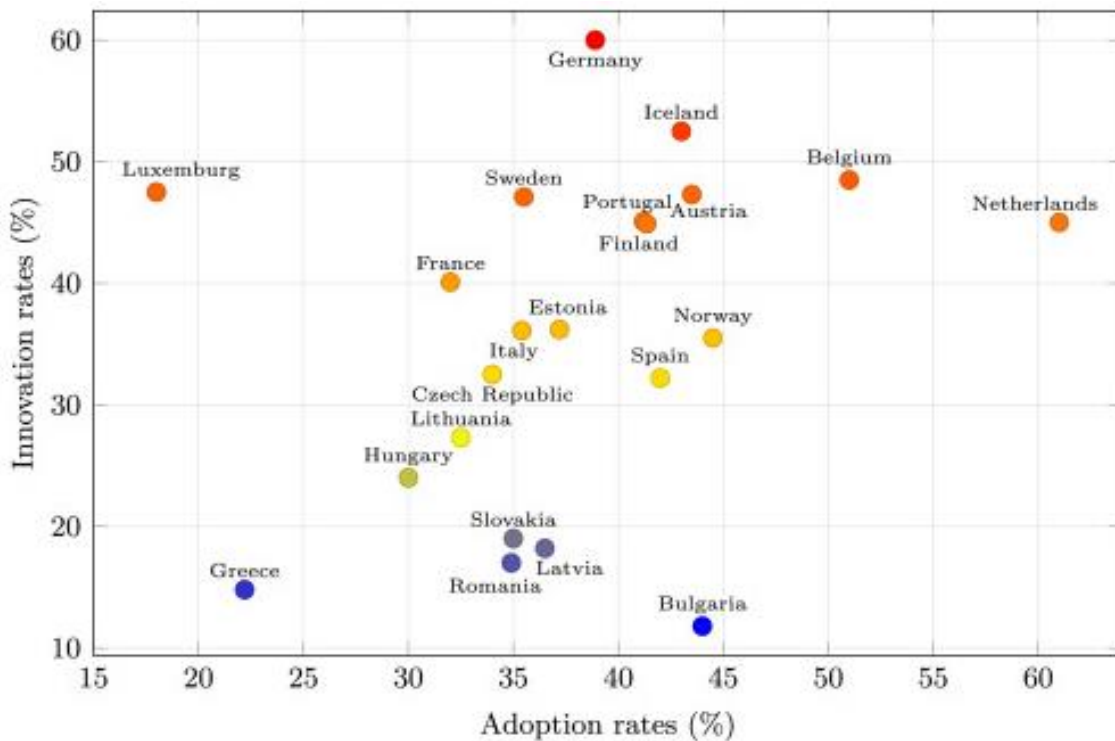
Η κατανάλωση ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες βρίσκεται σε άνοδο και μπορεί να συσχετιστεί με την ηλεκτρική ενέργεια ως ένα βολικό υποκατάστατο του καυσίμου (πετρέλαιο και φυσικό αέριο), ενεργώντας τόσο ως πρωτογενής όσο και ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας (Chalvatzis & Rubel, 2015). Αυτό καθιστά τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας τον τομέα που παράγει την υψηλότερη συγκέντρωση εκπομπών ανά πηγή, σε σύγκριση με εκείνες που καταγράφονται από άλλους τομείς (Malmodin κ.ά., 2010). Μια ατζέντα βιώσιμης ανάπτυξης είναι απαραίτητη για τη μετάβαση σε μια ενεργειακά αποδοτική οικονομία και θα συνεπάγεται μέτρα που δεν περιορίζονται σε τεχνολογίες και πολιτικές, αλλά και στην καινοτομία, όπως ορίζεται από τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης (SDG) των Ηνωμένων Εθνών (Hills κ.ά., 2018).

Σε επίπεδο ΕΕ, η επίτευξη του ευρωπαϊκού στόχου μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> έως το 2030 θα απαιτήσει αλλαγές στη συμπεριφορά των ευρωπαίων καταναλωτών (Koroleva κ.ά., 2019). Επιπλέον, μέτρα με τη μορφή διεθνών συμφωνιών, όπως το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών ή το Πρωτόκολλο του Κιότο, στοχεύουν επίσης στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Delzendeh κ.ά., 2017). Η υιοθέτηση αυτών των μέτρων, από την άλλη πλευρά, αποτελεί πρόκληση για τους καταναλωτές, καθώς μερικές φορές στερούνται της απαιτούμενης τεχνικής εμπειρογνομosύνης, χρηματικών και χρονικών πόρων για την εφαρμογή τέτοιων μέτρων διατήρησης. Οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την ενέργεια στην ΕΕ αυξάνονται σταθερά, λόγω της ταχείας καινοτομίας στην ηλεκτρονική βιομηχανία και της ζήτησης των καταναλωτών (Kowalska-Pyzalska, 2018). Για το σκοπό αυτό, ειδικά στην περίπτωση ανάπτυξης ψηφιακών διδύμων κτιρίων και εγκαταστάσεων, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη επανεξέτασης της έννοιας της εξοικονόμησης ενέργειας, με τη λήψη των απαραίτητων μέτρων καθώς οι ψηφιακές τεχνολογίες έχουν προχωρήσει τρομερά τις τελευταίες δεκαετίες, δημιουργώντας τρόπους για συγχρονισμό και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο του ενεργειακού συστήματος μέσω υπολογιστών και εικονικών μοντέλων υπηρεσιών, που προκύπτουν από δεδομένα, πληροφορίες και καταναλωτική συμπεριφορά (Stark κ.ά., 2017).

Οι καινοτόμες ενεργειακές υπηρεσίες (IES) είναι μια σημαντική απαίτηση στην προσπάθεια να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με την ενεργειακή αναποτελεσματικότητα με σκοπό την υποστήριξη της μετάβασης των καταναλωτών σε δράσεις προσανατολισμένες στην ενεργειακή βιωσιμότητα. Απαιτείται καλύτερη κατανόηση των συμπεριφορών των καταναλωτών για να προβλεφθεί το πρότυπο κατανάλωσης ενέργειας, το οποίο είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την επίτευξη μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Η επιτυχής μετάβαση σε αλλαγή συμπεριφοράς που σχετίζεται με την ενέργεια μπορεί να διευκολυνθεί με έξυπνες συστάσεις. Ένα ευφυές σύστημα συστάσεων παρέχει πληροφορίες που σχετίζονται με την επιλογή εναλλακτικής αιτίας δράσης, επιτρέποντας στους καταναλωτές να κατευθύνονται σε υπηρεσίες που είναι προσαρμοσμένες για αυτούς σε έναν μεγάλο χώρο πιθανών εναλλακτικών (Aguilar κ.ά., 2017). Η εισαγωγή εξατομικευμένων συστάσεων για τη διαχείριση από πλευράς ζήτησης (DSM) έχει τεράστιες δυνατότητες για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των καταναλωτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο λίγες δημοσιεύσεις περιέχουν στοιχεία που περιγράφουν συσχέτιση που συνδέει τον καταναλωτή ενέργειας, την εξοικονόμηση ενέργειας, το ψηφιακό δίδυμο και το σύστημα συστάσεων. Παρά τη γνώση των οφελών που σχετίζονται και την προθυμία των καταναλωτών να υιοθετήσουν το IES, δεν μεταφράζεται αυτόματα σε κάποια επιθυμητή συμπεριφορά.

Η ψηφιακή καινοτομία στην ενεργειακή βιομηχανία υποβοηθούμενη από την εμφάνιση του IoT έχει παράσχει βολική προσέγγιση για την ενσωμάτωση μη ανθρώπινων στοιχείων στις διαχειριστικές στρατηγικές της ψηφιακής καινοτομίας και του αντίστοιχου οικοσυστήματος (Kolloch and Dellermann, 2018). Κάποιοι ερευνητές προτείνουν την ανάλυση της ενεργειακής τεχνικής καινοτομίας από την άποψη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ορυκτής ενέργειας (Yang κ.ά., 2019). Όπως αναφέρουν, ο αντίκτυπος της καινοτόμου τεχνολογίας στην ορυκτή ενέργεια υπερβαίνει αυτόν των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όταν εξετάζεται η τιμή, καθιστώντας την τιμή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να πέσει κάτω από τον βέλτιστο ρυθμό, ενώ θέτει τη ζήτηση στην απαίτηση μηχανισμού τιμών για την ανάπτυξη τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η πρόσφατη ακαδημαϊκή βιβλιογραφία έχει δώσει μεγάλη προσοχή στην προσέγγιση της έννοιας του

συστήματος στη χάραξη πολιτικής και στα συστήματα καινοτομίας (Sharif, 2006) καθώς η υποστήριξη της κυβερνητικής πολιτικής πρέπει να είναι ένας παράγοντας που επιτρέπει την ανάπτυξη της προτεινόμενης τεχνικής καινοτόμου τεχνολογίας. Η καινοτομία στον ενεργειακό τομέα απαιτεί καθορισμένο σύνολο δεικτών για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με το σύστημα καινοτομίας (Miremadi κ.ά., 2018).



Εικόνα 1.8: Ρυθμός υιοθέτησης καινοτόμων υπηρεσιών για διαφορετικές χώρες της Ε.Ε.

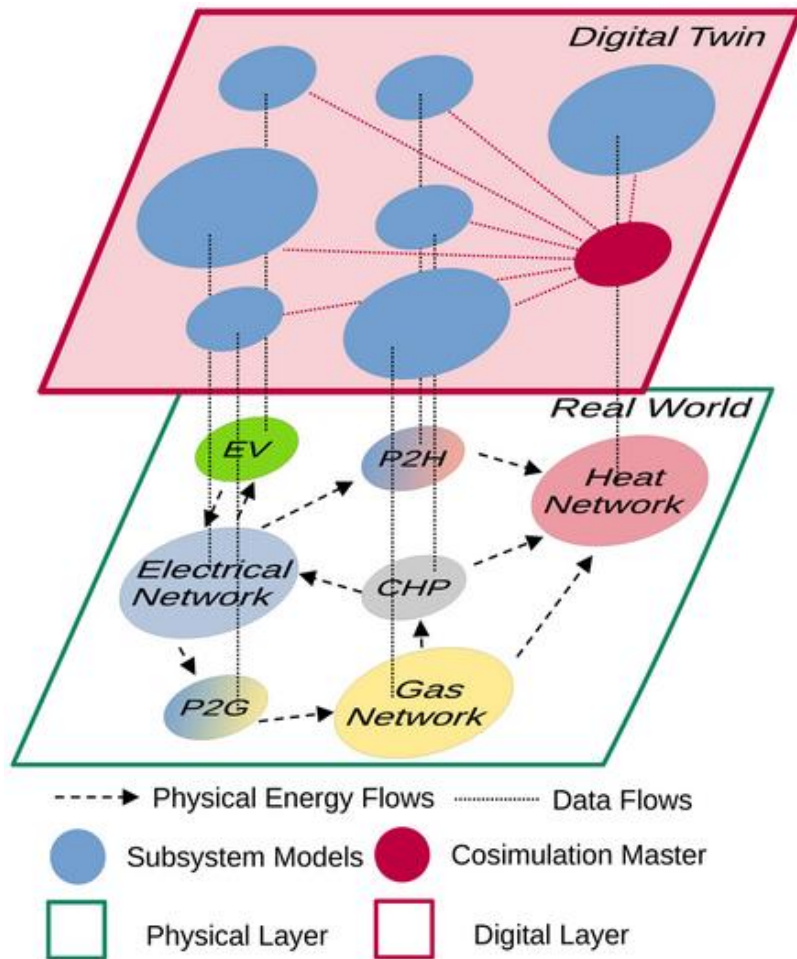
Η ψηφιοποίηση έχει καταγράψει εξαιρετικά διάχυτη σύνδεση και αυξημένη ενοποίηση με τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα με αποτέλεσμα την αυξανόμενη και αβίαστη συνδεσιμότητα μεταξύ εικονικών μηχανών, δεδομένων και του φυσικού τους περιβάλλοντος. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να περιγραφεί ως πρωτοπόρος του Industry 4.0 και εικονική αναπαράσταση σπάνιων ή πραγματικών περιουσιακών στοιχείων όπως υπηρεσίες, προϊόντα ή μηχανή με μοντέλα που είναι ικανά να επιτύχουν αλλαγή συμπεριφοράς (Uhlmann κ.ά., 2017; Rasheed κ.ά., 2020) χρησιμοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και έξυπνες αναλύσεις (Brosinsky κ.ά., 2018, Fuller κ.ά., 2020) που



υποστηρίζονται με λογισμικό οπτικοποίησης και διεπαφές που παράγουν πληροφορίες σχετίζεται με την κατάσταση του μηχανήματος (Zhou κ.ά., 2019) όπως μετρήσεις απόδοσης, κατάσταση λειτουργίας του μηχανήματος, κατανάλωση ενέργειας, βελτιώσεις στόχευσης ποιότητας προϊόντων στην απόδοση του ενεργειακού συστήματος. Ένα πλαίσιο ψηφιακών διδύμων προσανατολισμένο στον καταναλωτή μπορεί να προκύψει από τη μεθοδολογία μοντελοποίησης που ενσωματώνει ιστορικά φορτία και ανάλυση δεδομένων μέσω κοινωνικής δικτύωσης, βραχυπρόθεσμη/μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ενέργειας, μοντέλα μηχανικής μάθησης και οπτικοποίηση δεδομένων για την επίτευξη αναδημιουργίας ψηφιακών διδύμων του ενεργειακού προφίλ των καταναλωτών με βάση σχετικά με το πρότυπο ενεργειακής συμπεριφοράς (Havard κ.ά., 2019). Αυτή η προσέγγιση υποστηρίζεται από τη διαλειτουργικότητα προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης φορτίου και ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο οι καταναλωτές πρέπει να διαθέτουν λιγότερες τεχνικές γνώσεις για το ενεργειακό σύστημα και προηγμένα αναλυτικά μοντέλα εξάγουν γνώση από την ψηφιακή υπογραφή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων σε σχέση με τη συγκριτική αξιολόγηση ενέργειας αποτελεί μια προσέγγιση για την ενημέρωση σχετικά με τη λήψη βέλτιστων ενεργειακών αποφάσεων προς καλύτερες στρατηγικές για τον εκσυγχρονισμό της ενέργειας και τη διαχείριση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Για να επιτευχθεί σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στον καταναλωτή χρησιμοποιώντας ψηφιακά δίδυμα, είναι σημαντικό να περιγραφούν οι βασικές τεχνολογίες (Qi κ.ά., 2019, Fuller κ.ά., 2020) και οι παράμετροι που υποστηρίζουν το περιγραφόμενο πλαίσιο. Η είσοδος που δέχεται το μοντέλο ψηφιακών είναι η έξοδος που λαμβάνεται από το στάδιο συλλογής δεδομένων και γνώσης, με στόχευση εξόδου μείωσης ενέργειας. Αυτές περιλαμβάνουν την πλατφόρμα IoT, την πρόβλεψη ενέργειας και την προηγμένη ανάλυση δεδομένων. Η εφαρμογή της τεχνολογίας πληροφοριών όπως το IoT σε συνδυασμό με έξυπνες συσκευές με δυνατότητα λήψης δεδομένων που παράγονται κατά τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος και υποστηρίζονται από την ικανότητα εξόρυξης δεδομένων της Τεχνητής νοημοσύνης (AI) ανοίγουν το δρόμο για μια νέα εποχή του σχεδιασμού, της κατασκευής και της εξυπηρέτησης προϊόντων βάσει δεδομένων (Tao κ.ά., 2017). Οι πλατφόρμες IoT που

παράγουν δεδομένα από φυσικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με ιστορικά δεδομένα που παρέχονται από προηγούμενη κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων (Ruohomaki κ.ά., 2018). Ομοίως, τεχνολογίες όπως το Energy Internet (Hong κ.ά., 2018), το Smart Grid (Qureshi κ.ά., 2020) και το Industrial Internet of Things (Cheng κ.ά., 2020) παρέχουν επίσης έξυπνες δυνατότητες ανίχνευσης και ασφαλές δίκτυο μετάδοσης για την υλοποίηση του πλαισίου ψηφιακών διδύμων προσανατολισμένων στον καταναλωτή.



Εικόνα 1.9: Ψηφιακό δίδυμο σε ενσωματωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Τα δεδομένα στην ακατέργαστη μορφή τους δεν είναι χρήσιμα ούτε για σύστημα συστάσεων ούτε για πρόβλεψη ενέργειας, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία δεδομένων προκειμένου να εξαχθούν σημαντικά χαρακτηριστικά όπως η θερμοκρασία, οι δημογραφικές πληροφορίες, οι γεωγραφικές πληροφορίες κ.λπ. Τα

δεδομένα που συλλέγονται από έξυπνους μετρητές, μετεωρολογικό σταθμό και ιστορική κατανάλωση χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των παραμέτρων που απαιτούνται για την υλοποίηση και την προσομοίωση ψηφιακού διδύμου (Karanjkar κ.ά., 2018). Τα δεδομένα που σχετίζονται με τους καταναλωτές συλλέγονται, μετρούνται, υποβάλλονται σε επεξεργασία και αναλύονται για την ανάπτυξη εξατομικευμένων και βέλτιστων ενεργειακών στρατηγικών (Castelli κ.ά., 2019). Μεγάλη ποσότητα ετερογενών δεδομένων κατανάλωσης που περιγράφουν διάφορα ενεργειακά φαινόμενα είναι διαισθητικά χρήσιμα στη μοντελοποίηση αναλυτικών εργαλείων που βασίζονται στη μηχανική μάθηση. Αυτά τα ετερογενή δεδομένα που λαμβάνονται από σενάρια πραγματικού κόσμου αντιπροσωπεύουν ένα πολύτιμο και πολύτιμο συστατικό, χρήσιμο για την εκτέλεση υπηρεσιών που θεωρούνται περίπλοκες.

Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης βοηθά στην παροχή χρήσιμης εικόνας σε αυτά τα δεδομένα για την αυτοματοποιημένη ικανότητα λήψης αποφάσεων. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν προβλέψεις και βασικά ιστορικά ενεργειακά δεδομένα που περιλαμβάνουν δεδομένα ωριαίας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχονται από υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, χαρακτηριστικά μέσα κοινωνικής δικτύωσης, οικιστικά χαρακτηριστικά μαζί με χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την πολιτική, δεδομένα καιρού, όπως ξηρό λαμπτήρα εξωτερικού χώρου, σχετική υγρασία εξωτερικού χώρου, πυκνότητα εξωτερικού αέρα, θερμοκρασία εδάφους, ζώνη αλλά και τα δεδομένα κτιρίου, όπως ο φωτισμός, η κατανάλωση ενέργειας και ο αριθμός των επιβατών. Αυτά τα χαρακτηριστικά θεωρούνται ως παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή δυναμική των καταναλωτών. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει την ανασκόπηση των σχετικών εργασιών στα ψηφιακά δίδυμα. Ένα ισχυρό μοντέλο πρόβλεψης φορτίου που εκτείνεται σε διαφορετικό χρονικό ορίζοντα είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος ισχύος (Sangrody κ.ά., 2018) και έχει εντοπιστεί ότι παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της πρακτικής λειτουργίας των ψηφιακών διδύμων. Η πρώιμη έρευνα στην πρόβλεψη του ενεργειακού φορτίου έχει επικεντρωθεί στην ανάλυση παλινδρόμησης, ενώ ένας συνδυασμός πολλαπλών μετα-ευρετικών τεχνικών όπως η μηχανή γενετικής υποστήριξης διανύσματος

(SVM) και ο αλγόριθμος νευρωνικών δικτύων Firefly έχουν επίσης αποδειχθεί αποτελεσματικοί (Fallah κ.ά., 2018).

Ερευνητές στο Εθνικό Εργαστήριο Oak Ridge ανέπτυξαν ένα μοντέλο που μπορεί να προσομοιώσει το ενεργειακό προφίλ κάθε κτιρίου στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιώντας δημόσια δεδομένα. Το πρόγραμμα θα βοηθήσει τις επιχειρήσεις, τους ιδιοκτήτες κατοικιών και τις εταιρείες κοινής ωφέλειας να μειώσουν τη χρήση ενέργειας και τις εκπομπές άνθρακα. Το Automatic Building Energy Modeling, ή AutoBEM, δημιουργεί ψηφιακά δίδυμα για να ενημερώσει τις προσπάθειες ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων. Μπορεί να παρέχει ενεργειακές λεπτομέρειες για 129 εκατομμύρια κτίρια σε μία ολόκληρη χώρα. Δεδομένου ότι τα κτίρια αντιπροσωπεύουν το 40% της κατανάλωσης ενέργειας της και το 75% της ηλεκτρικής ενέργειας (), το AutoBEM θα μπορούσε να είναι ένα σημαντικό βήμα προς την επίτευξη του τελικού στόχου της χώρας για καθαρές μηδενικές εκπομπές άνθρακα έως το 2050, δήλωσαν αξιωματούχοι του ORNL. Το έργο ξεκίνησε το 2015 με στόχο τη χρήση δημοσίως διαθέσιμων πληροφοριών για συγκεκριμένα κτίρια για τον προσδιορισμό της χρήσης ενέργειας σε ένα δεδομένο αστικό περιβάλλον. Η ενεργειακή μοντελοποίηση σε αστική κλίμακα έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια χάρη στον αυξημένο όγκο των διαθέσιμων δεδομένων, τις υπολογιστικές δυνατότητες και το λογισμικό ανοιχτού κώδικα.

