



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΔΧΤ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Πιλοτική Εφαρμογή Μοντέλου Κτιριακών
Πληροφοριών (BIM) και Δημιουργία Στατικού Ψηφιακού
Διδύμου (Static Digital Twin) για τη Διαχείριση
Εγκαταστάσεων Κρίσιμης Ενεργειακής Υποδομής στον
ΑΔΜΗΕ»**

Μπούρας Φώτης, Α.Μ.: 156279

Επιβλέπων: Πετρουτσάτου Κλεοπάτρα

ΠΑΤΡΑ

Ιούνιος 2026

Πρόλογος

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Διαχείρισης Τεχνικών Έργων της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου. Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η πιλοτική ανάπτυξη Στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Static Digital Twin) για υφιστάμενη κτιριακή εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ, μέσω αξιοποίησης τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM). Η εργασία εξετάζει τη δυνατότητα αξιοποίησης του μοντέλου για τη διαχείριση της εγκατάστασης, την υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης και τη διερεύνηση προοπτικών ψηφιακού μετασχηματισμού κρίσιμων ενεργειακών υποδομών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν στην πραγματοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας, και ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κυρία Πετρουτσάτου Κλεοπάτρα, η οποία με εμπιστεύθηκε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία και συνέβαλε ουσιαστικά στην υλοποίησή της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους όσοι συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην υποστήριξη της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας, διαθέτοντας τον χρόνο, τις γνώσεις και την εμπειρία τους. Η συνεργασία, οι παρατηρήσεις και η προθυμία τους να συνδράμουν σε επιμέρους στάδια της έρευνας αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πιλοτική εφαρμογή τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM) και Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) σε υφιστάμενη κτιριακή εγκατάσταση κρίσιμης ενεργειακής υποδομής του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), με στόχο τη δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Static Digital Twin) για την υποστήριξη της διαχείρισης εγκαταστάσεων και τη διερεύνηση προϋποθέσεων μελλοντικής προγνωστικής συντήρησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύσσεται ψηφιακό μοντέλο BIM, το οποίο λειτουργεί ως ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον για τη συγκέντρωση και διαχείριση τεχνικών δεδομένων της εγκατάστασης. Για την ανάπτυξή του αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα σχέδια, τεχνικά στοιχεία, ενεργειακά δεδομένα και πληροφορίες που συλλέχθηκαν μέσω αυτοψιών. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε οργάνωση των χώρων και του εξοπλισμού μέσω κατάλληλων παραμέτρων και δομημένων δεδομένων, με στόχο τη δημιουργία μίας ψηφιακής βάσης διαχείρισης της εγκατάστασης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της μετάβασης από ένα συμβατικό BIM μοντέλο σε ένα Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο, ακόμη και σε περιπτώσεις περιορισμένης ψηφιακής ωριμότητας και απουσίας εκτεταμένων υποδομών αυτοματισμού ή συστημάτων Building Management Systems (BMS). Επιπλέον, διερευνώνται πιθανές δυνατότητες μελλοντικής ενσωμάτωσης αισθητήρων, συστημάτων αυτοματισμού και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης, με σκοπό τη σταδιακή εξέλιξη του προτεινόμενου μοντέλου σε δυναμικό (real-time) Ψηφιακό Δίδυμο.

Τα αποτελέσματα της εργασίας καταδεικνύουν ότι ακόμη και εγκαταστάσεις περιορισμένης ψηφιακής ωριμότητας μπορούν να αποτελέσουν βάση για την ανάπτυξη BIM-based συστημάτων διαχείρισης και μελλοντικής μετάβασης προς δυναμικά Ψηφιακά Δίδυμα. Παράλληλα, αναδεικνύονται οι τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα δεδομένων, την κατάσταση των υφιστάμενων υποδομών και τον βαθμό πληροφοριακής ωρίμανσης των εγκαταστάσεων.

Λέξεις – Κλειδιά: Building Information Modeling (BIM), Digital Twin, Static Digital Twin, κρίσιμες ενεργειακές υποδομές, διαχείριση εγκαταστάσεων, προγνωστική συντήρηση, ψηφιακός μετασχηματισμός, ΑΔΜΗΕ, Facility Management, τεχνητή νοημοσύνη.