Οι Xie κ.ά. (2019) πρότειναν ένα μοντέλο πρόβλεψης ζήτησης για εφαρμογή ψηφιακών διδύμων στο ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιώντας τη συνήθη διαφορική εξίσωση που βασίζεται στο Deep Neural Network (DNN). Τα αποτελέσματα της μελέτης από μια βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ζήτησης οικιακού φορτίου έδειξαν ένα αξιοσημείωτο επίπεδο ακρίβειας για μια τεράστια γκάμα εφαρμογών πρόβλεψης, ιδίως σε μελλοντικές προβλέψεις κατανάλωσης ενέργειας και τιμή αγοράς για οικονομική βελτιστοποίηση του δικτύου. Σε έρευνα των Damiani κ.ά. (2019) παρουσιάστηκε μια εφαρμογή ψηφιακών διδύμων ενός βραχυπρόθεσμου μοντέλου πρόβλεψης τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για βελτιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας σε κέντρα υλικοτεχνικής υποστήριξης χρησιμοποιώντας μοντέλο αυτόματης παλινδρόμησης. Οι συγγραφείς προσδιόρισαν την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ως κύριο δείκτη απόδοσης στη λειτουργία κέντρων

εφοδιαστικής με υψηλή ζήτηση ενέργειας. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, παρουσίασαν ένα καινοτόμο και συνεργικό εσωτερικό εργαλείο κατανάλωσης ενέργειας για την καλύτερη προγνωστική ανάλυση τιμών. Έχει επίσης προταθεί ο έλεγχος εξαερισμού που βασίζεται σε ψηφιακό δίδυμο για εξοικονόμηση ενέργειας στη λειτουργία εξόρυξης (Kychkin & Nikolaev, 2020). Οι Tan κ.ά. (2019) περιέγραψαν 20 τύπους τεχνολογιών που βοηθούν στην εξοικονόμηση ενέργειας και στα μοντέλα μείωσης των εκπομπών, τα οποία υποδιαιρούνται περαιτέρω σε 4 κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων της εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας, ενέργειας και άνθρακα, καθώς και τεχνολογιών σύνδεσης που βασίζονται στο αποτέλεσμα εξοικονόμησης ενέργειας των αναλυτικών ποικιλιών ενέργειας.

Οι υλοποιήσεις ψηφιακών διδύμων ενσωματώνουν μια διαδικτυακή βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιώντας ενσωματωμένα μοντέλα πρόβλεψης γραμμικής παλινδρόμησης. Οι O'Dwyer κ.ά. (2020) πρότειναν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ψηφιακού διδύμου διαχείρισης ενέργειας για την επίτευξη συντονισμού σε πολυδιανυσματικά έξυπνα ενεργειακά συστήματα. Το προτεινόμενο εργαλείο υποστηρίζεται από υποσυστήματα υπηρεσιών πρόβλεψης, βελτιστοποίησης και συντονισμού που εφαρμόζονται με χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN), gradient boosting και k-means αλγόριθμων ομαδοποίησης για περίπου 97% περικοπή της παραβίασης υψηλών περιορισμών συστήματος. Έχει υποστηριχθεί επίσης η εφαρμογή του Industry 4.0 για την ενοποίηση εφαρμογών κατανεμημένων ενεργειακών πόρων που βασίζονται στην εξερεύνηση βασικών λειτουργικών και τεχνικών απαιτήσεων εικονικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (Nwauka κ.ά., 2018). Το προτεινόμενο πλαίσιο έξυπνης διαχείρισης πραγματοποίησε βελτιστοποίηση χρονοδιαγράμματος χρησιμοποιώντας πρόβλεψη φορτίου σε πραγματικό χρόνο για την επόμενη ημέρα του φορτίου, τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και το προφίλ παραγωγής.

Μπορεί να ληφθεί το συμπέρασμα ότι ο ενεργειακός εφοδιασμός στο μέλλον θα χαρακτηρίζεται από οικονομία και εστίαση στον καταναλωτή, αντί να κυριαρχεί η παραγωγή. Οι ψηφιακές τεχνολογίες έχουν θεωρηθεί ότι είναι αποτελεσματικές ως παράγοντας καινοτομίας σε διάφορους οικονομικούς τομείς. Η έννοια της ψηφιοποίησης στον ενεργειακό τομέα βοηθά στη σταθεροποίηση του δικτύου μεταφοράς απλώς

σταθεροποιώντας το απόθεμα από κυμαινόμενες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2018). Η σύνδεση αντικειμένων σε μικροεπίπεδο χρησιμοποιώντας το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) ανοίγει μια άνευ προηγουμένου πύλη που επιτρέπει στις συσκευές να συμβάλλουν στο ενεργειακό σύστημα που δημιουργεί ακόμη μεγαλύτερο οικοσύστημα για τους καταναμημένους ενεργειακούς πόρους. Με βάση τα παραπάνω, θα πρέπει να εξεταστούν και να ληφθούν υπόψιν τα νομικά, ρυθμιστικά σχήματα και οι πολιτικές που είναι διαθέσιμες σε όλο τον κόσμο και παρέχει περαιτέρω οδηγίες για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής.

Πηγή	Μεθοδολογία	Εφαρμογή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Brosinsky κ.ά. (2018)</b>	Dynamic digital mirror	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS)	Ταχύτητα λειτουργίας πλατφόρμας	Δυσκολίες στην απόκτηση λεπτομερούς μοντελοποίησης του συστήματος ισχύος
<b>Zhou κ.ά. (2019)</b>	Online analysis digital twin	Σύστημα EMS για ηλεκτρικό δίκτυο	Γρήγορη πλήρης διαδικτυακή ανάλυση με χρήση μοντέλου μεγάλης κλίμακας βάσει δεδομένων	Ύπαρξη καθυστέρησης κάποιων δευτερολέπτων
<b>Francisco κ.ά. (2020)</b>	Regression	Τροφοδοτικό πανεπιστημιούπολης	Εξετάζει τη χρονική διάσταση για το benchmarking ενέργειας	Δυσκολίες στον καθορισμό του επιπέδου συμφωνίας για την απόδοση του κτιρίου

Πίνακας 2: Βιβλιογραφία σχετικά με την απόδοση ενέργειας και τα ψηφιακά δίδυμα

### 1.6.1 Χαρακτηριστικά συστάσεων πολιτικής για εξοικονόμηση ενέργειας

Η πολιτική μπορεί να περιγραφεί ως μια δυναμική διαδικασία που σχετίζεται με το άθροισμα των ενεργειών, των κανονισμών, των νόμων και άλλων σχετικών παραγόντων που

επηρεάζουν την εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ των καταναλωτών ενέργειας. Οι συστάσεις πολιτικής αποτελούν μια καλά ερευνητική κατηγορία για την εξοικονόμηση ενέργειας (Alsalemi κ.ά., 2019). Οι περισσότερες χώρες εκδίδουν κανονισμούς και νόμους που υποστηρίζουν την εξοικονόμηση ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εισαγάγει πολιτικές που ενθαρρύνουν τα κράτη μέλη να υιοθετήσουν μέτρα με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας (Χυ κ.ά., 2017). Σε μια παρόμοια κίνηση, οι ΗΠΑ έχουν ορίσει ομοσπονδιακές υπηρεσίες για την επίβλεψη της εξοικονόμησης ενέργειας βάσει του νόμου περί πολιτικής εξοικονόμησης ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών του 1988, όπως τροποποιήθηκε. Η ενεργειακή στρατηγική της Νέας Ζηλανδίας 2011–2021 προσδιορίζει την αποτελεσματική χρήση της ενέργειας ως κύριο σημείο στους τέσσερις τομείς ενδιαφέροντος στη στρατηγική ώθηση προς την εξοικονόμηση ενέργειας. Ακολουθώντας αυτή την τάση, η κινεζική κυβέρνηση εισήγαγε μια σειρά από συστάσεις πολιτικής για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (Zhou κ.ά., 2019).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση που σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σημαντική κινητήρια δύναμη για μεταρρυθμίσεις πολιτικής στον ενεργειακό τομέα (Zhou κ.ά., 2019). Στο Ηνωμένο Βασίλειο, εφαρμόστηκε η Πράσινη Συμφωνία, μια πρωτοβουλία του Υπουργείου Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, που έχει στόχο την πολιτική ενεργειακής απόδοσης για την οικιακή ενέργεια (Morton κ.ά., 2018). Ένα παρόμοιο μέτρο αποτελούν και οι πολιτικές πληροφόρησης που βασίζονται σε ενεργειακή συγκριτική αξιολόγηση (EU Energy Label και US lighting label) για την αντιμετώπιση του φραγμού πληροφοριών με την εφαρμογή του ENERGY STAR σε ορισμένα κράτη μέλη της ΕΕ και στις ΗΠΑ. Τέλος, οι κώδικες οικοδόμησης και τα πρότυπα συσκευών προσδιορίζονται ως σημαντικά μέτρα ρυθμιστικής πολιτικής που στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ομοίως, η πολιτική που στοχεύει σε συστάσεις απόδοσης με γνώμονα τον καταναλωτή με βάση τα ψηφιακά δίδυμα μπορεί να ενθαρρύνει τους καταναλωτές να λάβουν μέτρα ενεργειακής απόδοσης.

### **1.6.2.Χαρακτηριστικά κτιρίου**

Η ενεργειακή απόδοση σε ένα διαμέρισμα κατοικιών σχετίζεται κυρίως με συσκευές και φωτισμό, εξαερισμό, θέρμανση, ψύξη και ψύξη (Moglia κ.ά., 2018). Τα κτίρια κατοικιών

αντιπροσωπεύουν επί του παρόντος περίπου το 40% της κατανάλωσης ενέργειας ως ο σημαντικός τομέας κατανάλωσης εντός της ΕΕ (Komros κ.ά., 2019) και απαιτούνται μέτρα για την απόκτηση των απαραίτητων χαρακτηριστικών για τον ακριβή προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας σε κατοικίες. Στο ίδιο πνεύμα, η σπατάλη ενέργειας στον οικιακό τομέα είναι υψηλή λόγω ορισμένων παραγόντων που συμβάλλουν. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η χαμηλή διείσδυση τεχνολογιών που επιτρέπουν την αποδοτικότητα στη χρήση της ενέργειας από τους καταναλωτές. Ένα άλλο είναι η δυσκολία στον ποσοτικό προσδιορισμό και τη μοντελοποίηση του επιπέδου άνεσης των χρηστών λόγω της ανισότητας μεταξύ των μεμονωμένων χρηστών που καθιστούν την εγκατάσταση αυτοματοποιημένων μονάδων διαχείρισης ενέργειας κτιρίων δύσκολη (Shaikh κ.ά., 2014).

Οι ερευνητές εντοπίζουν ενδιαφέρουσες προσεγγίσεις και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με συστάσεις που βασίζονται στη βελτιστοποίηση της οικιακής κατανάλωσης ενέργειας. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κατανάλωσης ενέργειας σε κατοικίες μπορεί να συμβάλει στην απόδοση περίπου 40% στην ενέργεια που καταναλώνεται στα κτίρια (Kamilaris κ.ά., 2014). Οι Hoicka και Parker (2017) πρότειναν προσεγγίσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα σπίτια. Οι οικιακές εγκαταστάσεις θεωρήθηκαν ως σύστημα, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας από 50% έως 80% εάν ακολουθηθούν τα καθορισμένα στάδια.

### **1.6.3 Επιχειρηματικά χαρακτηριστικά**

Τα χαρακτηριστικά που εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιούν δεδομένα που σχετίζονται με επιχειρήσεις, τα οποία θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη φύση του εξοπλισμού, το επίπεδο εισοδήματος, τις συσκευές ή τη μηχανή που χρησιμοποιούνται για παραγωγή. Οι συστάσεις δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τα προφίλ κατανάλωσης και τη δράση των καταναλωτών που μπορεί να είναι με τη μορφή θερμότητας που παράγεται από ηλεκτρικούς κινητήρες. Οι επιχειρήσεις φιλοξενίας υιοθετούν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης του άνθρακα ως μέρος των εταιρικών κοινωνικών τους ευθυνών (Lee & Brusilovsky, 2018). Έχει επίσης προταθεί τεχνική συνεργατικού φιλτραρίσματος πολλαπλών κριτηρίων για σύστημα συστάσεων που



βασίζεται στην εκμάθηση προτιμήσεων των ξενοδοχείων εξοικονόμησης ενέργειας (Nilashi κ.ά., 2019). Σε αυτή την προσέγγιση, η προτίμηση στην εγκατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας προβλέφθηκε χρησιμοποιώντας το Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (2015), οι προγραμματιστές επιχειρήσεων μπορούν να επιλέξουν να δώσουν προσοχή σε χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν το υποσύνολο μιας Μικρής και μεσαίας επιχείρησης (ΜμΕ), μερικά από αυτά περιλαμβάνουν: την περιοχή λειτουργίας, το μέγεθος της εταιρείας, εφοδιαστικής αλυσίδας και του επιχειρηματικού τομέα. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι δυνητικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην ενεργειακή απόδοση στις ΜμΕ. Άλλοι λιγότερο απτές παράγοντες όπως ο ανταγωνισμός, η αποφυγή διαταραχών, η εμπειρία των καταναλωτών και η ατμόσφαιρα έχουν επίσης εντοπιστεί (DECC -Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής του Ηνωμένου Βασιλείου, 2014).

#### **1.6.4 Σύσταση βιομηχανικής εξοικονόμησης ενέργειας**

Για να ευδοκιμήσει μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, χρειάζονται βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση καθώς το 33% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας είναι άμεσο αποτέλεσμα βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε βιομηχανική κλίμακα δεν έχει μόνο τεράστια επίδραση στο περιβάλλον, αλλά οδηγεί επίσης σε μείωση του CE και της ποσότητας GHG που εκπέμπεται ενώ ενισχύει την ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας (Johansson & Thollander, 2018). Με τη μείωση του προφίλ της κατανάλωσης ενέργειας μιας εταιρείας, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες για βελτίωση της κερδοφορίας. Παρόλα αυτά, οι εταιρείες συχνά υστερούν στο να υιοθετήσουν τα διάφορα μέτρα ενεργειακής απόδοσης που είναι διαθέσιμα, γνωστά ως χάσμα στην ενεργειακή απόδοση (Martin κ.ά., 2012).

Προηγούμενες ερευνητικές εργασίες προς αυτή την κατεύθυνση έδειξαν μεγάλες δυνατότητες βελτίωσης της απόδοσης στη βιομηχανική κατανάλωση ενέργειας. Παρουσιάστηκε μια μελέτη σχετικά με τις κινητήριες δυνάμεις και τα εμπόδια που σχετίζονται με την υιοθέτηση της ενεργειακής απόδοσης στους βιομηχανικούς τομείς και

συστάσεις για τη διαχείριση ενέργειας εντός των κατοικιών (Johansson and Thollander, 2018). Η εργασία των Trivedi and Bhatt (2018) παρέχει μια επισκόπηση σχετικά με την εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στη μεταποιητική βιομηχανία. Ανέφεραν ότι η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική καθώς υπάρχουν μέτρα που επιτρέπουν τη διατήρηση σε όλες τις μονάδες παραγωγής. Συζήτησαν περαιτέρω τεχνολογικά μέτρα που διασφαλίζουν την εξοικονόμηση ενέργειας, τα οποία κατέληξαν σε συστάσεις για ορισμένες ενέργειες που προτείνουν τη βελτιστοποίηση της ενέργειας στις βιομηχανίες τροφίμων, ψωμιού και μετάλλων. Σε μια παρόμοια εργασία που παρουσιάζουν οι Agya κ.ά. (2016) ο ενεργειακός έλεγχος στη βιομηχανία αλουμινίου πραγματοποιήθηκε με παρατήρηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, online και offline, με αποτέλεσμα 5 τύπους πολύτιμων συστάσεων για φορτία που σχετίζονται με: κινητήρες, φωτισμό, ανεμιστήρες και συμπιεστή.

## **1.7 Νομικό Πλαίσιο και Ρυθμίσεις**

Τα ψηφιακά δίδυμα σε συνδυασμό με τα μοντέλα εξοικονόμησης ενέργειας, έχουν πρόσβαση σε δορυφορικές εικόνες, προβολές δρόμου και άλλα δημόσια διαθέσιμα δεδομένα για να εξακριβώσουν λεπτομέρειες του κτιρίου, από τον αριθμό των παραθύρων και των ορόφων έως τη θέρμανση, τον εξαερισμό και τον τύπο στέγης. Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για να μετατραπούν τα δεδομένα σε τρισδιάστατο αποτύπωμα του κτιρίου. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια σε ένα υπολογιστικό μοντέλο υψηλής απόδοσης που προβλέπει ποιες τεχνολογίες, όπως ηλιακά πάνελ, αντλίες θερμότητας, έξυπνοι θερμοστάτες ή θερμοσίφωνες με ενεργειακή απόδοση, μπορούν να εγκατασταθούν για εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι πολιτικοί μηχανικοί μπορούν να το χρησιμοποιήσουν για να εξετάσουν οικοδομές ή ακόμη και ολόκληρες γειτονίες για να εντοπίσουν τις αδυναμίες στην ενεργειακή τους υποδομή (Mookerjee, 2021). Το λογισμικό μπορεί επίσης να βοηθήσει στο να εντοπιστούν οι περιοχές που θα ωφεληθούν περισσότερο από μια αναβάθμιση κτιρίου. Πριν από το τα ψηφιακά δίδυμα, οι βιομηχανίες «δεν είχαν τις πληροφορίες που χρειάζονται για να λάβουν δραστικές επιχειρηματικές αποφάσεις σχετικά με τον τρόπο βελτίωσης της

ενεργειακής απόδοσης». Σε ό,τι αφορά το νομικό πλαίσιο που εντάσσονται τα ψηφιακά δίδυμα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ήδη προτείνει μια ψηφιακή πυξίδα μέχρι το 2030, με συγκεκριμένους όρους διασφαλίζοντας την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των ψηφιακών αλυσίδων εφοδιασμού.

Η ευρωπαϊκή προσέγγιση για ψηφιακό μετασχηματισμό ενισχύει την ανταγωνιστικότητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και θέτει τις κατάλληλες βάσεις για την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων εναρμονισμένων με το ισχύον νομικό πλαίσιο των χωρών της. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ήδη επενδύσει σημαντικά ποσά για να αποφέρουν οφέλη στην κοινωνία και την οικονομία. Στην ανακοίνωσή της, η Επιτροπή προτείνει μια ευρωπαϊκή προσέγγιση που βασίζεται σε τρεις πυλώνες:

- **Πρώθηση των τεχνολογικών εξελίξεων και ενθάρρυνση της υιοθέτησής τους από τον δημόσιο και τον ιδιωτικό τομέα.** Η Επιτροπή αύξησε τις ετήσιες επενδύσεις της στην τεχνητή νοημοσύνη κατά 70% στο πλαίσιο του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας Horizon 2020. Αναμένεται να φτάσει το 1,5 δισεκατομμύριο ευρώ για την περίοδο 2018-2020. Ο λόγος για αυτό είναι η σύνδεση των ερευνητικών κέντρων τεχνητής νοημοσύνης σε όλη την ΕΕ και τις ατομικές προσπάθειες των εμπλεκομένων.
- **Κοινωνικοοικονομικές αλλαγές.** Η Επιτροπή υποστηρίζει συνεργασίες επιχειρήσεων-εκπαίδευσης για την προσέλκυση και διατήρηση περισσότερων ταλέντων στην Ευρώπη. Δημιουργούνται ειδικά προγράμματα κατάρτισης και επανεκπαίδευσης για επαγγελματίες, υποστηρίζονται ψηφιακές δεξιότητες και ικανότητες, καθώς επίσης και η επιχειρηματικότητα και η δημιουργικότητα και θα ενθαρρύνοντας τα κράτη μέλη να εκσυγχρονίσουν συστήματα εκπαίδευσης και κατάρτισης.
- **Διασφάλιση κατάλληλου ηθικού και νομικού πλαισίου.** Στις 19 Φεβρουαρίου 2020, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε μια Λευκή Βίβλο με στόχο την προώθηση ενός ευρωπαϊκού οικοσυστήματος αριστείας και εμπιστοσύνης στην τεχνητή νοημοσύνη και μια έκθεση σχετικά με τις πτυχές ασφάλειας και ευθύνης της τεχνητής νοημοσύνης. Η Λευκή Βίβλος προτείνει μέτρα που θα εξορθολογίσουν την

έρευνα, θα ενισχύσουν τη συνεργασία μεταξύ των κρατών μελών και θα αυξήσουν τις επενδύσεις στην ανάπτυξη και εξάπλωση της τεχνητής νοημοσύνης. Προτείνει επίσης επιλογές πολιτικής για ένα μελλοντικό ρυθμιστικό πλαίσιο της ΕΕ που θα καθορίζει τους τύπους νομικών απαιτήσεων που θα ισχύουν για τους σχετικούς φορείς, με ιδιαίτερη έμφαση στις εφαρμογές υψηλού κινδύνου.

# Κεφάλαιο 2. Συστήματα Digital Twins και κατασκευή κτιρίων

## 2.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίων (BIM) εισήχθη πριν από 15 χρόνια, αλλά η αυξανόμενη υιοθέτηση τεχνολογίας στον κατασκευαστικό κλάδο συνοδεύτηκε από μείωση της παραγωγικότητας. Ένα ψηφιακό δίδυμο ενοποιεί πληροφορίες σε ένα επικυρωμένο περιβάλλον που μοιράζονται όλοι. Η βασική ιδέα είναι η ύπαρξη διασύνδεσης σε όλη τη διαδρομή από τον αρχικό σχεδιασμό, μέχρι την επιλογή ενός αντικειμένου, τις προδιαγραφές του, την κατασκευή του, την παράδοσή του στο χώρο, την εγκατάστασή του και τη διάρκεια ζωής του. Τα ψηφιακά δίδυμα έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν πραγματικά τις ροές εργασίας. Δεν πρόκειται για την αντικατάσταση των ανθρώπων, αλλά για τη δυνατότητα να κάνουν πιο σύνθετες εργασίες γρηγορότερα και καλύτερα. Επιτρέποντάς μας να κατανοήσουμε πραγματικά ένα σχέδιο και να το βελτιστοποιήσουμε, τα ψηφιακά δίδυμα είναι σε θέση να μειώσουν την αβεβαιότητα, την καθυστέρηση και τα λάθη. Οι εξελίξεις σε επίπεδο εργοταξίου σημειώνονται στους τομείς των μεθόδων κατασκευής, των υλικών, των εγκαταστάσεων και των μηχανημάτων. Ακόμη και με τέτοιες προοδευτικές αλλαγές, τα ποσοστά παραγωγικότητας στον κατασκευαστικό τομέα εξακολουθούν να είναι από τα χαμηλότερα στη βιομηχανία. Αυτό οφείλεται εν μέρει στις μειωμένες απαιτήσεις δεξιοτήτων που απαιτούνται για την είσοδο στον κατασκευαστικό κλάδο.

Η βελτίωση της παραγωγικότητας είναι ένα κρίσιμο ζήτημα καθώς είναι ο πιο σημαντικός δείκτης για τη μέτρηση του βιοτικού επιπέδου εντός των εθνών και των προοπτικών τους για περαιτέρω οικονομική ανάπτυξη. Στην πραγματικότητα, η χαμηλή παραγωγικότητα και οι ελλείψεις δεξιοτήτων έχουν οδηγήσει σε υψηλό κατασκευαστικό κόστος, καθυστερήσεις σε κατασκευαστικά έργα και κακές πρακτικές βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα. Η κατασκευαστική βιομηχανία κάνει εκτεταμένη χρήση φυσικών πόρων όπως νερό, τσιμέντο, άμμος και χαλίκι, άργιλος, σκυρόδεμα και μάρμαρο στα

οικοδομικά υλικά. Επιπλέον, καταναλώνει ορυκτά καύσιμα όπως ντίζελ και βενζίνη για μηχανήματα κατασκευής και μεταφοράς. Όλα αυτά συμβάλλουν στις παγκόσμιες εκπομπές και στην εξάντληση των φυσικών πόρων με μη βιώσιμο ρυθμό. Μέσω της ανάπτυξης ψηφιακών διδύμων, μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση της παραγωγικότητας και να διασφαλισθεί το ότι οι φυσικοί πόροι χρησιμοποιούνται συνολικά πιο αποτελεσματικά.

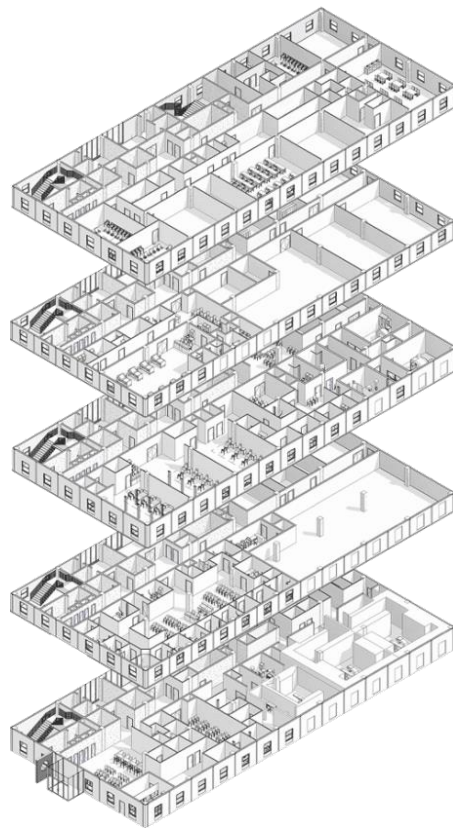
## 2.2 Επίπεδα ενσωμάτωσης

Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ζωντανό επειδή μαθαίνει και ενημερώνεται συνεχώς από πολλές πηγές, αντιπροσωπεύοντας την κατάστασή του σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, την κατάσταση εργασίας ή τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αυτό το σύστημα εκμάθησης μαθαίνει από τον εαυτό του, μέσω αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης ή/και μηχανικής μάθησης, από μια συλλογή δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα προέρχονται από αισθητήρες που μεταφέρουν διάφορες πτυχές της κατάστασης λειτουργίας του. από ανθρώπινους χειριστές που λαμβάνουν λειτουργικές αποφάσεις και άλλους ανθρώπινους ειδικούς με βαθιά και σχετική γνώση του κλάδου. Ένα ψηφιακό δίδυμο ενσωματώνει επίσης ιστορικά δεδομένα από προηγούμενη χρήση για να συγκρίνει την απόκλιση με μια γραμμή βάσης.

Ξεκινώντας από το Computer-aided Design (CAD), τα εργαλεία για το σχεδιασμό και τη διαχείριση κτιρίων έχουν εξελιχθεί εδώ και δεκαετίες. Ο όρος «Μοντέλο Πληροφοριών Κτιρίου» προτάθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του '90 (van Nederveen & Tolman, 1992), ο οποίος αργότερα ονομάστηκε «Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίου (BIM)» και έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή και έχει γίνει ευρέως διαδεδομένος τις τελευταίες δεκαετίες (Li κ.ά., 2017). Ως τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση κτιρίων, ένα μοντέλο BIM περιέχει γεωμετρικές και σημασιολογικές πληροφορίες των δομικών στοιχείων (Eastman κ.ά. 2011). Ειδικά στα υψηλότερα Επίπεδα Ανάπτυξης, το επίπεδο σχεδίασης, Level of Design (LOD) είναι εξαιρετικά σημαντικό και θα έπρεπε να είναι το ίδιο το δίδυμο. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Αρχιτεκτόνων ορίζει το LOD μέσω της ακόλουθης ιεραρχίας (2008):

- LOD 100: Στάδιο προσχεδίασης– επιτρέπει την εκτίμηση.

- LOD 200: Γενικά συστήματα και συγκροτήματα κτιρίων – επιτρέπει τον προσδιορισμό
- LOD 300: Καθορισμένα συστήματα και/ή συναρμολογήσεις – επιτρέπει την αγορά
- LOD 350: Πραγματικά συστήματα ή συναρμολογήσεις – επιτρέπει την κατασκευή
- LOD 400: Πραγματικά λεπτομερή εξαρτήματα και μέθοδοι προσάρτησης – επιτρέπει την κατασκευή
- LOD 500: Επαληθευμένη αναπαράσταση πεδίου ως προς το μέγεθος, το σχήμα, τη θέση, την ποσότητα και τον προσανατολισμό. Μη γραφικές πληροφορίες μπορούν επίσης να επισυναφθούν στα Στοιχεία Μοντέλου.



**Εικόνα 2.1: Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικά με διαδικασίες και πλεονεκτήματα εφαρμογής ψηφιακών διδύμων**

### **2.2.1 Ψηφιακά Μοντέλα (CAD)**

Το CAD χρησιμοποιείται παραδοσιακά για τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου για την παρουσίαση μιας ιδέας, τον λεπτομερή σχεδιασμό ενός πλοίου σε ψηφιακό περιβάλλον και τη δημιουργία τεκμηρίωσης παραγωγής και κατασκευής. Είναι ένας τρόπος αξιολόγησης των επιλογών σχεδίασης και εξέτασης διαφορετικών δυνατοτήτων χωρίς να χρειάζεται να το κάνετε με φυσικά αντικείμενα. Ο εξοπλισμός, τα δομικά στοιχεία και τα συστήματα σωληνώσεων μπορούν να μοντελοποιηθούν, οι τρισδιάστατες διατάξεις ελέγχονται για την ετοιμότητα του σταδίου συναρμολόγησης και κατασκευής και το κόστος αξιολογείται πριν από την έναρξη των εργασιών σε συνεργεία και εργοτάξια. Σε αυτή τη διαδικασία, οι πληροφορίες ρέουν από το ψηφιακό μοντέλο σε ένα φυσικό αντικείμενο προς μία κατεύθυνση.

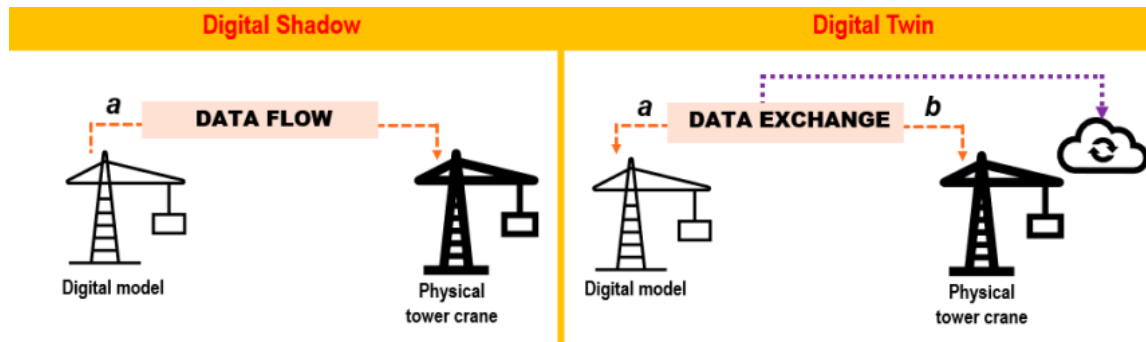
Το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να είναι μια απλοποιημένη προσέγγιση ή ένα λεπτομερές μοντέλο 1-1 που περιέχει σημαντικό όγκο μεταδεδομένων. Συνήθως, ο σκοπός ενός τέτοιου μοντέλου καθορίζει τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται και το επίπεδο λεπτομέρειας. Για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση διαγραμμάτων P&I ή υπολογισμούς σταθερότητας, αρκεί ακόμη και μια 2D παρουσίαση, καθώς σε αυτό το στάδιο του έργου οι λεπτομέρειες των 3D αντικειμένων δεν είναι σημαντικές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο σκοπός του ψηφιακού μοντέλου καθορίζει το επίπεδο ακρίβειας. Τις περισσότερες φορές για τα μοντέλα CAD αυτό σημαίνει ένα απλοποιημένο τρισδιάστατο μοντέλο για ένα βασικό έργο, το οποίο χρησιμοποιείται αργότερα για λεπτομερή σχεδιασμό και σχεδιασμό παραγωγής.

### **2.2.2 Ψηφιακή Σκιά (Digital Shadow)**

Η αντανάκλαση ενός φυσικού αντικειμένου με τη μορφή της ψηφιακής του σκιάς έχει πολύ συγκεκριμένες χρήσεις. Αυτά περιλαμβάνουν την καταγραφή έργων που έχουν κατασκευαστεί ή τη χρήση σαρωμένων δεδομένων λέιζερ για μετασκευές ή ανακαινίσεις. Η ροή των πληροφοριών πηγαινει από τον φυσικό κόσμο στην ψηφιακή αναπαράσταση. Καθώς τα φυσικά αντικείμενα περιέχουν μεγάλη ποσότητα λεπτομέρειας, συχνά η ψηφιακή σκιά χρειάζεται απλοποίηση. Ένα κλασικό παράδειγμα θα ήταν ένας σωλήνας με μόνωση. Εκτός από την τεχνολογία, απαιτείται ανθρώπινη συμβολή για να αναγνωριστεί το σωστό



περίγραμμα του αντικειμένου για το ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Τα μεταδεδομένα είναι συνήθως κρυμμένα και με βάση μόνο το φυσικό σχήμα των αντικειμένων, είναι αδύνατο να προσδιοριστούν αναγνωριστικά αντικειμένων ή σχετικές οδηγίες εγκατάστασης.

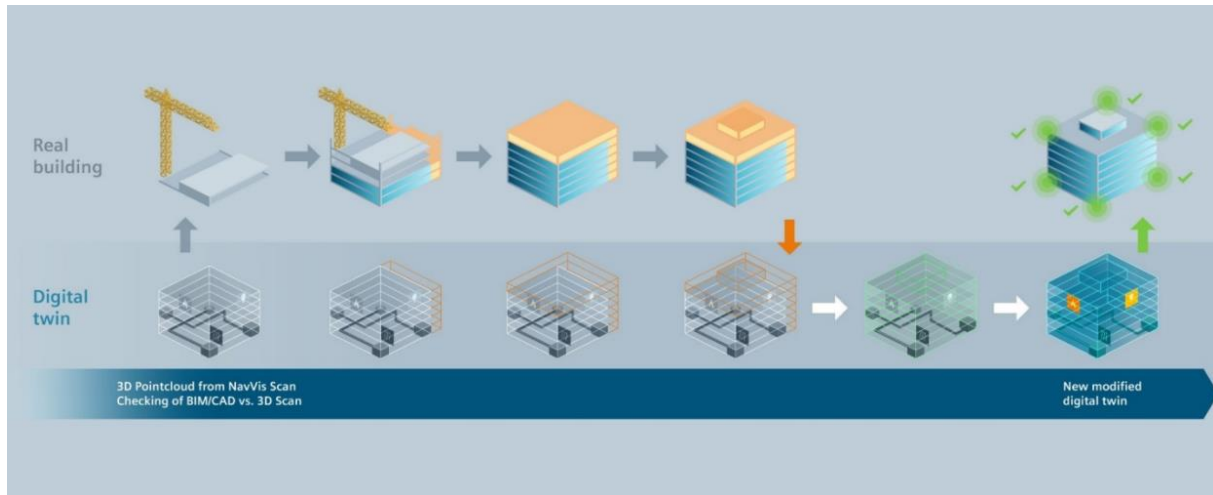


Εικόνα 2.2: Γεφύρωση ψηφιακού μοντέλου-φυσικής κατασκευής και διαφορές Ψηφιακής Σκιάς και Ψηφιακού Διδύμου

### 2.2.3 Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin)

Τα ψηφιακά δίδυμα ξεκινούν με ένα ψηφιακό μοντέλο ή μια ψηφιακή σκιά για να ξεκινήσουν. Ένα απλό σενάριο είναι όταν το ψηφιακό μοντέλο δημιουργείται σταδιακά από το βασικό στάδιο του σχεδιασμού, αναπτύσσεται περαιτέρω σε λεπτομερή σχεδιασμό και χρησιμοποιείται για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών και την προσομοίωση αλλαγών για τη διαδικασία κατασκευής. Αυτό υποστηρίζει και διευκολύνει τη διαδικασία παραγωγής που καταλήγει σε ένα φυσικό αντικείμενο, όπως ένα κτίριο ή ένα πλοίο. Μόλις κατασκευαστεί και ολοκληρωθεί το έργο, το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να απορριφθεί ή να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για τη διαχείριση ως ψηφιακό δίδυμο. Το εύρος των απαιτούμενων περιπτώσεων χρήσης ποικίλλει σημαντικά από έργα συντήρησης και εκσυγχρονισμού έως συγκεκριμένες περιπτώσεις προσομοίωσης σεναρίων για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή εκπαίδευσης προσωπικού. Σε βιομηχανικά έργα, διαφορετικές ομάδες ενδιαφερομένων απαιτούν διαφορετικές περιοχές εστίασης για πληροφορίες. Σ συχνά αυτό που είναι ουσιαστικό και κρίσιμο για τους σχεδιαστές, δεν είναι σχετικό με τη συντήρηση ή άλλες λειτουργίες. Ένα ψηφιακό δίδυμο δίνει έμφαση στην αμφίδρομη προσέγγιση. Η ροή

πληροφοριών γίνεται όχι μόνο από τα ψηφιακά στοιχεία προς στον φυσικό κόσμο, αλλά και αντιστρόφως, συγχωνεύοντας πληροφορίες από την κατασκευή και τη διαχείριση με το ψηφιακό μοντέλο. Αυτή είναι η πιο περίπλοκη κατάσταση και απαιτεί σαφή καθορισμό των αναγκών και των ρόλων των ενδιαφερόμενων μερών.



**Εικόνα 2.3: Προσομοίωση σταδίων για την εφαρμογή τροποποιήσεων σε ψηφιακό δίδυμο ενός πραγματικού κτιρίου (Siemens, 2020)**

Ένα ψηφιακό δίδυμο στην πράξη αποτελεί μια διαδικασία και όχι ένα αντικείμενο. Στη μηχανική που βασίζεται σε δεδομένα, το ψηφιακό δίδυμο παίζει κεντρικό ρόλο ως ο δυναμικός κόμβος όπου πληροφορίες, όπως το τρισδιάστατο μοντέλο, ένα ψηφιακό μοντέλο με μεταδεδομένα, ψηφιακή σκιά και όλα τα δεδομένα που σχετίζονται με τη δημιουργία, την κατασκευή και την εκμετάλλευση ενός σκάφος εξελίσσεται. Τα ενδιαφερόμενα μέρη σε κάθε στάδιο της διαδικασίας του κύκλου ζωής ορίζουν τη χρήση και το απαιτούμενο εύρος πληροφοριών για τους επιχειρηματικούς τους σκοπούς. Ο κόμβος γίνεται μια ζωντανή οντότητα και μια διαδικασία αντί να είναι ένα θησαυροφυλάκιο δεδομένων. Το ψηφιακό δίδυμο ως διαδικασία επιτρέπει τη στενή συνεργασία μεταξύ όλων των κλάδων, ενσωματώνει διαδικασίες και διασφαλίζει τη συνεχή συνέχεια. Μοιράζοντας την ίδια πηγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, οδηγεί και συνδέει ολόκληρη τη διαδικασία που βασίζεται σε δεδομένα.

## 2.3 Ενσωμάτωση Digital Twins στο μοντέλο κατασκευής BIM

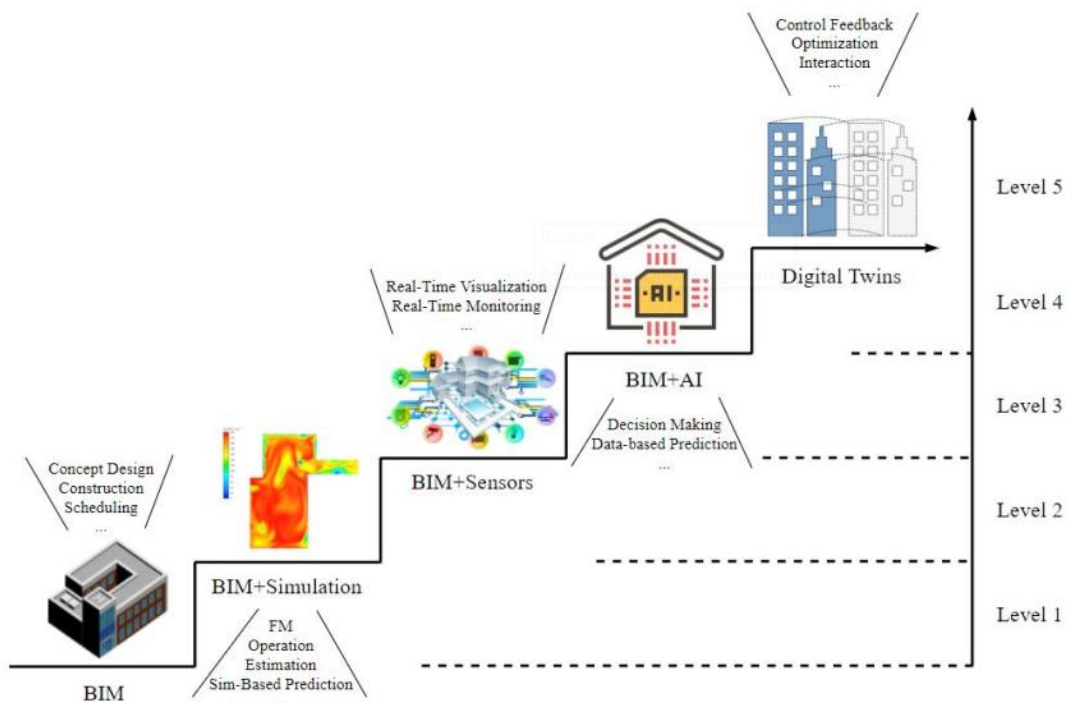
Το BIM (Building Information Modeling) περιλαμβάνει τις ροές εργασίας και την τεχνολογία για ψηφιακή, αντικειμενοστραφή μοντελοποίηση προϊόντων και διαδικασιών κατασκευής (Sacks κ.ά., 2018). Οι πλατφόρμες BIM αναπτύχθηκαν ως απάντηση στην ανάγκη για αποτελεσματικά εργαλεία πληροφορικής για το σχεδιασμό και οι διαδικασίες έχουν εξελιχθεί για να ικανοποιήσουν την ανάγκη για ψηφιακή δημιουργία πρωτοτύπων στην κατασκευή, επιτρέποντας τη δοκιμή τόσο των πτυχών του σχεδιασμού όσο και της παραγωγής πριν από την κατασκευή. Πολλοί επαγγελματίες βλέπουν το BIM ως τη βασική τεχνολογία που επιτρέπει την κατασκευή ψηφιακών διδύμων. Ωστόσο, ενώ τα μοντέλα BIM παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των κτιρίων όταν τίθενται σε λειτουργία, υπολείπονται της ψηφιακής δίδυμης έννοιας της συνεχούς ενημέρωσης αναπαράστασης της τρέχουσας κατάστασης μιας εγκατάστασης (Teicholz, 2013). Παρά την ευρεία αποδοχή του BIM, τρία κύρια προβλήματα στη διαχείριση της λειτουργίας, ειδικά σε μεγάλα κτίρια, παραμένουν άλυτα:

1. Οι υπάρχουσες πλατφόρμες λογισμικού δεν διαθέτουν μια συνεχώς ενημερωμένη απεικόνιση των κτιρίων του πραγματικού κόσμου (Son, Kim & Kim, 2012). Για παράδειγμα, η ξαφνική ροή ανθρώπων στην είσοδο ενός κτιρίου είναι επικίνδυνη και θα πρέπει να αναφέρεται αμέσως. Τα περισσότερα δεδομένα κτιρίων σε υπάρχουσες πλατφόρμες προ-εισάγονται και στη συνέχεια παραμένουν αμετάβλητα. Οι διαχειριστές δεν μπορούν να επιθεωρήσουν την πραγματικά ενημερωμένη κατάσταση όπως θέλουν.
2. Εξακολουθούν να υπάρχουν δυσκολίες κατά τη συλλογή ψηφιακών δεδομένων από διάφορες πηγές. Κάθε σύστημα έχει μοναδικές συσκευές υλικού, διεπαφές και μορφές δεδομένων. Επιπλέον, τα δεδομένα αισθητήρων μπορούν να συσσωρεύονται εξαιρετικά γρήγορα. Οι στρατηγικές μετασχηματισμού δεδομένων και η εργασία αποθήκευσης τόσο μεγάλου όγκου δεδομένων χρειάζονται επίσης βελτιώσεις.
3. Τυπικό λογισμικό διαχείρισης εν χρήσει όπως οι πλατφόρμες BIM επικεντρώνονται κυρίως στην περιήγηση ή τον έλεγχο επιχειρηματικών δεδομένων με τρισδιάστατο

μοντέλο, αλλά όχι μαζική ανάλυση. Εάν χρησιμοποιούταν μια ξεχωριστή ανάλυση βάσης δεδομένων εκτός σύνδεσης για την κάλυψη αυτού του κενού, θα ήταν ανεπαρκής σε μηχανισμούς έγκαιρης ανάδρασης. Ως εκ τούτου, απαιτείται προηγμένη προσπάθεια ανάλυσης δεδομένων με τη μορφή έγκαιρων προτάσεων λήψης αποφάσεων.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η ιδέα των ψηφιακών διδύμων που αναπτύσσεται για περίπου δέκα χρόνια, ήταν πολύ λιγότερο δημοφιλής στον κατασκευαστικό κλάδο, με λίγες μόνο περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με φάσεις αρχιτεκτονικής, μηχανικής και κατασκευής. Ο κατασκευαστικός κλάδος στην Ευρωπαϊκή Ένωση καταβάλλει προσπάθεια για την παρακολούθηση των τελευταίων τεχνολογικών εξελίξεων πέρα από το BIM. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην υπολογιστική ισχύ και στους αλγόριθμους βαθιάς μάθησης επιτρέπουν πλήρως αυτοματοποιημένες διασυνδέσεις από τη δημιουργία δεδομένων έως την επεξεργασία και από τη συλλογή δεδομένων έως τις προηγμένες γνώσεις και αποφάσεις. Τα μοντέλα "ως κατασκευασμένα" γενικά μεταγλωττίζονται με ανάδραση, μετά την εκτέλεση, και σκοπός τους είναι να παρέχουν στους ιδιοκτήτες μοντέλα για τη φάση λειτουργίας και συντήρησης - που ονομάζεται "μοντέλο πληροφοριών περιουσιακών στοιχείων (AIM)" στο ISO 19650 (ISO/DIS 19650, 2018). Δεν προορίζονται να παρέχουν τη σύντομη ανατροφοδότηση του χρόνου που απαιτείται για τον έλεγχο του έργου.