Pilot Implementation of a Building Information Model (BIM) and Development of a Static Digital Twin for Facility Management in Critical Energy Infrastructure: A Case Study of the Independent Power Transmission Operator (IPTO), Greece

Abstract

This postgraduate thesis investigates the pilot implementation of Building Information Modeling (BIM) and Digital Twin technologies in an existing building facility belonging to the Independent Power Transmission Operator (IPTO/ADMIE), which constitutes part of a critical energy infrastructure system. The main objective of the study is the development of a Static Digital Twin to support facility management and the investigation of future predictive maintenance capabilities.

Within the framework of the thesis, a BIM-based digital model is developed, functioning as an integrated information environment for the collection, organization, and management of technical data related to the facility. The development of the model was based on available drawings, technical documentation, energy-related data, and information collected through site inspections. Subsequently, spaces and equipment were organized through appropriately structured parameters and datasets, aiming at the creation of a digital facility management database.

Particular emphasis is placed on investigating the transition from a conventional BIM model to a Static Digital Twin, even in cases characterized by limited digital maturity and the absence of extensive automation infrastructure or Building Management Systems (BMS). Furthermore, the study examines the potential future integration of sensors, automation systems, and artificial intelligence technologies, with the aim of gradually evolving the proposed model into a dynamic real-time Digital Twin.

The results of the study demonstrate that even facilities with limited digital maturity can provide a foundation for the development of BIM-based management systems and their future transition toward dynamic Digital Twins. At the same time, the research highlights the technical and organizational challenges associated with data availability, the condition of existing infrastructure, and the level of information maturity of such facilities.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Digital Twin, Static Digital Twin, Critical Energy Infrastructure, Facility Management, Predictive Maintenance, Digital Transformation, IPTO/ADMIE, Artificial Intelligence.

Δομή της εργασίας

Η δομή της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας διαμορφώνεται ως ακολούθως:

Στο **Κεφάλαιο 1** πραγματοποιείται εισαγωγή στο αντικείμενο της έρευνας, η σκοπιμότητα και οι στόχοι της εργασίας, τα ερευνητικά ερωτήματα και η δομή της μελέτης.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της έρευνας και παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με το Building Information Modeling (BIM), τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins), τη διαχείριση εγκαταστάσεων (Facility Management), τις κρίσιμες υποδομές και τα σχετικά πρότυπα και τεχνολογίες.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η μεθοδολογία της έρευνας, η διαδικασία ανάπτυξης του BIM μοντέλου και του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου, η παραμετροποίηση των χώρων και του εξοπλισμού, καθώς και ο σχεδιασμός και η ανάλυση του ερευνητικού ερωτηματολογίου.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας, η ανάπτυξη του BIM-based Static Digital Twin, η οργάνωση και παραμετροποίηση των δεδομένων, καθώς και τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης του ερωτηματολογίου.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται η συζήτηση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται τα ερευνητικά πορίσματα, η επιστημονική και πρακτική συνεισφορά της εργασίας, οι περιορισμοί της έρευνας και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη.

Τέλος, το **Κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ BIM-BASED STATIC DIGITAL TWIN ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΔΜΗΕ. 27

ΣΧΗΜΑ 3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΤΙΡΙΟ ΜΕΛΕΤΗΣ. ΠΗΓΗ: ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΥΤΟΨΙΑΣ ΑΠΟ ΑΡΧΕΙΟ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΔΑΓΥ. 29

ΣΧΗΜΑ 3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ PM² ADVANCED ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ 35

ΣΧΗΜΑ 3.5 ΑΠΟ ΤΟ 2D ΣΕ BIM ΚΑΙ ΑΠΟ BIM ΣΤΟ ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ 38

ΣΧΗΜΑ 3.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ BIM ΜΟΝΤΕΛΟΥ. 40

ΣΧΗΜΑ 3.7 ΑΠΟ ΤΟ BIM MODEL ΣΤΟ STATIC DIGITAL TWIN. 42

ΣΧΗΜΑ 3.8 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. 43

ΣΧΗΜΑ 3.9 ΔΟΜΗ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 50

ΣΧΗΜΑ 4.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ BIM ΜΟΝΤΕΛΟΥ. 52

ΣΧΗΜΑ 4.2 ΚΑΤΟΨΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ / ΟΡΟΦΟΥ ΑΠΟ ΤΟ BIM ΜΟΝΤΕΛΟ. 52

ΣΧΗΜΑ 4.3 ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ (ΑΝΕΥ ΟΠΛΙΣΜΩΝ), ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΓΗΣ. 53

ΣΧΗΜΑ 4.4 Όψεις του μοντέλου. 53

ΣΧΗΜΑ 4.5 ROOM SCHEDULE ΑΠΟ ΤΟ REVIT. 54

ΣΧΗΜΑ 4.6 ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ROOM ΜΕ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ. 56