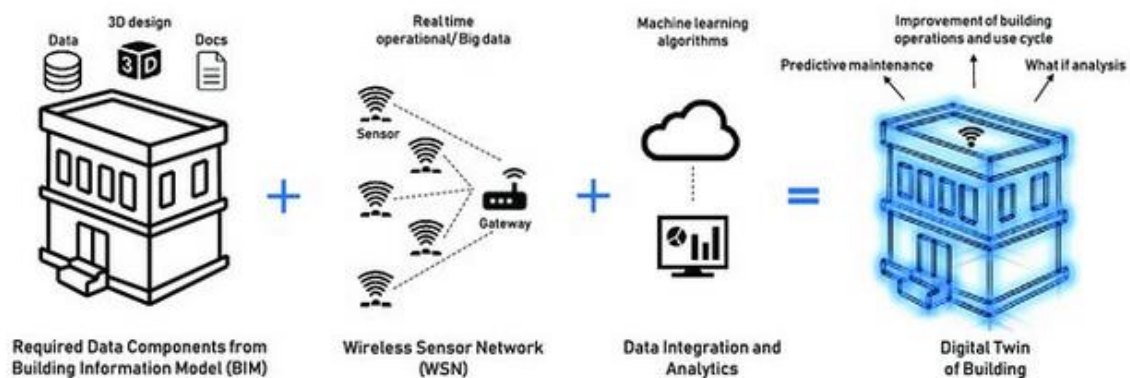
Επιπλέον, τα εργαλεία προγνωστικής προσομοίωσης και ανάλυσης που είναι διαθέσιμα για χρήση με το BIM είναι σχεδιασμένα για προγνωστική χρήση στο σχεδιασμό και όχι στην εκτέλεση έργου. Οι εφαρμογές για δομική μηχανική, για αερισμό και θερμική απόδοση, για φωτισμό και ακουστική, παρέχουν όλες προβλέψεις για τις μελλοντικές επιδόσεις του κατασκευασμένου προϊόντος. Τα εργαλεία μεθόδου κρίσιμης διαδρομής για τον κύριο σχεδιασμό χρησιμοποιούνται με μοντέλα BIM για την εκτέλεση ανάλυσης «4D CAD» των χρονοδιαγραμμάτων έργων, αλλά αυτά είναι ακατάλληλα για τον έλεγχο της παραγωγής (Sacks, 2016).



**Εικόνα 2.4: Επίπεδα εξέλιξης από το BIM στην ενσωμάτωση ψηφιακών διδύμων**

Ενώ τα εργαλεία BIM παρέχουν εξαιρετικές αναπαραστάσεις σχεδιασμού προϊόντων, δε διαθέτουν βασικά χαρακτηριστικά για την κατασκευή με ψηφιακά δίδυμα. Οι αναπαραστάσεις της γεωμετρίας τους χρησιμοποιούν αντικειμενοστραφή διανυσματικά γραφικά και τα μοντέλα αντικειμένων των συστημάτων BIM δεν διαθέτουν τα στοιχεία σχήματος για την αναπαράσταση των πτυχών της διαδικασίας κατασκευής. Λόγω της ύπαρξης κοινής και συνεπούς βάσης δεδομένων, η BIM καθιστά δυνατή την απρόσκοπτη συνεργασία μεταξύ των επαγγελματιών της AEC (αρχιτεκτονικής, μηχανικής και κατασκευών) και έτσι έχει εφαρμοστεί ευρέως στη διαχείριση του κύκλου ζωής του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένου του σταδίου σχεδιασμού, της διαδικασίας κατασκευής (Deng κ.ά. 2021) καθώς και φάσεις λειτουργίας (Soust-Verdaguer κ.ά. 2017). Για παράδειγμα, λεπτομερείς γεωμετρικές πληροφορίες που σχετίζονται με κατάλληλες προσομοιώσεις (π.χ. ενεργειακή προσομοίωση και προσομοίωση θερμικού περιβάλλοντος) μπορούν να βοηθήσουν στο σχεδιασμό του κτιρίου και των συστημάτων του (Sanguinetti κ.ά. 2009, Abanda and Byers 2016, Gan κ.ά. 2018, Tagliabue κ.ά. 2018, Gan κ.ά. 2019). Οι 4D

προσομοιώσεις που βασίζονται σε BIM με λεπτομερείς πληροφορίες για το υλικό και το κόστος μπορούν παρομοίως να παρέχουν υποστήριξη στη διαδικασία κατασκευής κτιριακών έργων (Yun κ.ά. 2014; Lee & Kim, 2017). Επιπλέον, με τη βοήθεια της 3D απεικόνισης και των λεπτομερειών των δομικών στοιχείων που παρέχονται από το BIM, τα σχέδια διαχείρισης κτιρίων μπορούν να βελτιστοποιηθούν από τον διαχειριστή του κτιρίου, ώστε να βοηθήσουν στη διαχείριση του κτιριακού εξοπλισμού και του εσωτερικού περιβάλλοντος (Cheng κ.ά., 2016; Chen κ.ά., 2018).



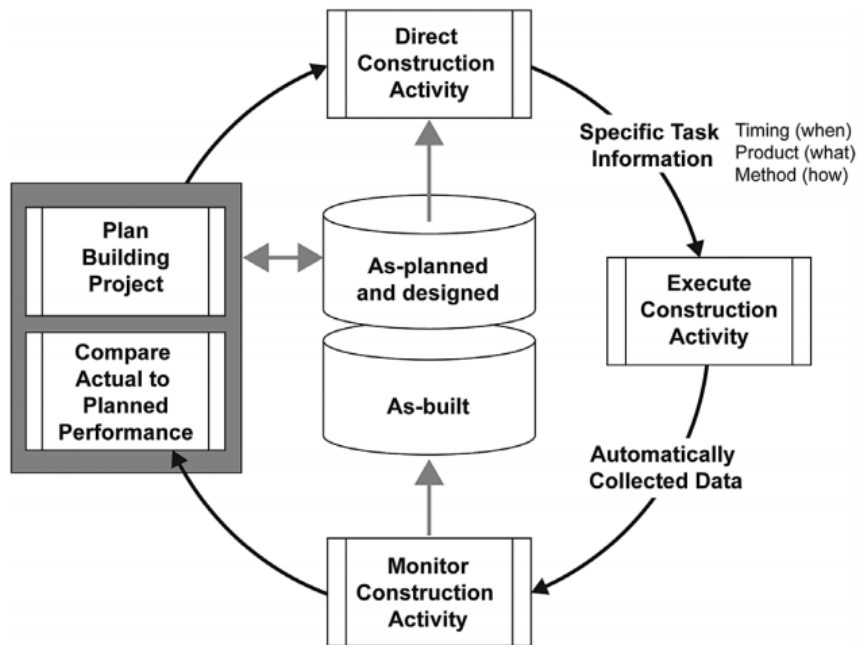
Εικόνα 2.5: Συστατικά στοιχεία δημιουργίας ψηφιακού διδύμου ενός κτιρίου

Ωστόσο, το ίδιο το BIM μπορεί γενικά να παρέχει μόνο στατικά δεδομένα του δομημένου περιβάλλοντος και δεν μπορεί να ενημερώνει αυτόματα τις πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο στα μοντέλα χωρίς πρόσθετες πηγές δεδομένων (Tang κ.ά. 2019). Με την έλευση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), το οποίο ορίζεται ως η διασύνδεση συσκευών ανίχνευσης που είναι σε θέση να παρέχουν ανταλλαγή πληροφοριών σε διαφορετικές πλατφόρμες (Gubbi κ.ά. 2013), η ενοποίηση δεδομένων ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο και των στατικών πληροφοριών που παρέχονται από τα μοντέλα BIM κατέστη δυνατή. Με τη βοήθεια έξυπνων συσκευών, η οπτικοποίηση και η ανάλυση περιβαλλοντικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο γίνονται διαθέσιμα σε μοντέλα BIM και έγινε αυτόματη ενημέρωση των μοντέλων BIM με βάση την κατάσταση του κτιρίου σε πραγματικό χρόνο επιτεύχθηκε. Για παράδειγμα, η κατάλληλη ενσωμάτωση των τεχνολογιών BIM και IoT μπορεί να βοηθήσει στην παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της διαδικασίας

κατασκευής και της κατάστασης του εσωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου (Lee κ.ά. 2016, Dave κ.ά. 2018). Η βάση της ενοποίησης του BIM και του IoT οδήγησε στην εμφάνιση του Digital Twin (Lu κ.ά. 2020, Sušnik, Tagliabue & Cairoli, 2021). Οι υπάρχουσες μελέτες έχουν υιοθετήσει τεχνολογίες BIM και IoT για πολλές πτυχές, όπως ο σχεδιασμός ενός κτιρίου, η παρακολούθηση και η διαχείριση των διαδικασιών κατασκευής, οι κτιριακές εγκαταστάσεις και η διαχείριση του εσωτερικού περιβάλλοντος (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

## **2.4 Τεχνολογίες και εφαρμογές συλλογής δεδομένων και παρακολούθησης**

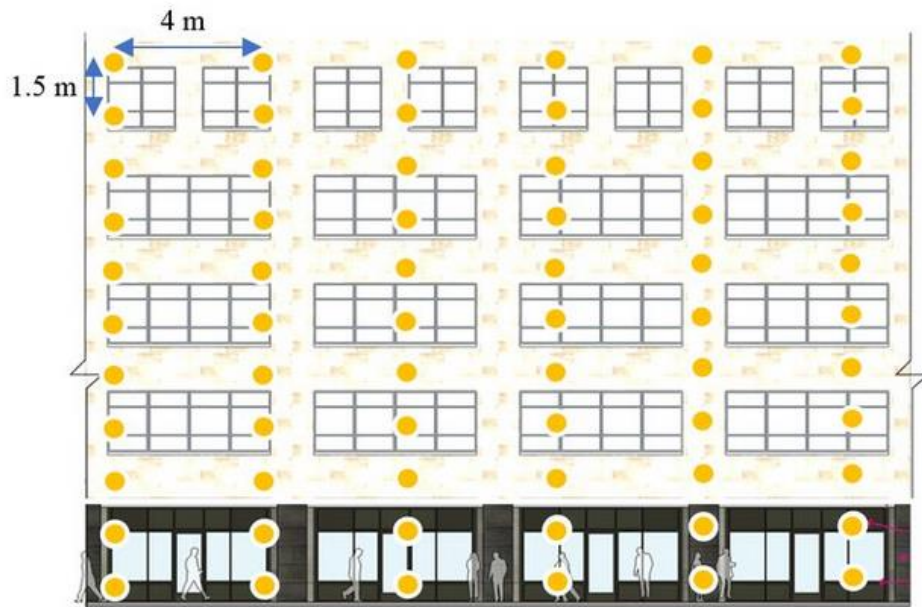
Η ροή των παρακολουθούμενων δεδομένων που ρέει από το φυσικό κατασκεύασμα στις ψηφιακές διαδικασίες είναι ένα ουσιαστικό συστατικό της σύνδεσης μεταξύ φυσικών και ψηφιακών διδύμων. Στην τρέχουσα παραδοσιακή κατασκευαστική πρακτική, οι άνθρωποι παρακολουθούν την πρόοδο των κατασκευαστικών εργασιών σε μεγάλο βαθμό με άμεση παρατήρηση και μέτρηση. Όμως η χειρωνακτική εργασία είναι χρονοβόρα και επιρρεπής σε σφάλματα (Costin κ.ά., 2012). Οι ερευνητές έχουν προτείνει και έχουν δοκιμάσει πολλές τεχνολογικές λύσεις για την αυτόματη παρακολούθηση των κατασκευαστικών εργασιών, ενώ ορισμένες έχουν γίνει πρόσφατα διαθέσιμες και έχουν εφαρμοστεί στο εμπόριο. Ένα εντυπωσιακό χαρακτηριστικό των εμπορικών εφαρμογών των τεχνολογιών παρακολούθησης μέχρι σήμερα στην κατασκευή είναι ότι οι πληροφορίες που συλλέγονται χρησιμοποιούνται γενικά με μεμονωμένο τρόπο (Zhao κ.ά., 2019). Σχεδόν όλα έχουν ένα μόνο θέμα εστίασης, όπως η απόδοση των γερανών, η κίνηση των εργαζομένων ή η φυσική πρόοδος των εργασιών. Υπάρχουν πολύ λίγες περιπτώσεις ολοκληρωμένης χρήσης περισσότερων της μιας τεχνολογιών. Τα συστήματα που είναι εγκατεστημένα για την παρακολούθηση της παράδοσης υλικών χρησιμοποιούνται μόνο για την εξουσιοδότηση λογαριασμών. Οι ελεγχόμενες πύλες πρόσβασης εργαζομένων εξυπηρετούν μόνο λειτουργίες ασφάλειας και ασφάλειας, και ούτω καθεξής. Αυτό που λείπει είναι μια συνεκτική, ολοκληρωμένη προσέγγιση στον έλεγχο της παραγωγής στην οποία πολλαπλά συστήματα παρακολούθησης ενημερώνουν μια βάση δεδομένων έργου, η οποία μπορεί στη συνέχεια να υποστηρίξει διάφορες λειτουργίες διαχείρισης.



Εικόνα 2.6: Διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής κτιρίων με χρήση ανατροφοδότησης για την αυτόματη συλλογή και παρακολούθηση δεδομένων (Navon & Sacks, 2007)

Ορισμένες αξιοσημείωτες εξαιρέσεις αποδεικνύουν τον κανόνα: για παράδειγμα, ορισμένα συστήματα προειδοποίησης σύγκρουσης χρησιμοποιούν ξεχωριστές τεχνολογίες για τον εντοπισμό βαρέων μηχανημάτων (π.χ. GPS) και εργαζομένων (π.χ. όραση υπολογιστή), συγχωνεύοντας τα δεδομένα για να δημιουργήσουν πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Fang κ.ά., 2018). Ο Navon πρότεινε ένα σύστημα που ονομάζεται "APPC" (Navon & Sacks, 2007), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6. Η βασική ιδέα ήταν ότι οι δραστηριότητες θα μπορούσαν να παρακολουθούνται για να τροφοδοτηθεί μια βάση δεδομένων που καταγράφει την κατάσταση του το υπό κατασκευή κτήριο. Αυτό το μοντέλο θα μπορούσε να συγκριθεί με τις πληροφορίες που σχεδιάστηκαν όπως είχε προγραμματιστεί για τον προσδιορισμό των αποκλίσεων, οι οποίες ενημέρωναν τον επόμενο γύρο ελέγχου.





**Εικόνα 2.7: Παράδειγμα τοποθέτησης αισθητήρων σε πρόσοψη κτιρίου για τη δημιουργία περιορισμένου ψηφιακού διδύμου (Khaajani κ.ά., 2019)**

Σύμφωνα με τη θεωρία παραγωγής στην κατασκευή, η επίτευξη ομαλών και προβλέψιμων ροών απαιτεί προληπτικό φιλτράρισμα των περιορισμών παραγωγής πριν από την ανάθεση καθηκόντων στα πληρώματα για εκτέλεση (Ballard, 2000). Η αντιδραστική διόρθωση όπου διαπιστώνεται ότι η πραγματική απόδοση αποκλίνει από την προγραμματισμένη απόδοση είναι πολύ αργά για να διορθωθεί η κατεύθυνση ενός έργου. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι παρακολουθούσε τις κατασκευαστικές δραστηριότητες, παραμελώντας τις ροές τροφοδοσίας των υλικών, την εργασία, τις πληροφορίες εξοπλισμού και τις τοποθεσίες. Αυτό αντανακλά την άποψη του μετασχηματισμού «μαύρου κουτιού» της παραγωγής στις κατασκευές και την απουσία εξέτασης της άποψης ροής. Η προληπτική διαχείριση απαιτεί την παρακολούθηση των προαπαιτούμενων ροών των υλικών, των τοποθεσιών, της εργασίας, του εξοπλισμού και των πληροφοριών που είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση της κατάστασης των περιορισμών, μια βασική πτυχή της λιτής διαδικασίας «έτοιμης κατασκευής». Κατά συνέπεια, ένας αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου κατασκευής με χρήση ψηφιακού δίδυμου πρέπει να ενσωματώνει:

α. τεχνολογίες για την παρακολούθηση των ροών τροφοδοσίας των δραστηριοτήτων καθώς και των ίδιων των δραστηριοτήτων και

β. τεχνολογίες επεξεργασίας δεδομένων ικανές να συγχωνεύουν δεδομένα από πολλαπλές ροές για να συγκεντρώσουν ολοκληρωμένη και ακριβή κατάσταση πληροφορίες.

Προκειμένου να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα από προσομοιώσεις ή προβλέψεις, οι πληροφορίες που εξάγονται από το μοντέλο BIM είναι πολύ σημαντικές καθώς παρέχουν όχι μόνο γεωμετρικές αλλά και σημασιολογικές πληροφορίες για την εξάλειψη της απώλειας δεδομένων με υψηλή απόδοση. Επιπλέον, ένα ορισμένο επίπεδο στρατηγικών λήψης αποφάσεων θα πρέπει να συμπεριληφθεί στο σύστημα ελέγχου για να ελαχιστοποιηθεί η συμμετοχή των ανθρώπων στον έλεγχο. Στη συνέχεια, αναμένεται να σταλούν συγκεκριμένες εντολές στο σύστημα ελέγχου (π.χ. HVAC, συστήματα φωτισμού) για να επιτευχθεί ένα ορισμένο επίπεδο αυτοματοποιημένης συντήρησης εσωτερικού περιβάλλοντος.

Οι πλατφόρμες οπτικοποίησης σε πραγματικό χρόνο αναμένεται να δείχνουν τη συνεχή κατάσταση του εσωτερικού περιβάλλοντος, το οποίο θα μπορούσε να παρέχει καλύτερη εικόνα της κατάστασης του κτιρίου στους διαχειριστές, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την αποτελεσματικότητα του ελέγχου του συστήματος κτιρίου, διαχείριση εγκαταστάσεων και συντήρηση.

## **2.5 Εμπόδια, Προκλήσεις και Νομικές Επιπλοκές**

Μέχρι να εφαρμοστούν επιτυχώς τα ψηφιακά δίδυμα, δύο πρόσθετες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η προκατασκευή θα εμποδίσουν τόσο τις επενδύσεις όσο και το σχεδιασμό. Πρώτον, τα μικρά έργα και η ελάχιστη έως καθόλου ορατότητα όσον αφορά το χρονοδιάγραμμα από το προϊόν στην αγορά μπορεί να καταστήσει δύσκολη την δικαιολογημένη επένδυση. Και δεύτερον, ο καλός σχεδιασμός κτιρίων απαιτεί ακόμα την κατανόηση του πλαισίου και την αντιμετώπιση θεμάτων όπως οι περιβαλλοντικές επιδόσεις, η τοποθεσία, ο τοπικός σχεδιασμός και οι οικοδομικοί κανονισμοί—και αυτά δεν είναι εγγυημένα. Υπολογίζεται ότι τα επόμενα χρόνια δισεκατομμύρια πράγματα θα

αντιπροσωπεύονται είτε από ψηφιακά δίδυμα, μοντέλα λογισμικού και φυσικά συστήματα.

Προβλέπεται ότι τα ψηφιακά δίδυμα θα χρησιμοποιηθούν από τις μισές μεγάλες βιομηχανικές εταιρείες και περίπου 21 δισεκατομμύρια ψηφιακά συνδεδεμένους αισθητήρες έως το 2020, κάτι που θα μπορούσε ενδεχομένως να εξοικονομήσει δισεκατομμύρια σε επισκευή και λειτουργία συντήρησης. Προβλέπεται επίσης μέχρι το 2020 ότι έως και το 60% των κατασκευαστών θα παρακολουθούν την απόδοση και την ποιότητα των προϊόντων χρησιμοποιώντας ψηφιακά δίδυμα. Ζητήματα όπως η ιδιοκτησία δεδομένων, η αιτιώδης συνάφεια και η ευθύνη θα μπορούσαν να είναι όλα δυνητικά ασαφή, δύσκολο να ξεδιαλυθούν και αμφιλεγόμενα.

### **2.5.1 Ιδιοκτησία δεδομένων**

Σε πολλές περιπτώσεις, τα ψηφιακά δίδυμα μπορεί να ενσωματώνουν υλικό πνευματικής ιδιοκτησίας, πράγμα που σημαίνει ότι οι διατάξεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας των συμβάσεων θα πρέπει να ενημερωθούν ώστε να αντικατοπτρίζουν το πλέον ευρύτερο φάσμα χρήσης των δεδομένων για το ψηφιακό δίδυμο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να είναι τόσο απλό όσο η συμπερίληψη του ψηφιακού δίδυμου στον συμβατικό ορισμό της επιτρεπόμενης χρήσης, αλλά αυτό θα διαφέρει από σύμβαση σε σύμβαση. Οποιαδήποτε άδεια χορηγείται σε σχέση με τη χρήση των δεδομένων θα πρέπει να είναι για μια κατάλληλα μεγάλη περίοδο, ώστε να μην λήξει πριν από το τέλος της ζωής του διδύμου. Αυτός είναι πιθανό να είναι ο πλήρης κύκλος ζωής του περιουσιακού στοιχείου, της διαδικασίας ή του συστήματος, τόσο δυνητικά πολλά χρόνια.

Πρέπει επίσης να υπάρχει νομική σαφήνεια σχετικά με το ποιος είναι ο νόμιμος κάτοχος των δεδομένων που τηρούνται στο μοντέλο. Είναι σημαντικό να συνεχίσουν να αναγνωρίζονται τα δικαιώματα των μεμονωμένων μερών που συνεισφέρουν ξεχωριστά, ιδίως όταν τα δεδομένα που κοινοποιούνται ενσωματώνουν υλικό πνευματικής ιδιοκτησίας. Ωστόσο, μπορεί να προκύψουν περίπλοκες καταστάσεις όταν έχουν συνεισφέρει περισσότερα από ένα μέρη, καθώς το τελικό προϊόν της κοινής χρήσης δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε κατάσταση κοινής ιδιοκτησίας. Εκτός εάν υπάρχουν ειδικές συμβατικές διατάξεις που να το καλύπτουν, τα δικαιώματα των συνιδιοκτητών

ενδέχεται να μην είναι σαφή. Επιπλέον, εάν η ιδιοκτησία των μεμονωμένων συνεισφορών δεδομένων ανήκει στο μέρος που μοιράστηκε τα δεδομένα, πού βρίσκεται η ιδιοκτησία του ψηφιακού μοντέλου στο σύνολό του; Αυτό θα πρέπει να καθορισθεί.

### **2.5.2 Κοινή χρήση δεδομένων και εμπιστευτικότητα**

Από τη φύση τους, τα ψηφιακά δίδυμα βασίζονται στην κοινή χρήση δεδομένων και οι συμβάσεις που τους διέπουν πρέπει να το επιτρέπουν. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους τρέχοντες κανόνες και νομικά πλαίσια που αντιτίθενται στη μη ουσιαστική κοινή χρήση δεδομένων. Η υπόθεση θα πρέπει να γίνει για τα διαρκή οφέλη για το κοινό, ως νόμιμος λόγος για κοινή χρήση δεδομένων. Υπάρχει ένα σχετικό θέμα εμπιστευτικότητας. Δεδομένου του αριθμού των ενδιαφερομένων που μπορεί να έχουν πρόσβαση στο ψηφιακό δίδυμο, ορισμένα μέρη ενδέχεται να μην αισθάνονται άνετα με την κοινή χρήση εμπιστευτικών πληροφοριών, όπως εμπορικά μυστικά. Αυτό μπορεί να επιδεινωθεί περαιτέρω από το γεγονός ότι σε οποιαδήποτε πλατφόρμα κοινής χρήσης δεδομένων υπάρχει πάντα ο κίνδυνος παραβιάσεων της ασφάλειας και απώλειας δεδομένων και τυχόν ευπάθειες που σχετίζονται με τέτοια συστήματα θα αυξηθούν σημαντικά όταν συγχωνεύονται διαφορετικά ψηφιακά δίδυμα.

Όταν τα δεδομένα θεωρούνται εμπιστευτικά, ενδέχεται να απαιτούνται κατάλληλες ρήτρες μη αποκάλυψης σε μεμονωμένες συμβάσεις ή μπορεί να χρειαστεί να υπογραφεί από όλα τα μέρη μια συμφωνία εμπιστευτικότητας για όλο το έργο. Όπου υπάρχουν πολλοί χρήστες του δίδυμου, ενδέχεται να απαιτούνται διαφορετικά δικαιώματα πρόσβασης για να επιτρέπεται η προβολή εμπιστευτικών δεδομένων μόνο από ορισμένους χρήστες. Ομοίως, ορισμένα μέρη ενδέχεται να ζητήσουν τη διόρθωση ορισμένων δεδομένων. Ωστόσο, αυτό πρέπει να είναι αναλογικό. Αν και μπορεί να μην είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν όλες οι πληροφορίες στο μοντέλο, ένα ψηφιακό δίδυμο θα είναι πάντα τόσο καλό όσο τα δεδομένα που περιλαμβάνονται σε αυτό.

### 2.5.3 Ευθύνη

Ίσως το πιο περίπλοκο νομικό ζήτημα είναι αυτό της ευθύνης. Τα ψηφιακά δίδυμα είναι διασυνδεδεμένα συστήματα στα οποία οι αλλαγές σε ένα στοιχείο δεδομένων θα επηρεάσουν άλλα μέρη του μοντέλου και καθώς το ψηφιακό δίδυμο εξελίσσεται, όλο και περισσότερα μέρη μπορεί να χρησιμοποιούν και να βασίζονται σε δεδομένα που θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν σφάλματα. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλά μέρη και πηγές δεδομένων, το ψηφιακό δίδυμο είναι πιθανό να απαιτεί από έναν μόνο οργανισμό να ενεργεί ως φύλακας των δεδομένων, για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένων αλλαγών. Ωστόσο, όταν υπάρχει σφάλμα, μπορεί να είναι ακόμα δύσκολο να καθοριστεί πού έγκειται η ευθύνη. Ομοίως, η ευθύνη μπορεί να μην βαρύνει μόνο ένα μέρος ή μπορεί να είναι δύσκολο να αποδειχθεί ότι τα αρχικά δεδομένα που παρασχέθηκαν δεν ήταν επαρκούς ποιότητας εξαρχής. Το γεγονός ότι διαφορετικά μέρη βασίζονται στην ακρίβεια των δεδομένων που παρέχονται μεταξύ τους μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ζητήματα εμπιστοσύνης.

Οι Αρχές Gemini, μια σειρά αξιών που δημοσιεύθηκαν από την Ομάδα Εργασίας Ψηφιακού Πλαισίου του Κέντρου Ψηφιακής Κατασκευής της Βρετανίας για να καθοδηγήσουν τη δημιουργία του εθνικού ψηφιακού δίδυμου, δίνουν μεγάλη έμφαση στη σαφήνεια του σκοπού, την εμπιστοσύνη, τη διαφάνεια, την ποιότητα και την αποτελεσματική λειτουργία του δίδυμου. Δεδομένης της πολυπλοκότητας των πιθανών θεμάτων ευθύνης, θα ήταν ωφέλιμο να διασφαλιστεί ότι όλες οι συμβάσεις είναι σαφείς σχετικά με τον σκοπό και τη λειτουργία των δεδομένων, ίσως με αναφορά στις Αρχές των Διδύμων, με στόχο την ενίσχυση της εμπιστοσύνης μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και την ενθάρρυνση της κοινή χρήση δεδομένων που πληροί τα ίδια υψηλά πρότυπα. Αν και μπορεί να είναι δύσκολο να επιβληθούν τέτοιες υποχρεώσεις, η ύπαρξη σαφών όρων αναφοράς μπορεί να συμβάλει στην αποφυγή διαφορών μεταξύ των διαφορετικών πλευρών στο μέλλον.

## 2.6 Μελλοντικά Σενάρια

Με την ενίσχυση των υπολογιστικών και επικοινωνιακών δυνατοτήτων για τα φυσικά αντικείμενα, αυτά τα αντικείμενα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας στους χρήστες μέσω των ενσύρματων ή ασύρματων επικοινωνιών τους. Η ιδέα μιας έξυπνης πόλης μπορεί να είναι ρεαλιστική υπό το φως αυτής της σημαντικής ανακάλυψης. Ένας από τους κύριους τομείς υπηρεσιών σε μια έξυπνη πόλη είναι ένα έξυπνο κτίριο. Τρία κύρια χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν ένα έξυπνο κτίριο είναι τα στοιχεία, οι λειτουργίες και τα αποτελέσματά του (Jia κ.ά., 2018). Τα εξαρτήματα αποτελούνται από πολλαπλά διασυνδεδεμένα κομμάτια τεχνικού κτιριακού εξοπλισμού και συσκευών, υποδομών ανίχνευσης και ελέγχου και αναδυόμενων τεχνολογιών. Όλα αυτά τα εξαρτήματα συμπεριφέρονται σύμφωνα με τις λειτουργίες τους, οι οποίες καθορίζουν την ευφυΐα και την αποτελεσματικότητα του κτιρίου και που τελικά καταλήγουν σε ορισμένα αποτελέσματα, όπως υγεία, άνεση, παραγωγικότητα και ενεργειακή απόδοση. Όλα αυτά θα ωφελούσαν το περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία.

Στο πιο βασικό επίπεδο, ένα ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε απλώς να λειτουργήσει ως κεντρικός χώρος αποθήκευσης πληροφοριών, ενσωματώνοντας δεδομένα σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο ένα συγκεκριμένο κτίριο έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί, στο οποίο προστίθενται περαιτέρω δεδομένα σχετικά με την απόδοση και την ηλικία του. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ενημέρωση της διαχείρισης, λειτουργίας και συντήρησης του κτιρίου. Ωστόσο, στο πιο προηγμένο επίπεδο, ένα ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε να είναι κάτι πολύ πιο περίπλοκο και πολυεπίπεδο, ενσωματώνοντας εικονικές προβολές σχεδόν οτιδήποτε. Ένα περίπλοκο μοντέλο της τρέχουσας υποδομής και της Ελλάδας, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ενημέρωση αποφάσεων και τη δοκιμή λύσεων για την αύξηση του πληθυσμού, τη συμφόρηση, την κλιματική αλλαγή, όπως το πείτε. Ένα μοντέλο αυτής της πολυπλοκότητας θα ήταν πολύ δύσκολο για ένα συμβατικό πλαίσιο να διέπει.

Η χρήση ψηφιακών διδύμων καθοδηγείται από την άνοδο των αισθητήρων που έχουν σχεδιαστεί για το IoT. Οι αισθητήρες είναι σε θέση να παρέχουν δεδομένα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας ενός αντικειμένου και την αντίδρασή του στο περιβάλλον, ενώ η

εφαρμογή ψηφιακών δίδυμων μπορεί να βελτιώσει την ανάλυση, την προσομοίωση συνθηκών, τις λειτουργίες και την αξία. Με προφανή τη σημασία των ψηφιακών διδύμων, η πιθανή ανάπτυξη και χρήση θα μπορούσε να είναι σε ισχύ για δεκαετίες χρόνια στο μέλλον. Η ρομποτική, η τρισδιάστατη εκτύπωση και οι ψηφιακά ελεγχόμενες μέθοδοι παραγωγής είναι πλέον διαδεδομένες στην κατασκευή. Αυτές οι νέες τεχνολογίες επιτρέπουν σε κάθε στοιχείο ενός έργου να παράγεται τοπικά σε μικρούς όγκους, καθαρά και αποτελεσματικά. Το εύρος ή η κλίμακα ενός έργου, βασικά, δεν είναι πλέον το καθοριστικό του χαρακτηριστικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπολογιστικός ή παραγωγικός σχεδιασμός αντί των παραδοσιακών γραμμικών σχεδίων, επιτρέποντας στα έργα να ελευθερώσουν χρόνο και κόστος παρακάμπτοντας ιστορικά εντατικές προσπάθειες σχεδιασμού.

Ως αποτέλεσμα, η φυσική απόδοση ενός στοιχείου μπορεί να γίνει κατανοητή πριν κατασκευαστεί οτιδήποτε. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να δείξει πώς διάφορες κατασκευαστικές ανοχές και παράγοντες μπορούν να περιπλέξουν την παραγωγή σύνθετων αντικειμένων - για παράδειγμα, πώς τα εξαρτήματα των κτιρίων μπορεί να επεκταθούν, να παραμορφωθούν ή να αντιδράσουν στον πραγματικό κόσμο. Κάντε τα δεδομένα προσβάσιμα σε όλους τους παίκτες. Όγκοι εύκολα προσβάσιμων δεδομένων πέρα από τον βασικό σχεδιασμό μπορούν να αποθηκευτούν ψηφιακά και να μοιραστούν μεταξύ όλων των ενδιαφερομένων και σε όλα τα στάδια. Ως εκ τούτου, στους σχεδιαστές (οι οποίοι παραδοσιακά απομονώνονται από τις διαδικασίες κατασκευής και παραγωγής) παρέχεται μια συλλογική προσέγγιση και κατανόηση του έργου, με τεχνικές παραμέτρους ενσωματωμένες στον αλγόριθμο σχεδιασμού. Μόλις ολοκληρωθεί το έργο, οι αισθητήρες μπορούν να συλλέξουν δεδομένα για να ενημερώσουν τους μελλοντικούς σχεδιαστές για την απόδοση του αντικειμένου. Για παράδειγμα, εάν τα κτίρια είναι σύνθετα από ψηφιακά κατασκευασμένα εξαρτήματα, τότε οι επαναληπτικές βελτιώσεις στο σχεδιασμό κάθε στοιχείου μπορούν να οδηγηθούν από αυτόν τον κύκλο. Αυτό αποτελεί μία ιδέα που μέχρι τώρα απουσίαζε σε μεγάλο βαθμό από την αρχιτεκτονική, τη μηχανική και τον κατασκευαστικό κλάδο.

Το BIM και οι τεχνολογίες παρακολούθησης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση της οικοδόμησης πληροφοριών και στην απόκτηση ακατέργαστων δεδομένων αντίστοιχα, αλλά εντάσσονται σε ένα σύστημα που εκμεταλλεύεται δεδομένα, πληροφορίες και γνώση για να παρέχει ολοκληρωμένη επίγνωση της κατάστασης. Η κατασκευή με χρήση ψηφιακών διδύμων είναι ένας τρόπος διαχείρισης κατασκευής στον οποίο οι τεχνολογίες πληροφοριών και παρακολούθησης εφαρμόζονται σε ένα σύστημα σχεδιασμού και ελέγχου κλειστού βρόχου. Τα ψηφιακά δίδυμα δεν πρέπει να θεωρούνται απλώς ως μια λογική εξέλιξη από το BIM ή ως επέκταση των εργαλείων BIM που είναι ενσωματωμένα με τεχνολογίες ανίχνευσης και παρακολούθησης. Αντίθετα, είναι ένας ολοκληρωμένος τρόπος λειτουργίας που δίνει προτεραιότητα στο κλείσιμο των βρόχων ελέγχου βασίζοντας τις αποφάσεις διαχείρισης σε πληροφορίες που είναι αξιόπιστες, ακριβείς, εμπειριστατωμένες και χρονοβόρες. Αυτές οι πληροφορίες παρέχονται με δύο βασικούς τρόπους:

1. συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης των πληροφοριών σχεδιασμού, των αλυσίδων εφοδιασμού και των συνθηκών στον χώρο εγκατάστασης σε συνδυασμό με το CEP για να συναχθεί η τρέχουσα κατάσταση και
2. η εκτεταμένη χρήση της ανάλυσης δεδομένων και των προσομοιώσεων μηχανικής για την αξιολόγηση της πιθανά αποτελέσματα εναλλακτικών αποφάσεων σχεδιασμού και σχεδιασμού. Έτσι, οι αποφάσεις λαμβάνονται μέσα σε ένα πλαίσιο συνειδητοποίησης της κατάστασης.



Νέα Τεχνολογία	Προτεινόμενη Έρευνα	Στόχος
Νέα γενιά στη χρήση δεδομένων αισθητήρα τοποθεσίας και wearables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Βελτιωμένη διεπαφή μεταξύ μηχανών και ανθρώπου μέσω της χρήσης δεδομένων αισθητήρων που φοριούνται (wearables).</li> <li>• Εφαρμογές ανάλυσης δεδομένων σε δεδομένα από εργαζόμενους για τη διασφάλιση αποτελεσματικότητας και ασφάλειας.</li> <li>• Ανάπτυξη νέας συνεργατικής πλατφόρμας ως ενιαίο σημείο συλλογής δεδομένων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αλλαγή στα διαθέσιμα δεδομένα από πολλαπλές πηγές.</li> <li>• Βελτίωση της παραγωγικότητας, της ευημερίας και της ασφάλειας των εργαζομένων.</li> <li>• Ο σχεδιασμός της διάταξης του εργοταξίου θα βελτιωθεί και η λήψη αποφάσεων του εργοταξίου θα υποστηρίζεται από έξυπνες πληροφορίες.</li> <li>• Βελτιωμένη κατανόηση του αντίκτυπου της εργασίας στο εργοτάξιο που οδηγεί στον εντοπισμό πιο αποτελεσματικών τρόπων εργασίας.</li> </ul>
Συνεργατικά μοντέλα και data analytics	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανάπτυξη συνεργατικών και διασυνδεδεμένων πλατφορμών ως ενιαίο σημείο συλλογής δεδομένων.</li> <li>• Ανάπτυξη καθιερωμένων εργαλείων data analytics για τη μετατροπή δεδομένων σε ουσιαστική γνώση, ώστε να επηρεαστεί ο σχεδιασμός της τοποθεσίας και η ασφάλεια των εργαζομένων στην τοποθεσία σε πραγματικό χρόνο.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Βελτιωμένα εθνικά αρχεία και μέτρηση της απόδοσης σε όλα τα εργοτάξια. Ολιστική απόκτηση γνώσεων από πολλαπλές τοποθεσίες.</li> <li>• Παροχή πληροφοριών για τον καλύτερο σχεδιασμό των διεπαφών ανθρώπου-μηχανής.</li> <li>• Οι πληροφορίες από τα αυξημένα επίπεδα δεδομένων θα βοηθήσουν στην ανάπτυξη βιώσιμων και αποτελεσματικών επιχειρηματικών πρακτικών και λύσεων.</li> </ul>
Τεχνολογία επεξεργασίας βίντεο και ήχου	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνδυασμός οπτικοακουστικού υλικού κατά την κατασκευή ψηφιακών διδύμων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατά τη δημιουργία ενός ψηφιακού δίδυμου, μπορεί να καταγραφεί και να χαρτογραφηθεί οποιασδήποτε τοποθεσία και οι περιοχές γύρω από αυτή. Αυτό θα παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού ανωμαλιών που μπορεί να είναι επικίνδυνες.</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"><li>• Τα μερικώς κατασκευασμένα κτίρια θα μπορούν να σηματοδοτούν προειδοποιήσεις κινδύνου και πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάστασή τους στους εργαζομένους στις έξυπνες συσκευές που κρατούν ή έχουν φθαρεί.</li></ul>
--	--	--

**Πίνακας 3: Στόχοι κατευθύνσεων μελλοντικής έρευνας στα ψηφιακά δίδυμα με βάση τις αναμενόμενες τεχνολογικές εξελίξεις**

# Κεφάλαιο 3. Digital Twins: Ανασκόπηση και Ανάλυση Πραγματικών Περιπτώσεων Εφαρμογής

## 3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη συζητηθεί, τα ψηφιακά δίδυμα βασίζονται σε δεδομένα, κάτι το οποίο σε πρακτικό επίπεδο θέτει αρκετές προκλήσεις διαχείρισης, που σχετίζονται ιδιαίτερα με τον τρόπο ενοποίησης δεδομένων από αυτόνομες, ανόμοιες και ετερογενείς πηγές. Τα ζωτικά δεδομένα που απαιτούνται ως είσοδοι για αλγόριθμους παρακολούθησης και πρόβλεψης βρίσκονται συχνά σε μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων με διαφορετικές πλατφόρμες λογισμικού και συστήματα βάσεων δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί πως ένα βασικό πρόβλημα που προκύπτει εξαιτίας αυτού είναι η έλλειψη παγκοσμίως μοναδικού αναγνωριστικού για εγγραφές δεδομένων σε διαφορετικά συστήματα (Talburt, 2011), παρά το ότι γίνονται ήδη σε παγκόσμιο επίπεδο έργα που αφορούν και συμπεριλαμβάνουν τη σχεδίαση, ανάπτυξη και χρήση ψηφιακών διδύμων σε πραγματικό χρόνο.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κατόπιν της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, κρίθηκε απαραίτητη η εξέταση πραγματικών περιπτώσεων που αναπτύχθηκαν ψηφιακά δίδυμα για την ενσωμάτωση δεδομένων από πηγές όπως αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο, συστήματα διαχείρισης κτιρίων, υπηρεσίες cloud και συστήματα διαχείρισης κτιρίων κ.λπ. για την ενοποίηση διαφόρων πόρων δεδομένων, την ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων, τη δοκιμή προτεινόμενης αρχιτεκτονικής συστήματος, την παροχή πιθανών εφαρμογών και τη σύνοψη βασικών στοιχείων που μαθαίνονται για την ανάπτυξη δυναμικών ψηφιακών διδύμων σε επίπεδα κτιρίων.

### 3.2 Ανάπτυξη Ψηφιακών Διδύμων για Σιδηροδρομικές Γέφυρες

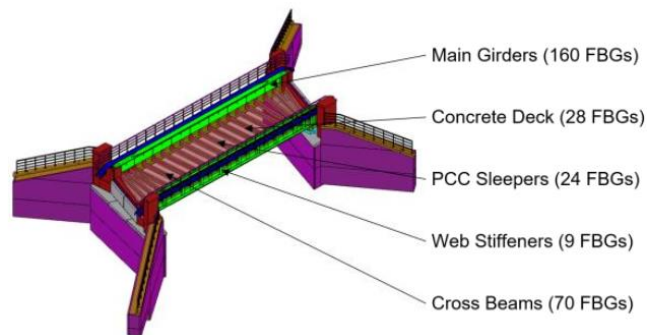
Οι γέφυρες είναι συστήματα υποδομής ζωτικής σημασίας που συνδέουν διαφορετικές περιοχές και παρέχουν ευρέως κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να σχεδιάζονται, να κατασκευάζονται και να συντηρούνται κατάλληλα ώστε να προσαρμόζονται τόσο στις μεταβαλλόμενες συνθήκες χρήσης και όσο και στις κλιματικές συνθήκες. Με την ταχεία ανάπτυξη της ικανότητας συλλογής δεδομένων παρακολούθησης γεφυρών, αναδύεται μια πρόκληση λόγω της ανεπαρκούς ικανότητας διαχείρισης, επεξεργασίας και ερμηνείας μεγάλων συνόλων δεδομένων παρακολούθησης για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών που έχουν πρακτική αξία για τον κλάδο.

Σε έρευνα των Ye κ.ά. (2019) αναπτύχθηκαν ψηφιακά δίδυμα με σκοπό να αξιοποιηθεί ως εικονική αναπαράσταση της φυσικής υποδομής (δηλαδή του φυσικού δίδυμου), και να ενημερώνονται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο καθώς συλλέγονται νέα δεδομένα για δύο διαφορετικές γέφυρες. Στόχος των διδύμων ήταν να παρέχουν ανατροφοδότηση στο φυσικό δίδυμο και να εκτελούν σενάρια σχετικά με το «τι θα γινόταν αν» για την αξιολόγηση κινδύνων και την πρόβλεψη της απόδοσης της κατασκευής. Η έρευνα διήρκησε δύο χρόνια και συμπεριελάμβανε τη δημιουργία των ψηφιακών διδύμων γεφυρών για σκοπούς δομικής παρακολούθησης που συμπεριελάμβανε διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ πολιτικών μηχανικών στο Κέντρο Έξυπνων Υποδομών και Κατασκευών του Cambridge (CSIC) και στατιστικών στο Ινστιτούτο Alan Turing (ATI), χρησιμοποιώντας δύο σιδηροδρομικές γέφυρες στο Staffordshire του Ηνωμένου Βασιλείου ως μελέτη περίπτωσης. Στα πλαίσια αυτής, διερευνήθηκαν τέσσερις τομείς έρευνας:

- (i) διαχείριση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με χρήση BIM,
- (ii) προσεγγίσεις που βασίζονται στη φυσική,
- (iii) προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα και
- (iv) προσεγγίσεις μηχανικής με επίκεντρο δεδομένων (δηλ. σύνθεση βασισμένων στη φυσική και προσεγγίσεις βάσει δεδομένων).

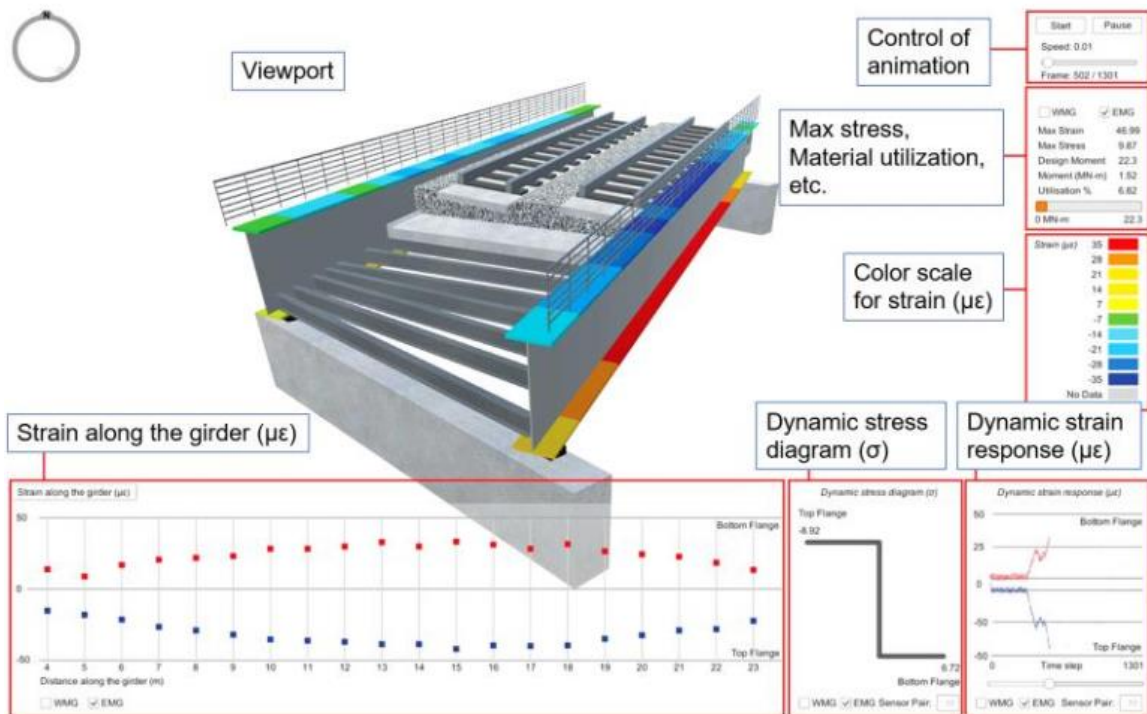
Οι δύο πρόσφατα κατασκευασμένες σιδηροδρομικές γέφυρες στο Staffordshire του Ηνωμένου Βασιλείου χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή τους με δίκτυα αισθητήρων

οπτικών ινών (FOS) που περιλάμβαναν διακριτά Fiber Bragg Grating (FBG) και καταναμημένα συστήματα αισθητήρων Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR). Πρόκειται για την IB5, μία χαλύβδινη μισή γέφυρα με σύνθετο κατάστρωμα και εξοπλισμένη με 291 αισθητήρες FBG και την UB11, μια γέφυρα προεντεταμένου σκυροδέματος με τσιμεντένιο κατάστρωμα πλήρωσης και εξοπλισμένη με 220 αισθητήρες FBG και 260 m καλωδίων BOTDR. Ο πρωταρχικός στόχος ήταν η διεξαγωγή αξιολόγησης συμπεριφοράς σε πρώιμο στάδιο με στόχο την ενημέρωση της μακροπρόθεσμης παρακολούθησης της κατάστασης. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για το IB5.



**Εικόνα 3.1:** Ολοκληρωμένη γέφυρα IB5 και η αντίστοιχη διάταξη των οργάνων αισθητήρων της.

Για την οπτικοποίηση δεδομένων αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο αξιοποιήθηκε το μοντέλο BIM (Εικόνα 3.1). Τα σύνολα δεδομένων ενσωματώθηκαν σε ένα δυναμικό περιβάλλον BIM για την οπτικοποίηση δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και τη συσχετισμένη συμπεριφορά γέφυρας (Davila Delgado et al., 2017). Συγκεκριμένα, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στον εντοπισμό ανωμαλιών στα δεδομένα (λόγω π.χ. ελαττωματικών αισθητήρων, ανώμαλης συμπεριφοράς, κ.λπ.) καθώς και για την οπτικοποίηση της εξέλιξης τάσεων/τάσης, κατανομής τάσεων/τάσης και χρήσης υλικού. Ένα παράδειγμα δυναμικού μοντέλου BIM του IB5 φαίνεται στην Εικόνα 3.2, που παρουσιάζει έναν χρωματικό χάρτη κατανομής καταπόνησης/τάσης και την αντίστοιχη δομική χρήση των δύο κύριων δοκών, τόσο κατά μήκος των διαμήκων αξόνων τους όσο και σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος διέλευσης τρένου.



**Εικόνα 3.2: Μοντέλο BIM για τη γέφυρα IB5 και τους αισθητήρες πραγματικού χρόνου**

Χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος κινητού μέσου όρου για την αφαίρεση τόσο των βραχυπρόθεσμων όσο και των μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών τάσεων (π.χ. επιδράσεις των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας) και για την εξαγωγή μεμονωμένων συμβάντων διέλευσης τρένου. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε γραμμική δυναμική (στατιστική) μοντελοποίηση για την εκτέλεση βραχυπρόθεσμων προβλέψεων και για τον εντοπισμό ανωμαλιών στα δεδομένα. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ροής που μπορούσε να ενημερωθεί σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, η καταπόνηση από τον αισθητήρα  $s$  στο χρονικό βήμα  $t$  προβλέπεται ως ένας γραμμικός συνδυασμός μετρήσεων καταπόνησης από όλους τους άλλους αισθητήρες στο προηγούμενο χρονικό βήμα  $t-1$ . Τέλος, αναπτύχθηκε το εννοιολογικό πλαίσιο για μια προσέγγιση της Μηχανικής με επίκεντρο τα δεδομένα (DCE), ενσωματώνοντας προσεγγίσεις που βασίζονται στη φυσική και σε δεδομένα για να αξιοποιήσουν καλύτερα τα πλεονεκτήματα και τις δυνατότητές τους (Butler et al., 2018). Μια προσέγγιση DCE μοντελοποιεί την απόκριση γέφυρας ενσωματώνοντας και

εξισορροπώντας τις πληροφορίες από το μοντέλο που βασίζεται στη φυσική (το οποίο έχει απλοποιητικές υποθέσεις και σφάλματα μοντελοποίησης) με τις εισερχόμενες πληροφορίες από διάφορα σύνολα δεδομένων παρακολούθησης (τα οποία έχουν σφάλματα μέτρησης), με στόχο την ελαχιστοποίηση συστηματικών σφαλμάτων, ποσοτικοποιώντας τις υποκείμενες αβεβαιότητες και συνδυάζοντας πολλαπλές πηγές δεδομένων που είναι συχνά ετερογενείς στη φύση.

Για παράδειγμα, μια μέθοδος DCE που βασίζεται στη διεργασία Gauss (GP) έχει αναπτυχθεί με την ενσωμάτωση των GP με μοντέλα που βασίζονται στη φυσική (π.χ. μοντέλα FE). Όπως έγινε φανερό από τα αποτελέσματα της έρευνας και υλοποίησης, ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αναπτυχθεί ενσωματώνοντας πολλαπλούς πόρους δεδομένων κάτω από μια ενοποιημένη δομή δεδομένων καθώς και πολλαπλά μοντέλα προσομοίωσης για να παρέχει πιο σίγουρες προβλέψεις. Τα βασικά οφέλη ενός ψηφιακού δίδυμου γεφυρών περιλαμβάνουν: αποτελεσματική αναζήτηση σχετικών δεδομένων, ολοκληρωμένες δυνατότητες επεξεργασίας και ερμηνείας δεδομένων, συνεργατικό περιβάλλον για διάφορα στάδια ενός έργου γέφυρας, κ.ά.. Η σύνθεση αναλυτικών προσεγγίσεων βασισμένων στη φυσική και τα δεδομένα, διερευνήθηκε από ομάδα πολιτικών μηχανικών αλλά και στατιστικολόγων για την εξαγωγή μεγαλύτερης αξίας πληροφοριών από τα δεδομένα της γέφυρας. Όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, μελλοντικές εργασίες θα απαιτήσουν την ανάπτυξη της μεθοδολογίας για την ενσωμάτωση διαφόρων μοντέλων πληροφοριών και προσομοίωσης, καθώς και ετερογενών συνόλων δεδομένων σε ένα λειτουργικό ψηφιακό δίδυμο, καθώς επίσης και βελτίωση του επιπέδου εμπιστοσύνης στο ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης και στις προβλέψεις του

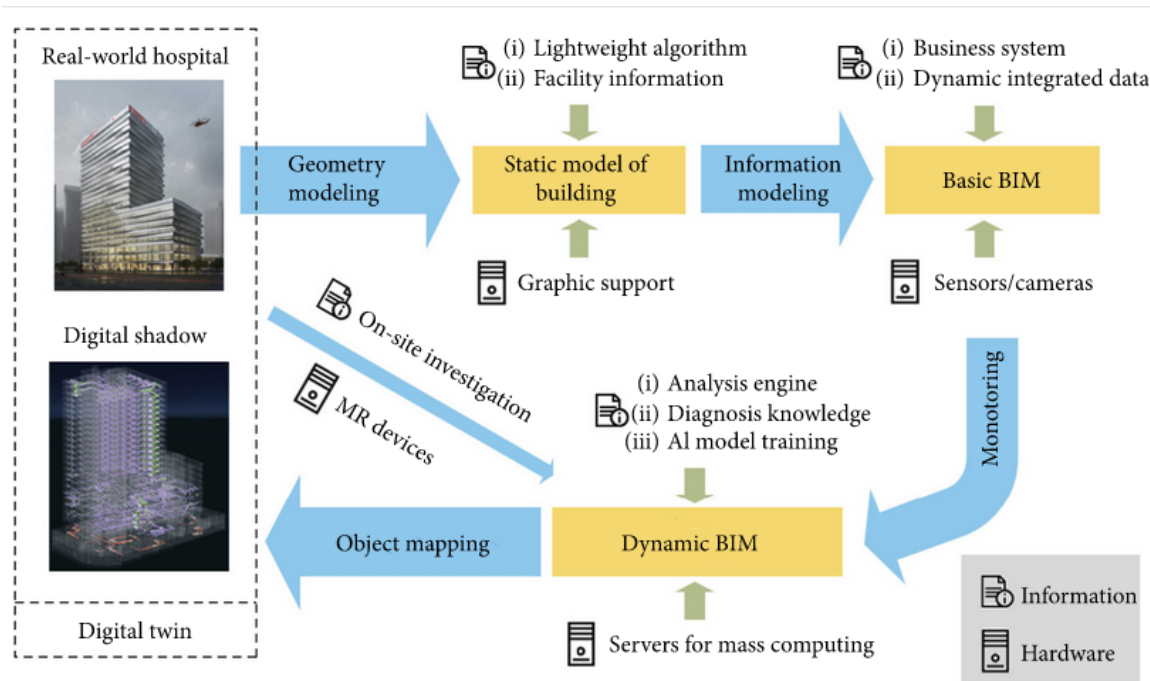
### 3.3 Ψηφιακό Δίδυμο Νοσοκομείου

Η ενσωμάτωση έξυπνων συσκευών είναι πάντα ένα κρίσιμη αλλά αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα βήματα κατά την καθιέρωση των ψηφιακών διδύμων. Οι σύγχρονοι έξυπνοι αισθητήρες παράγουν πολύτιμες πληροφορίες δημιουργώντας εξαιρετικά τεράστια δεδομένα. Μία από τις κύριες συνεισφορές αυτής της εργασίας των Peng κ.ά. (2020) είναι η ενσωμάτωση της μεθόδου συνεχούς ολοκλήρωσης και χειρισμού των δεδομένων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του κτιρίου με στόχο την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται και την ανατροφοδότηση χρήσιμων πληροφοριών πίσω στην πραγματικότητα. Στα πλαίσιά της, αναπτύχθηκε ένα πλήρες ψηφιακό δίδυμο για το Shanghai East Hospital που συνδέεται με το Πανεπιστήμιο Tongji, ένα γενικό νοσοκομείο που βρίσκεται στην επιχειρηματική ζώνη Lujiazu της Σαγκάης, στην Ανατολική Κίνα. Το κτίριο αποτελούνταν από 24 ορόφους, πάνω από το έδαφος και 2 υπόγειους ορόφους με 500 κλίνες, συνολικής επιφάνειας κατασκευής περίπου 83000 τετραγωνικών μέτρων.

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) εισήχθη στο πλαίσιο των ψηφιακών διδύμων για περαιτέρω ανάλυση μετά την ενοποίηση δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της αναγνώρισης συμβάντων, της διάγνωσης σφαλμάτων και της αυτοματοποιημένης λήψης αποφάσεων. Η ανάλυση συνήθως περιλαμβάνει ισχυρά μοντέλα μηχανικής μάθησης ή βαθιά νευρωνικά δίκτυα. Η Διαδικασία Φυσικής Γλώσσας (NLP) και οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση μοτίβων σφαλμάτων από επισκευές ρουτίνας. Με βάση τη συλλεγόμενη ενημερωμένη ροή πληροφοριών, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό λόγω του συγχρονισμού (Austin et al., 2020). Έτσι, ενσωματώθηκε μια έξυπνη μηχανή διάγνωσης στην καρδιά του συστήματος λογισμικού του ψηφιακού διδύμου. Πριν από την κατασκευή του νέου κλινικού κτιρίου, εξετάστηκε ο μηχανολογικός και ηλεκτρικός εξοπλισμός του Νοσοκομείου, καθώς περιλαμβάνει σύνθετα συστήματα που λειτουργούν ξεχωριστά, συμπεριλαμβανομένων επαγγελματικών ιατρικών συστημάτων όπως συστήματα αερίου, συστήματα επεξεργασίας λυμάτων και σύστημα ιατρικού εξοπλισμού. Το σύστημα συντήρησης και διαχείρισης χώρου που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και δεν ήταν δυνατό να ενσωματώσουν ένα ενοποιημένο σύστημα



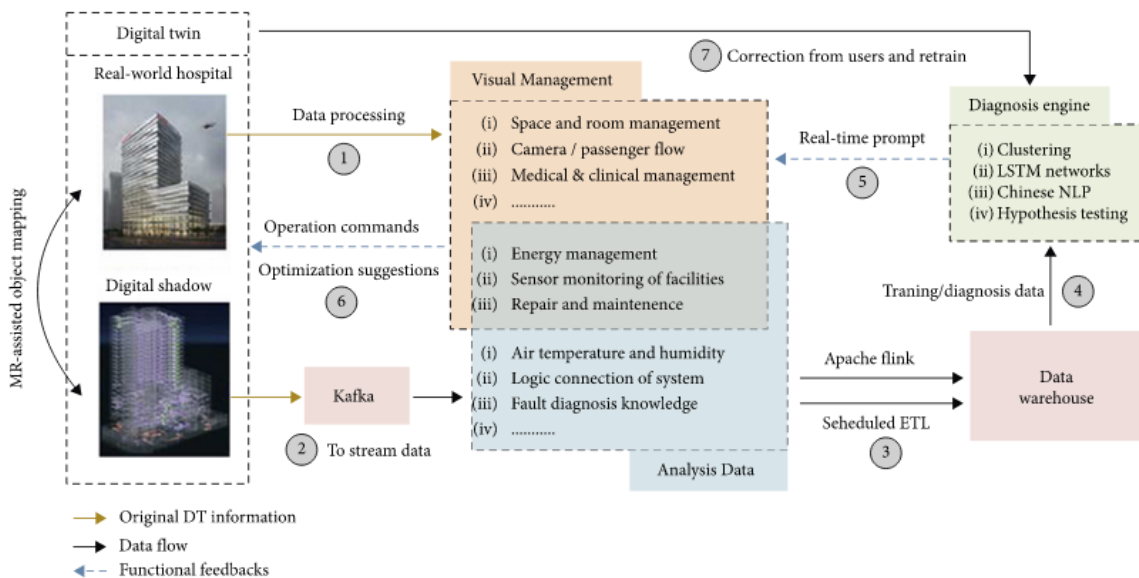
σύμφωνα με τη ζήτηση ιατρικών υπηρεσιών. Το κτίριο του νοσοκομείου χρειάζεται συνεχή λειτουργία για 24 ώρες καθημερινά, καθιστώντας σχεδόν αδύνατο να παρακολουθηθούν και να αναλυθούν μεγάλα σύνολα δεδομένων από πολλές πηγές.



Εικόνα 3.3: Κύρια βήματα για τη δημιουργία πλήρους ψηφιακού διδύμου με βάση το πραγματικό

Η Εικόνα 3.3 δείχνει τα κύρια βήματα για τη δημιουργία του ψηφιακού διδύμου για το κτίριο του νοσοκομείου, ξεκινώντας από ένα πραγματικό νοσοκομείο και τελειώνοντας στο πλήρες ψηφιακό δίδυμο. Το πρώτο βήμα ήταν η ψηφιοποίηση του νοσοκομείου μέσω μοντελοποίησης γεωμετρίας. Η μοντελοποίηση γεωμετρίας διεξήχθη κυρίως με σχέδια CAD από τη φάση σχεδιασμού, ενώ η μέθοδος τρισδιάστατου νέφους σημείων με σάρωση λέιζερ ή φωτογραμμετρία δοκιμάστηκε σε πολύπλοκα μηχανικά δωμάτια. Μετά από αυτό, η διαδικασία μοντελοποίησης του BIM ήταν ένα από τα κύρια βήματα ολοκλήρωσης. Γενικά, ο διαχωρισμός των δεδομένων στατικής οντολογίας και των δυναμικά παραγόμενων πληροφοριών είναι απαραίτητος για να διασφαλιστεί η εγγενής στο σύστημα ασφάλεια δεδομένων και επίσης για να ταιριάζουν στις κατάλληλες στρατηγικές αποθήκευσης. Ως εκ τούτου, κατασκευάστηκε για πρώτη φορά ένα βασικό BIM, το οποίο ενσωματώνει στατικά

μοντέλα και πληροφορίες οντολογίας. Με την παρακολούθηση των διαδικασιών μέσω επιχειρηματικών συστημάτων και συσκευών αισθητήρων, προέκυψε ένα δυναμικό πλέον BIM, δηλαδή η ψηφιακή σκιά. Μηχανές ανάλυσης με προκαθορισμένες γνώσεις και μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης προστέθηκαν αμέσως μετά την έλευση των δεδομένων της οθόνης. Τέλος, η διαδικασία χαρτογράφησης αντικειμένων από την επιτόπια έρευνα ήταν σημαντική για τη σύνδεση με το νοσοκομείο του πραγματικού κόσμου. Όλες οι λειτουργικές ενότητες και οι προτάσεις διάγνωσης θα πρέπει να αποστέλλονται πίσω σε ένα κτήριο του πραγματικού νοσοκομείου με βάση τη σωστή χαρτογράφηση αντικειμένων.



**Εικόνα 3.4: Παράδειγμα τοποθέτησης αισθητήρων σε πρόσοψη κτιρίου για τη δημιουργία περιορισμένου ψηφιακού διδύμου (Khaiani κ.ά., 2019)**

Έτσι, αναπτύχθηκε ένα ενοποιημένο σύστημα ψηφιακών διδύμων για υπολογιστές, εφαρμογές smartphone και tablet με βάση τη μέθοδο συνεχούς ενοποίησης. Η εικόνα 3.4 αναδεικνύει τα κύρια στοιχεία του συστήματος με επίκεντρο την οπτική διαχείριση και τη λογική λειτουργίας τους. Αρχικά, επεξεργάστηκαν ακατέργαστα δεδομένα από πραγματικό νοσοκομείο και η ψηφιακή σκιά και στη συνέχεια μετατράπηκαν και αποθηκεύθηκαν τα δεδομένα ανάλυσης της κατάστασης του κτιρίου σε μορφή κατάλληλη για εκπαίδευση AI (Βήμα 3). Η βάση δεδομένων παρείχε πρώτα κατάλληλα δεδομένα εκπαίδευσης σε μοντέλα

τεχνητής νοημοσύνης. Μετά από κατάλληλη εκπαίδευση, αυτά τα μοντέλα AI σχημάτισαν μια μηχανή διάγνωσης και λάμβαναν συχνά δεδομένα διάγνωσης από την αποθήκη δεδομένων (Βήμα 4). Μόλις εντοπιστεί ένα πρόβλημα, θα πρέπει να επιστρέψει αμέσως στις διεπαφές οπτικής διαχείρισης (Βήμα 5). Τέλος, δόθηκαν κάποιες στοχευμένες εντολές ή προτάσεις προς το κτίριο του ψηφιακού δίδυμου νοσοκομείου (Βήμα 6). Εάν οποιαδήποτε πρόταση διάγνωσης επιβεβαιωθεί ως λανθασμένη, πρέπει να σταλεί πίσω και οι αλγόριθμοι AI θα πρέπει να κάνουν τις αντίστοιχες προσαρμογές (Βήμα 7).



**Εικόνα 3.5: Βασική αίθουσα κέντρου ελέγχου ψηφιακών δίδυμων του Νοσοκομείου Shanghai East Hospital**

Κατά την υλοποίηση αυτής της υποδειγματικής περίπτωσης, η ομάδα των ερευνητών διαπίστωσε ότι τα ψηφιακά δίδυμα δεν είναι ακόμα πλήρως προσαρμοσμένα στις ανάγκες των κτιριακών έργων. Τουλάχιστον, τρεις πτυχές των ελλείψεων απαιτούσαν περαιτέρω έρευνα:

1. Το ψηφιακό δίδυμο δεν είναι σε θέση ακόμη να πραγματοποιεί τον αυτόματο έλεγχο του ελαττωματικού ιατρικού εξοπλισμού. Εάν υλοποιούνταν η λειτουργία ελέγχου, θα απαιτούνταν πρόσθετος εντοπισμός σφαλμάτων του συστήματος, ο οποίος θα οδηγούσε σε δυσβάσταχτο κόστος. Ωστόσο, εάν το ψηφιακό δίδυμο μπορούσε να επιτύχει την αξιόπιστη αυτόματη ρύθμιση κρίσιμων μηχανισμών και

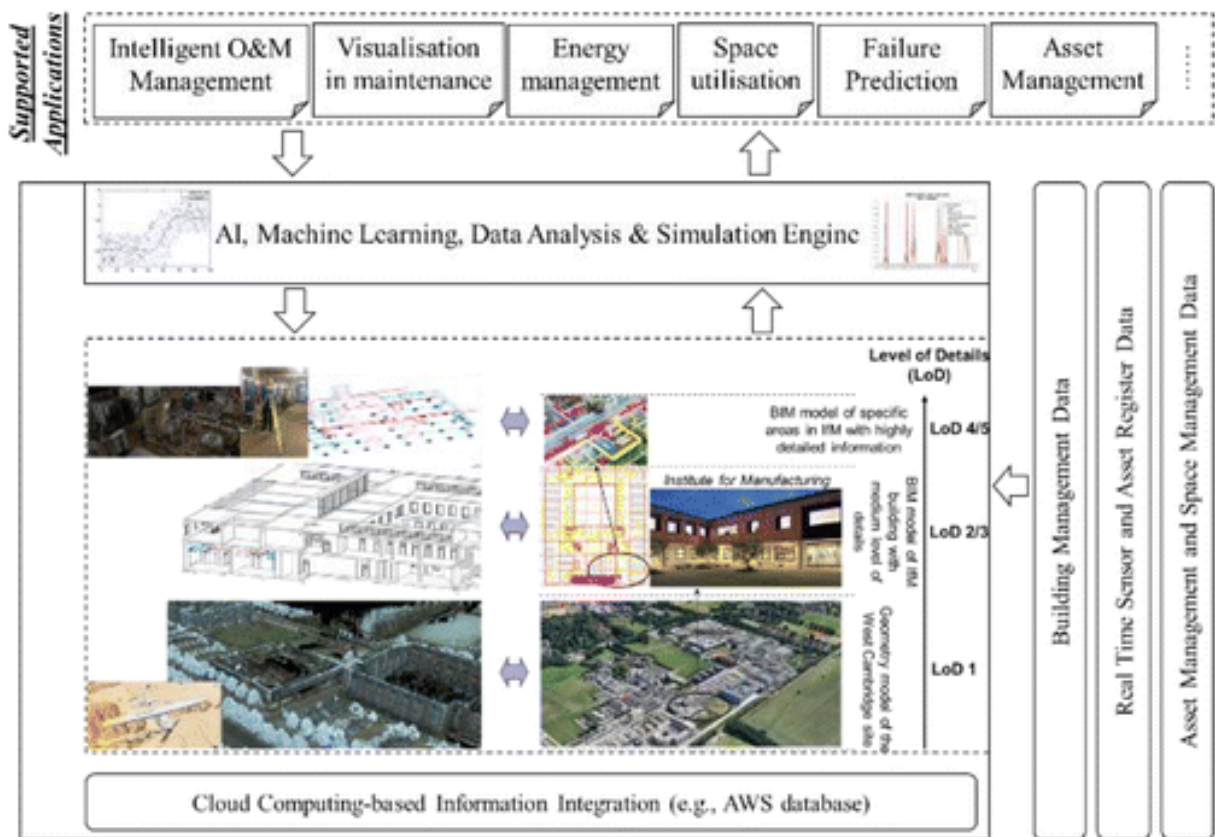
να εξαλείψει αυτόνομα την κατάσταση σφάλματος, όπως να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, θα ενίσχυε σημαντικά την πρακτική αξία του

2. Οι οικονομικοί κίνδυνοι εξακολουθούν να είναι σημαντικοί όταν χρησιμοποιείται ευρέως το ψηφιακό δίδυμο σε κτιριακά έργα. Η δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου περιλαμβάνει μεγάλης κλίμακας κατασκευή δικτύων για ευφυείς αισθητήρες, κάμερες, ασύρματους κ.λπ. Χωρίς προσεκτικό σχεδιασμό στην αρχή της φάσης σχεδιασμού, θα είναι πολύ δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να προστεθούν τέτοιες συσκευές υλικού σε ένα όπως έχει κατασκευαστεί οικοδομικό έργο. Τα κέντρα ελέγχου για το σύστημα διαχείρισης διακρίνονται επίσης από πολύ υψηλό κόστος. Ως εκ τούτου, πρέπει να υπάρχουν ισχυρά κίνητρα και σαφής διορατικότητα. Ένα έργο θα πρέπει να χρησιμοποιεί τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων εάν αυτό αποδειχθεί οικονομικά επωφελές.
3. Παρόλο που η πρώιμη μετακίνηση των γενικών εργολάβων αποδείχθηκε έγκυρη στην επεξεργασία δεδομένων, η ανάπτυξη του συστήματος στη συνέχεια περιλάμβανε κουραστικές διαπραγματεύσεις με τους ιδιοκτήτες του κτιρίου. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το ότι υπάρχουν πάντα ενσωματωμένα ευαίσθητα δεδομένα. Εάν απόρρητα δεδομένα, όπως τα προσωπικά δεδομένα ασθενών για αναγνώριση προσώπου, ήταν ανοιχτά στους προγραμματιστές, τα όρια των ευθυνών για την ασφάλεια δεν θα ήταν τόσο ξεκάθαρα. Από την άλλη, εάν δεν ήταν ανοιχτά, οι λειτουργίες οπτικής διαχείρισης του συστήματος ψηφιακών διδύμων δεν θα είναι ολοκληρωμένες.

Όπως γίνεται φανερό, θα πρέπει να βρεθεί μία ισορροπία μεταξύ της λειτουργίας του συστήματος και της ασφάλειας των πληροφοριών, κάτι για το οποίο απαιτούνται τόσο τεχνικές γνώσεις όσο και διοικητικές καινοτομίες.

### 3.4 Δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο της Πανεπιστημιούπολης του Cambridge

Μία ακόμη μελέτη περίπτωσης ανάπτυξης ενός δυναμικού ψηφιακού διδύμου σε επίπεδο κτιρίου διεξήχθη στην τοποθεσία του δυτικού Cambridge και χρησιμοποιήθηκε το Institute for Manufacturing (IfM) ως περιοχή στόχος, όπως περιγράφεται σε δημοσίευση των Lu κ.ά.(1). Η έρευνα ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2017. Το κτίριο IfM είναι ένα τριώροφο κτίριο στο δυτικό χώρο του Cambridge και περιλαμβάνει χώρους μελέτης, γραφείου, έρευνας και εργαστηρίου, καλύπτοντας πάνω από 40000 τετραγωνικά πόδια (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Ανάπτυξη δυναμικών ψηφιακών διδύμων στην Πανεπιστημιούπολη του Cambridge

Αυτό το δυναμικό ψηφιακό δίδυμο αναπτύχθηκε με βάση την προτεινόμενη αρχιτεκτονική συστήματος όπως αυτή εμφανίζεται στην Εικόνα 3.7. Η αρχιτεκτονική αποτελείται από πέντε επίπεδα: το επίπεδο απόκτησης δεδομένων, το επίπεδο μετάδοσης, το επίπεδο ψηφιακής μοντελοποίησης και το συμπληρωματικό επίπεδο δεδομένων, το επίπεδο ολοκλήρωσης δεδομένων/μοντέλου και το επίπεδο εφαρμογής.

Το επίπεδο απόκτησης δεδομένων είναι το θεμέλιο κάθε ψηφιακό δίδυμο και τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων. Λόγω της τεχνολογικής προόδου, η απόκτηση δεδομένων χωρίς επαφή (π.χ. RFID, κωδικοί QR, τεχνικές βάσει εικόνας), κατακεκομημένα συστήματα αισθητήρων, ασύρματη επικοινωνία, πρόσβαση σε κινητά (π.χ. περιβάλλον WiFi) κ.λπ. είναι διαθέσιμες στις αγορές αυτήν τη στιγμή. Με βάση τις διαφορετικές απαιτήσεις λειτουργιών της καθημερινής διαχείρισης κτιρίων, οι τεχνικές και τα συστήματα πρέπει να συνδέονται με τα φυσικά τους στοιχεία και να σχεδιάζονται με βάση την καλά οργανωμένη αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου.

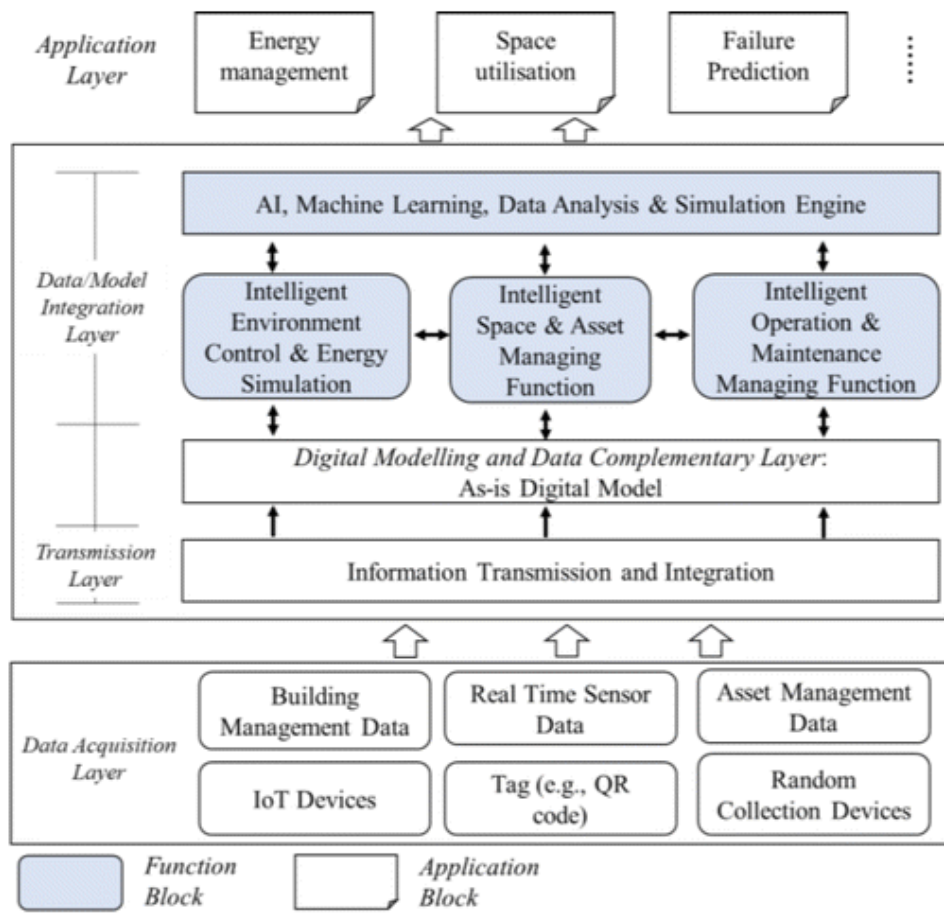
Το επίπεδο μετάδοσης στοχεύει κυρίως στη μετατροπή των συλλεγόμενων δεδομένων στα ανώτερα επίπεδα. Τα δεδομένα θα συλλέγονται από φυσικές συσκευές, οι οποίες είναι προσαρτημένες σε φυσικά περιουσιακά στοιχεία/χώρους ενός κτιρίου ή περιβάλλοντος περιβάλλοντος. Σε αυτό το επίπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως 5G, δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής κατανάλωσης (LP-WAN). Μεταξύ όλων των διαθέσιμων τεχνολογιών, το Wi-Fi είναι η γνωστή τεχνολογία ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) και ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Η ψηφιακή μοντελοποίηση και το συμπληρωματικό επίπεδο δεδομένων παρουσιάζουν το ψηφιακό μοντέλο (π.χ. BIM) και συμπληρώνουν πληροφορίες που υποστηρίζουν τα ανώτερα στρώματα. Διαφορετικοί τύποι ψηφιακών μοντέλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς. Για παράδειγμα, το ενεργειακό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση ενέργειας και το μοντέλο που βασίζεται σε πράκτορες θα μοντελοποιήσει σενάρια και θα υποστηρίξει την απόφαση. Όταν σχεδιάζεται ένα ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ σε επίπεδα κτιρίου, απαιτείται να καθοριστούν προκαθορισμένες διαδικασίες και τύποι μοντελοποίησης και θα επιβεβαιωθούν συμπληρωματικά δεδομένα για περαιτέρω εφαρμογές.

Το επίπεδο ενοποίησης δεδομένων/μοντέλου είναι ο πυρήνας σε αυτήν την αρχιτεκτονική, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης, ανάλυσης, ενοποίησης, επεξεργασίας και λειτουργιών λήψης αποφάσεων που υποστηρίζονται από AI κ.λπ. δεδομένων και μοντέλων (Glaessgen & Stargel, 2012). Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, οι λειτουργίες ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θα ενημερώνουν



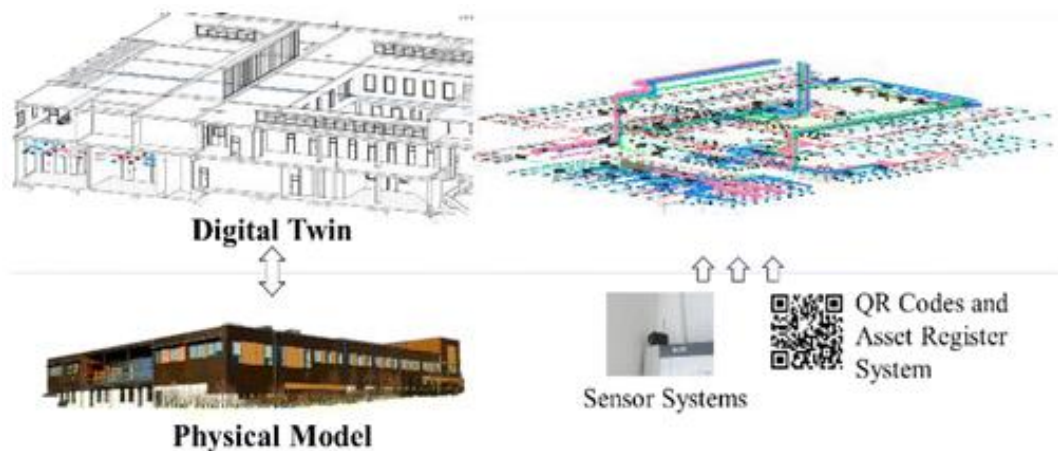
ως έχουν τα περιουσιακά στοιχεία ή τα περιβάλλοντα του κτιρίου (συμπεριλαμβανομένων των εντολών εργασίας, των ενημερωμένων πληροφοριών συντήρησης, της κατάστασης). Τα οπτικοποιημένα πλαίσια διαχείρισης δεδομένων/μοντέλων μπορούν να επιτύχουν δυναμική και αποτελεσματική διαχείριση δεδομένων. Επιπλέον, οι έξυπνες λειτουργίες (π.χ. AI, ενότητες μηχανικής μάθησης) παρέχουν προηγμένη διαχείριση λήψης αποφάσεων (π.χ. έλεγχος χρήσης ενέργειας, χρήση χώρου και σχεδιασμός χώρου εργασίας). Το επίπεδο εφαρμογής είναι το ανώτερο επίπεδο και το επίπεδο υλοποίησης της δυναμικής αρχιτεκτονικής ψηφιακών διδύμων που αλληλοεπιδρά με τους διαχειριστές εγκαταστάσεων και παρέχει υπηρεσίες στους χρήστες.



Εικόνα 3.7: Ανάπτυξη δυναμικών ψηφιακών διδύμων στην Πανεπιστημιούπολη του Cambridge

Με βάση την προτεινόμενη αρχιτεκτονική συστήματος, το αναπτυγμένο ψηφιακό δίδυμο ενσωματώθηκε με τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από το Σύστημα Διαχείρισης

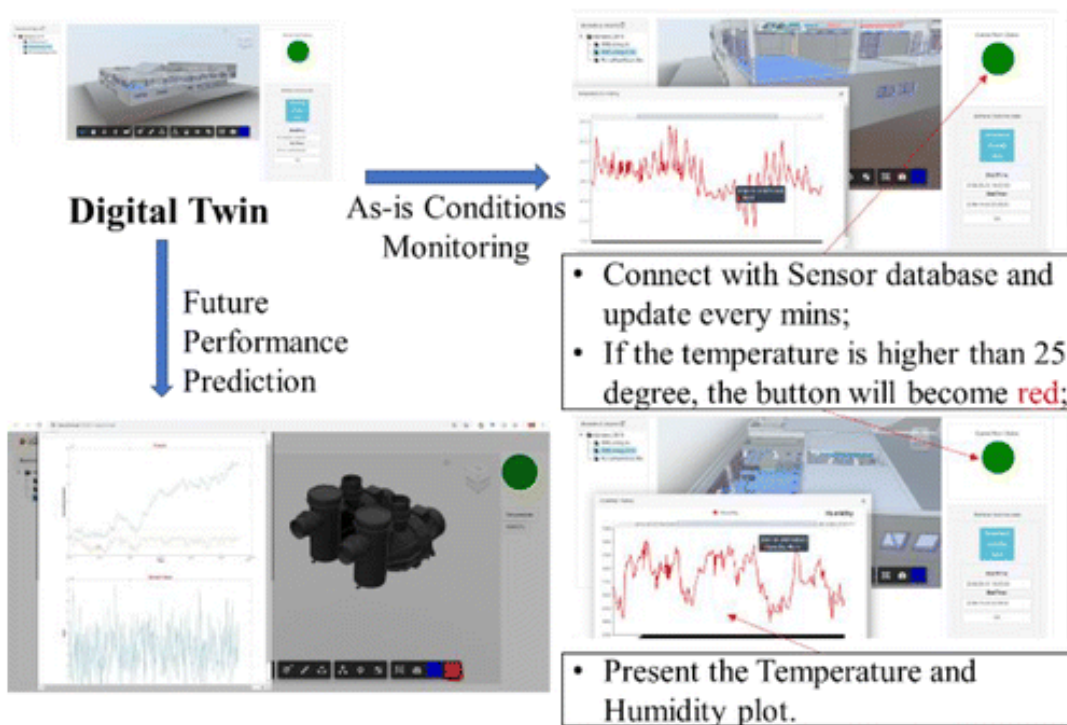
Κτιρίων (BMS), το σύστημα διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων (AMS) (Σύστημα Planet που χρησιμοποιείται στο Cambridge), το σύστημα διαχείρισης διαστήματος (SMS) (σύστημα MiCAD που χρησιμοποιείται στο Cambridge), και σύνολο δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Τα σύνολα δεδομένων αισθητήρων «σε πραγματικό χρόνο» είναι ενσωματωμένα σε μια υπολογιστική πλατφόρμα που βασίζεται σε σύννεφο (χρησιμοποιώντας το AWS σε αυτό το έργο). Τα BMS, AMS και SMS είναι όλα συστήματα ελέγχου με τη βοήθεια υπολογιστή που είναι εγκατεστημένα σε κτίρια και ελέγχουν τα μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα (π.χ. συστήματα ισχύος, συστήματα εξαερισμού και κλιματισμού θερμότητας (HVAC) και συστήματα ασφαλείας), παρέχουν υπηρεσίες περιουσιακών στοιχείων και διαχειρίζονται χώρο χρήση χωριστά για διάφορα κτίρια στην τοποθεσία του Κέιμπριτζ.



**Εικόνα 3.8: Δυναμικό μοντέλο BIM και διασύνδεση φυσικού-ψηφιακού διδύμου**

Το μοντέλο BIM με υψηλή λεπτομέρεια αναπτύχθηκε ως το κεντρικό ψηφιακό μοντέλο και πληροί τις απαιτήσεις πληροφοριών των ψηφιακών διδύμων (Εικόνα 3.8): συμπεριλαμβανομένης της αρχιτεκτονικής, της δομής και των μηχανικών, ηλεκτρικών και αντλητικών στοιχείων (MEP) και ενός μοντέλου καταγραφής περιβάλλοντος συγκεκριμένων περιοχών στο IfM με εξαιρετικά λεπτομερείς πληροφορίες (δηλαδή, δωμάτιο φυτών). Αυτό το επίπεδο είχε ως στόχο να δημιουργήσει μια οπτικοποιημένη ψηφιακή πλατφόρμα βασισμένη σε μοντέλα για τη σύνδεση μεταξύ των ανώτερων και κατώτερων επιπέδων.





Εικόνα 3.9: Παρακολούθηση των συνθηκών ως έχει και μελλοντική πρόβλεψη απόδοσης

Σε αυτήν την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων, σχεδιάστηκαν δύο κύριες προτεινόμενες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης των συνθηκών ως έχει και της μελλοντικής πρόβλεψης απόδοσης (που φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 3.9). Στη διαχείριση παρακολούθησης κτιρίου ως έχει, οι λειτουργίες παρακολούθησης θερμοκρασίας έχουν σχεδιαστεί για να διατηρούν την άνεση του περιβάλλοντος εργασίας. Στη συνάρτηση προγνωστικής συντήρησης, η υγεία του κτιρίου παρακολουθείται και αναλύεται σε πραγματικό χρόνο για την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής και 'ώστε για να καταστεί δυνατός ο αποτελεσματικός σχεδιασμός συντήρησης.

Με την εκτεταμένη προσοχή στις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων στις περιοχές AEC/FM και τις προσδοκίες να αξιοποιηθούν όλα τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών διδύμων και των ψηφιακών τεχνικών, αυτή η μελέτη παρείχε μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση και ανάλυση από την οπτική γωνία της διαχείρισης δεδομένων. Παρουσίασε

περαιτέρω μια αρχιτεκτονική συστήματος για την κατασκευή δυναμικών ψηφιακών διδύμων και παρέχει δυνατότητες για την επίτευξη αυτού του στόχου.

Όπως γίνεται σαφές, θα πρέπει να καταβληθούν περισσότερες προσπάθειες από τα πέντε προτεινόμενα επίπεδα με βάση την προτεινόμενη αρχιτεκτονική συστήματος. Συγκεκριμένα, οι λειτουργίες λήψης αποφάσεων που υποστηρίζονται από AI και οι λειτουργίες ανάλυσης δεδομένων θα βελτιώσουν σημαντικά τη νοημοσύνη και την ενσωμάτωση ολόκληρου του δυναμικού συστήματος ψηφιακών διδύμων στο επίπεδο ενοποίησης δεδομένων/μοντέλων. Επιπλέον, σύμφωνα με τους ερευνητές, η αποτελεσματική και αποδοτική επικοινωνία και αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και ψηφιακού διδύμου αποτελούν μελλοντικούς ερευνητικούς στόχους.

### 3.5 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Όπως γίνεται σαφές, ο τρόπος με τον οποίο παράγονται, μεταδίδονται, αποθηκεύονται και αξιοποιούνται τα δεδομένα θα είναι κρίσιμος στην επόμενη γενιά μεθόδων κατασκευής. Επιπλέον, η συνένωση και η σύνδεση όλων των απαραίτητων στοιχείων για την υλοποίηση ενός «συνδεδεμένου» εργοταξίου θα είναι απαραίτητη για να αντληθούν τα οφέλη στον κατασκευαστικό τομέα. Ένα σημαντικό πρόβλημα που εντοπίζεται στα ψηφιακά δίδυμα, είναι αυτό της εξομάλυνσης των διαφορών στη σημασιολογία και τη σύνταξη των δεδομένων που λαμβάνονται αλλά και το πότε πρέπει να συγχρονίζονται αντίγραφα δεδομένων προκειμένου να παρέχονται ενημερωμένα δεδομένα. Το πρόβλημα δεν είναι ασήμαντο, καθώς υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους συγχρονισμού και της ποιότητας (παλαιότητας) των δεδομένων (Lu et al., 2020). Το κόστος συγχρονισμού περιλαμβάνει το κόστος των πόρων που χρησιμοποιούνται, όπως το προσωπικό της Πληροφορικής (IT) και οι υπολογιστικοί πόροι κ.λπ. Επιπλέον, για να αποφευχθούν διακοπές στα συστήματα κατά τις εργάσιμες ώρες, οι οργανισμοί συχνά καταφεύγουν σε συγχρονισμό ομαδικών δεδομένων, ο οποίος επιχειρείται εκτός λειτουργίας το δικό μας (Theodorou κ.ά., 2015). Ωστόσο, για τα ψηφιακά δίδυμα με απαίτηση παρακολούθησης των μηχανικών στοιχείων ενεργητικού σε πραγματικό χρόνο, θα χρειαστεί μια συνεχής ροή δεδομένων, η οποία μετατοπίζει τον συμβιβασμό προς το υψηλό κόστος συγχρονισμού.

Ο τύπος των δεδομένων που παράγονται από συσκευές IoT μπορεί να χρειαστεί να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή νέων αγωγών ανάλυσης δεδομένων για εξαγωγή και παρουσίαση γνώσης. Το εύρος ζώνης επικοινωνίας αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών IoT στον ιστότοπο. Η επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται επί του παρόντος από την εφαρμογή. Στο μέλλον, μπορεί να χρειαστεί συνδυασμός τεχνολογιών επικοινωνίας με κοινό βασικό πρωτόκολλο ανταλλαγής δεδομένων, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο εξοπλισμός του κατασκευαστή εγκαταστάσεων μπορεί να αλληλεπιδρά απρόσκοπτα μεταξύ τους. Μια πρόκληση μιας τέτοιας υποδομής θα ήταν να επιτρέψει τη

διαλειτουργικότητα διαφορετικών τεχνολογιών επικοινωνίας, ενώ θα αντιμετωπίσει τα εγγενή πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες της.

Αυτή η απρόσκοπτη λειτουργία θα υποστηρίξει την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων που χρησιμοποιούν συνδέσμους δεδομένων σε ρομποτικές (κυβερνοφυσικές) εγκαταστάσεις, συσκευές IoT, έξυπνα υφάσματα και έξυπνα προϊόντα ή στοιχεία. Η χρήση «έξυπνων» κτιρίων θα μπορούσε να παρέχει επαρκή δεδομένα για να επιτρέψει, μέσω της χρήσης κατάλληλων προσεγγίσεων εξόρυξης δεδομένων και ανάλυσης, τον έξυπνο επανασχεδιασμό των επιτόπιων κατασκευών. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του ψηφιακού δίδυμου είναι η ικανότητά του να ευθυγραμμίζει τη βιωσιμότητα με τους σχεδιαστικούς στόχους. Τα διάφορα κομμάτια μιας κατασκευής μπορούν να παραχθούν σε ένα εργοστάσιο εκτός του χώρου και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν στο εργοτάξιο, έτσι ώστε τα κτίρια μπορούν όχι μόνο να συναρμολογηθούν εύκολα αλλά και να αποσυναρμολογηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν για να υποστηρίξουν μια κυκλική οικονομία. Οι αισθητήρες, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται σε φορητές συσκευές, μπορούν να παρέχουν έγκαιρες ειδοποιήσεις κινδύνου στους εργαζόμενους. Μια πιθανή νέα γραμμή έρευνας περιλαμβάνει τη διερεύνηση έξυπνων υφασμάτων που όταν φοριούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της παρουσίας χημικών ουσιών και την παρακολούθηση της υγείας.

Η χρήση φορητών συσκευών είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τους εργάτες που κατασκευάζουν αυτοκινητόδρομους που αντιμετωπίζουν πρόσθετους κινδύνους από την κινούμενη κυκλοφορία και τα συναφή καυσαέρια. Επίσης, οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν σε παθητικό εξοπλισμό που σχετίζεται με την κατασκευή, όπως οι κώνοι, για να παρέχουν ασφάλεια και έγκαιρες προειδοποιήσεις τόσο στους εργαζόμενους όσο και στους οδηγούς. Τα μοντέλα CAD είναι πλέον πιο συνηθισμένα όχι μόνο στα στάδια του σχεδιασμού, αλλά σε όλη τη διαδικασία κατασκευής και πέρα από αυτό. Με τις εξελίξεις τόσο στο υλικό ασύρματης επικοινωνίας όσο και στα σχετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, υπάρχει η δυνατότητα τα συνδεδεμένα μοντέλα εργοταξίων σε πραγματικό χρόνο να παρέχουν πλήρη υποστήριξη λήψης αποφάσεων για τον κύκλο ζωής και ίσως στο μέλλον

να λειτουργούν ως ταμπλό παρακολούθησης για ημιαυτόματες ή πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες κατασκευής.

Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων έχει πολλά πλεονεκτήματα, καθώς βελτιώνουν τη συμπεριφορά των διαδικασιών και των προϊόντων, πράγμα που σημαίνει γενικά βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους. Τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν:

- Πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν στο μέλλον. Αυτό μειώνει τα ελαττώματα του προϊόντος και μειώνει τον χρόνο κατασκευής μεταξύ άλλων.
- Βελτίωση και βελτιστοποίηση παραγωγικών διαδικασιών μέσω πραγματικής πληροφόρησης.
- Μείωση χρόνου διακοπής λειτουργίας λόγω πιθανών σφαλμάτων.
- Αποφυγή ατυχημάτων, καθώς επιτρέπουν την προσομοίωση κάθε είδους κατάστασης και περιπτώσεων.
- Μείωση του κόστους συντήρησης με την εκτέλεση εργασιών προληπτικής συντήρησης.
- Δυνατότητα συνεχούς βελτίωσης μέσω προσομοιώσεων, εντοπισμού αστοχιών και αναποτελεσματικών πρακτικών.

# Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία συμβάλλει και επεκτείνει την υπάρχουσα κατανόηση των ψηφιακών διδύμων στον κατασκευαστικό κλάδο, θεωρώντας τα πληροφοριακά συστήματα Digital Twins ως μέρος του μετασχηματισμού της διαχείρισης παραγωγής. Επιστημολογικά, τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους για να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν συστήματα παραγωγής και να δημιουργήσουν νέα γνώση συγκρίνοντας τα παρακολουθούμενα δεδομένα με τα σχεδιασμένα και τα προγραμματισμένα. Τα ψηφιακά δίδυμα έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται τα κτίρια, λειτουργώντας ως κυκλικό σύνδεσμοι μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Οι αισθητήρες μέσα σε ένα κτίριο λαμβάνουν τακτικές μετρήσεις που τροφοδοτούνται στο ψηφιακό περιβάλλον για να δημιουργήσουν ένα εικονικό αντίγραφο. Αυτό το ψηφιακό δίδυμο ενημερώνεται τακτικά και μπορεί να δημιουργήσει ειδοποιήσεις όταν εντοπίζονται προβλήματα. Η μοντελοποίηση, η προσομοίωση και η ανάλυση διευκολύνουν τη διαδικασία καθώς τα προβλεπόμενα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με τα πραγματικά αποτελέσματα. Με βάση τις αρχές των ψηφιακών διδύμων που αναλύθηκαν, η επιτυχημένη ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου σε επίπεδα κτιρίων θα πρέπει απαραίτητως να συμπεριλαμβάνει:

1. σαφή στόχο της κατασκευής ψηφιακού διδύμου, όπως οι εφαρμογές που θα επιτευχθούν με βάση αυτό.
2. μια καλά σχεδιασμένη και πρακτική διαδικασία συλλογής, ενημέρωσης, μεταφοράς και ενσωμάτωσης δεδομένων και ψηφιακού μοντέλου σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Ο σχεδιασμός της δομής δεδομένων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ενοποίηση δεδομένων, την ετερογένεια στα συστήματα πηγής και το συγχρονισμό δεδομένων.
3. Ορθά εκτελεσμένη και τυποποιημένη διαδικασία διαλειτουργικότητας και σχέδιο συμβατότητας δεδομένων και περαιτέρω πιθανές προτάσεις εξέλιξης.
4. Έγκυρη στρατηγική ελέγχου ποιότητας και ασφάλειας για την ανάπτυξη του ψηφιακού διδύμου.

Αν και τα ψηφιακά δίδυμα απέχουν ακόμη πολύ από το να γίνουν κανονικό χαρακτηριστικό στην κατασκευή, η μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίων (BIM) χρησιμοποιείται ήδη ευρέως από αρχιτέκτονες και προγραμματιστές. Το BIM περιέχει λεπτομερή δεδομένα κατασκευής, αλλά δεν ενημερώνεται τακτικά για να αντικατοπτρίζει τα γεγονότα του πραγματικού κόσμου. Αυτό θα μπορούσε να αλλάξει όταν το BIM χρησιμοποιείται ως μέρος ενός ψηφιακού δίδυμου, το οποίο λαμβάνει τακτικά σχόλια από το φυσικό κτίριο για να ενημερώνει ανάλογα το εικονικό μοντέλο. Το φάσμα των πιθανών νομικών ζητημάτων αναμφίβολα θα διευρυνθεί καθώς εξελίσσεται η χρήση των ψηφιακών διδύμων. Θα υπάρξουν νομικές εκτιμήσεις, ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του ψηφιακού δίδυμου, καθώς και ζητήματα ιδιοκτησίας και ευθύνης δεδομένων που θα πρέπει να εξεταστούν. Η τεχνολογία θα είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση ψηφιακών αρχείων των κτιρίων, καθώς και για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των υλικών με την πάροδο του χρόνου. Παρόμοιες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται ήδη σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, για την παρακολούθηση των περιουσιακών στοιχείων και την πρόβλεψη συντήρησης. Τα ψηφιακά δίδυμα θα μπορούσαν να συμβάλλουν στον εκδημοκρατισμό του σχεδιασμού στην κατασκευή. Αν και η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη στις πρώτες μέρες της —τόσο για τη βιομηχανία όσο και για την κοινότητα σχεδιασμού—θα μπορούσε σύντομα να ξεκλειδώσει την ικανότητα να εξερευνήσουμε αμέτρητες ιδέες χρησιμοποιώντας την τεχνολογία που βρίσκεται ήδη στα χέρια μας. Δίνοντας προτεραιότητα σε αυτές τις ιδέες, μετριάζοντας τον κίνδυνο και παρέχοντας αποτελεσματικότητες, ο κλάδος μπορεί να υιοθετήσει αρθρωτές κατασκευές με τρόπους που προηγουμένως δεν ήταν δυνατοί.

Είναι σαφές από αυτήν την έρευνα ότι ο κατασκευαστικός κλάδος θα ωφεληθεί από τη χρήση των ψηφιακών τεχνολογιών αν και μέχρι σήμερα η υιοθέτηση και η εφαρμογή τους στον κλάδο ήταν περιορισμένη. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων κατασκευαστικών έργων λειτουργεί πλέον ως κινητήρια δύναμη για το ενδιαφέρον για τη δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακών αναπαραστάσεων του εργοταξίου. Ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός στο πλαίσιο των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, ειδικά εκείνων που

αφορούν αλυσίδες εφοδιασμού, μπορούν να ωφεληθούν σημαντικά από την εισαγωγή ψηφιακών τεχνολογιών. Εάν χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο ενός συνδεδεμένου συστήματος Διαχείρισης Πληροφοριών Κτιρίων (BIM), τα μοντέλα 4D CAD που χρησιμοποιούν κινούμενα χρονοδιαγράμματα μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μια κοινή κατανόηση των απαιτήσεων μεταξύ των ενδιαφερομένων σε διάφορα στάδια ενός μεγάλου κατασκευαστικού έργου. Η χρήση μικτής πραγματικότητας με τέτοια μοντέλα θα υποστηρίξει επίσης τις επιτόπιες δραστηριότητες και θα διασφαλίσει τη σωστή διαδικασία και την ασφάλεια των εργαζομένων επί τόπου.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, θα απαιτηθεί ο πυλώνας «συνδεσιμότητας» του Construction 4.0 που θα υποστηρίζεται από διάφορα πρότυπα επικοινωνίας και το βιομηχανικό Διαδίκτυο των πραγμάτων. Τα ψηφιακά δίδυμα στο δομημένο περιβάλλον βρίσκονται ακόμη σε εκκολαπτόμενα στάδια και είναι απαραίτητη η συστηματική ανασκόπηση της εξέλιξης από το BIM στα ψηφιακά δίδυμα και οι τρέχουσες τεχνολογίες αιχμής για τη δημιουργία μιας μελλοντικής ερευνητικής ατζέντας.



# Βιβλιογραφία

Συμβούλιο Έξυπνων Πόλεων 2020 Digital Twin Journeys: smart infrastructure for safety and reliability across the rail network Διαθέσιμο στο: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/news/digital-twin-journeys-smart-infrastructure-safety-and-reliability-across-rail-network>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019 Διαθέσιμο στο: <https://eufordigital.eu/europes-digital-decade-setting-the-course-towards-a-digitally-empowered-europe-by-2030/>

Akanmu, A., Anumba, C. and Messner, J., 2014. Active Monitoring and Control of Light Fixtures during Building Construction and Operation: Cyber-Physical Systems Approach. *Journal of Architectural Engineering*, 20(2), p.04013008.

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 22(3), 899-919. doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006

Amezquita-Sanchez, J., Valtierra-Rodriguez, M., Aldwaik, M., & Adeli, H. (2016). Neurocomputing in Civil Infrastructure. *Scientia Iranica*, 23(6), 2417-2428. doi: 10.24200/sci.2016.2301

Anumba, C., Akanmu, A., Yuan, X. and Kan, C., 2020. Cyber—physical systems development for construction applications. *Frontiers of Engineering Management*, 8(1), pp.72-87.

Asadi, A., Alsubaey, M. and Makatsoris, C., 2015. A machine learning approach for predicting delays in construction logistics. *International Journal of Advanced Logistics*, 4(2), pp.115-130.

Austin, M., Delgoshaei, P., Coelho, M., & Heidarinejad, M. 2020. Architecting Smart City Digital Twins: Combined Semantic Model and Machine Learning Approach. *Journal Of Management In Engineering*, 36(4), 04020026. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000774](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000774)

Bisio, I., Garibotto, C., Grattarola, A., Lavagetto, F. and Sciarrone, A., 2018. Exploiting Context-Aware Capabilities over the Internet of Things for Industry 4.0 Applications. *IEEE Network*, 32(3), pp.101-107.

Brenner, B. and Hummel, V., 2017. Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University. *Procedia Manufacturing*, 9, pp.198-205.

Butler, L., Lin, W., Xu, J., Gibbons, N., Elshafie, M., & Middleton, C. (2018). Monitoring, Modeling, and Assessment of a Self-Sensing Railway Bridge during Construction. *Journal Of Bridge Engineering*, 23(10), 04018076. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001288](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001288)

Chalvatzis, K. and Rubel, K., 2015. Electricity portfolio innovation for energy security: The case of carbon constrained China. *Technological Forecasting and Social Change*, 100, pp.267-276.

Chang, S., Son, J., Jeong, W. and Yi, J., 2015. BIM-Integrated Simulation of Construction Operations for Lean Production Management. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, pp.288-294.

Chen, N., Xiao, C., Pu, F., Wang, X., Wang, C., Wang, Z. and Gong, J. 2015. Cyber-Physical Geographical Information Service-Enabled Control of Diverse In-Situ Sensors. *Sensors*, 15(2), pp.2565-2592.

Chen, H., X. Luo and J. Guo 2017. Improving RSSI-Based Indoor Localization Performance by Integrating BIM. *Computing in Civil Engineering*

Davila Delgado, J., Butler, L., Gibbons, N., Brilakis, I., Elshafie, M., & Middleton, C. 2017. Management of structural monitoring data of bridges using BIM. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Bridge Engineering*, 170(3), 204-218.  
<https://doi.org/10.1680/jbren.16.00013>

Dillon, T., Zhuge, H., Wu, C., Singh, J. and Chang, E., 2010. Web-of-things framework for cyber-physical systems. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 23(9), pp.905-923.

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics And Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>

Ioannidou, I., & Sklavos, N. 2021. On General Data Protection Regulation Vulnerabilities and Privacy Issues, for Wearable Devices and Fitness Tracking Applications. *Cryptography*, 5(4), 29. <https://doi.org/10.3390/cryptography5040029>

Jia, R., Jin, B., Jin, M., Zhou, Y., Konstantakopoulos, I., & Zou, H. et al. (2018). Design Automation for Smart Building Systems. *Proceedings Of The IEEE*, 106(9), 1680-1699. doi: 10.1109/jproc.2018.2856932

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. and Hicks, B., 2020. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, pp.36-52.

Jo, B., Lee, Y., Khan, R., Kim, J., & Kim, D. 2019. Robust Construction Safety System (RCSS) for Collision Accidents Prevention on Construction Sites. *Sensors*, 19(4), 932. <https://doi.org/10.3390/s19040932>

Kan C, Zhang P, Fang Y, Anumba C J, Messner J I (2018b). A taxonomic analysis of mobile crane fatalities for CPS-based simulation. In: Mela K, Pajunen S, Raasakka V, eds. 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Tampere, 5–7

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-Papersonline*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

Kumawat, A., Sharma, A., & Kumawat, S. 2017. Identification of Cryptographic Vulnerability and Malware Detection in Android. *International Journal Of Information Security And Privacy*, 11(3), 15-28. <https://doi.org/10.4018/ijisp.2017070102>

Kychkin, A., & Nikolaev, A. (2021). Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 22(3), 115-123. doi: 10.17587/mau.22.115-123

Lee, C., Chan, H., Poon, C., Yip, K., & Yuen, P. 2019. Smart BIM-AM Journey to Green Buildings. *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*, 290(1), 012050. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012050

Lu, Q., Parlikad, A., Woodall, P., Don Ranasinghe, G., Xie, X., & Liang, Z. et al. 2020. Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *Journal Of Management In Engineering*, 36(3), 05020004. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000763)

Lugaresi, G. and Matta, A., 2021. Automated manufacturing system discovery and digital twin generation. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, pp.51-66.

Miremadi, I., Saboohi, Y. and Jacobsson, S., 2018. Assessing the performance of energy innovation systems: Towards an established set of indicators. *Energy Research & Social Science*, 40, pp.159-176.

Miskinis, C. 2020 The history and creation of the digital twin concept. Διαθέσιμο στο: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>

Moreu, F., Kim, R., & Spencer, B. (2016). Railroad bridge monitoring using wireless smart sensors. *Structural Control And Health Monitoring*, 24(2), e1863. doi: 10.1002/stc.1863

Moselhi, O. and Alshibani, A., 2009. Optimization of Earthmoving Operations in Heavy Civil Engineering Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(10), pp.948-954.

Navon, R. and Sacks, R., 2007. Assessing research issues in Automated Project Performance Control (APPC). *Automation in Construction*, 16(4), pp.474-484.

Negri, E., Fumagalli, L. and Macchi, M., 2017. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, pp.939-948.

Oesterreich, T., & Teuteberg, F. 2016. Understanding the implications of digitisation 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. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>

Park, C., & Kim, H. 2013. A framework for construction safety management and visualization system. *Automation In Construction*, 33, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.012>

Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J., & Gao, S. 2020. Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. *Advances In Civil Engineering*, 2020, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2020/8846667>

Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC PapersOnLine*, 48(3), 567-572

Ruzsa, C., 2021. Digital twin technology - external data resources in creating the model and classification of different digital twin types in manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 54, pp.209-215.

Son, H., Kim, C. and Kim, C., 2012. Automated Color Model-Based Concrete Detection in Construction-Site Images by Using Machine Learning Algorithms. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(3), pp.421-433.

Sušnik, M., Tagliabue, L., & Cairoli, M. (2021). BIM-based energy and acoustic analysis through CVE tools. *Energy Reports*, 7, 8228-8237. doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.013

Talbur, J. R. 2011. Entity resolution and information quality. Amsterdam, Netherlands: Elsevier

Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation In Construction*, 19(7), 829-843. doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007

Tchana, Y., Ducellier, G., & Remy, S. (2019). Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, 84, 545-549. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>

Theodorou, V., Abelló, A., Lehner, W., & Thiele, M. (2015). Quality measures for ETL processes: from goals to implementation. *Concurrency And Computation: Practice And Experience*, 28(15), 3969-3993. doi: 10.1002/cpe.3729

Wang, X. (2012). BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. *Construction Economics And Building*, 12(3), 101-102. doi: 10.5130/ajceb.v12i3.2749

Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D. and Zühlke, D., 2016. Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31), pp.97-102.

Ye, C., Butler, I., Calka, B., Jangurazov, M., Lu, Q., & Gregory, A. et al. (2019). A Digital Twin of Bridges for Structural Health Monitoring. *Structural Health Monitoring* 2019. <https://doi.org/10.12783/shm2019/32287>

Yuan, X., Anumba, C. and Parfitt, M., 2016. Cyber-physical systems for temporary structure monitoring. *Automation in Construction*, 66, pp.1-14.

Yun, S., Jun, K., Son, C., & Kim, S. (2014). Preliminary study for performance analysis of BIM-based building construction simulation system. *KSCE Journal Of Civil Engineering*, 18(2), 531-540. doi: 10.1007/s12205-014-0174-2

Zhang, F., Xiong, H., Shi, W. and Ou, X., 2016. Structural health monitoring of Shanghai Tower during different stages using a Bayesian approach. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(11), pp.1366-1384