ΣΧΗΜΑ 4.7 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 1 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 59

ΣΧΗΜΑ 4.8 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 2 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 60

ΣΧΗΜΑ 4.9 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 3 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 61

ΣΧΗΜΑ 4.10 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 4 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 62

ΣΧΗΜΑ 4.11 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 5 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 62

ΣΧΗΜΑ 4.12 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 6 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 63

ΣΧΗΜΑ 4.13 ΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ 7 ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 63

ΣΧΗΜΑ	4.14	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	8	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 64						
ΣΧΗΜΑ	4.15	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	9	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 64						
ΣΧΗΜΑ	4.16	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	10	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 65						
ΣΧΗΜΑ	4.17	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	11	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 66						
ΣΧΗΜΑ	4.18	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	12	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 66						
ΣΧΗΜΑ	4.19	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	13	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 67						
ΣΧΗΜΑ	4.20	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	14	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 67						
ΣΧΗΜΑ	4.21	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	15	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 68						
ΣΧΗΜΑ	4.22	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	16	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 69						
ΣΧΗΜΑ	4.23	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	17	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 69						
ΣΧΗΜΑ	4.24	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	18	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 70						
ΣΧΗΜΑ	4.25	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	19	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 70						
ΣΧΗΜΑ	4.26	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	20	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 71						
ΣΧΗΜΑ	4.27	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	21	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 71						
ΣΧΗΜΑ	4.28	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	22	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 72						
ΣΧΗΜΑ	4.29	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	23	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 73						
ΣΧΗΜΑ	4.30	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	24	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 73						
ΣΧΗΜΑ	4.31	ΓΡΑΦΗΜΑ	ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΣ	25	ΤΟΥ
ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ. 74						

ΣΧΗΜΑ 5.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ	86
ΣΧΗΜΑ 7.1 ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ / ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΨΙΑΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΧΩΡΩΝ ΚΤΙΡΙΟΥ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ. ΠΗΓΗ: ΑΡΧΕΙΟ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΔΑΓΥ – ΑΔΜΗΕ. 90	
ΣΧΗΜΑ 8.1 ΣΧΕΔΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ 93	

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ BIM. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΒΑΣΕΙ SMITH & TARDIF (2009), EASTMAN ET AL. (2018) ΚΑΙ MATOS ET AL. (2024)	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ STATIC DIGITAL TWIN ΚΑΙ DYNAMIC DIGITAL TWIN. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΒΑΣΕΙ GRIEVES & VICKERS (2017), LIU ET AL. (2024) ΚΑΙ PIRAS ET AL. (2024).	21
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BIM ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ (ΣΤΑΤΙΚΟ & ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ).....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4 ΕΠΙΠΕΔΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΧΡΗΣΕΩΝ ΑΝΑ ΟΡΟΦΟ.	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΦΑΣΕΙΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 ΚΥΡΙΑ ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5 ΚΥΡΙΑ ΣΤΑΔΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΡΟΟΔΟΥ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ.	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7 ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ROOM ΓΙΑ ΤΟ STATIC DIGITAL TWIN.	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ REAL-TIME ΣΥΝΔΕΣΗ.	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ROOMS ΑΝΑ ΟΡΟΦΟ.....	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΧΩΡΟΥ, ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΜΗΤΡΩΟ Η/Μ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΕΙ ΤΟ ΣΤΑΤΙΚΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ.....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΑΣ	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΤΩΝ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ.....	60

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ BIM ΚΑΙ STATIC DIGITAL TWIN	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ STATIC DIGITAL TWIN ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ BMS, ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ SPEARMAN.....	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ BIM ΚΑΙ STATIC DIGITAL TWIN	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ STATIC DIGITAL TWIN ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΚΤΙΡΙΑ.....	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΚΥΡΙΑ ΟΦΕΛΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ BIM ΚΑΙ STATIC DIGITAL TWIN.....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ.....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	85

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Δομή της εργασίας	6
Περιεχόμενα.....	10
1 Εισαγωγή – Σύντομη Βιβλιογραφική Επισκόπηση	13
1.1 Κίνητρο – Πρόβλημα	13
1.2 Αντικείμενο και Σκοπός.....	14
1.3 Building Information Modeling (BIM) και Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) 16	
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο BIM, Ψηφιακών Διδύμων και Τεχνητής Νοημοσύνης....	18
2.1 Building Information Modeling (BIM).....	18
2.2 Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)	20
2.3 Από το BIM στα Ψηφιακά Δίδυμα	21
2.4 Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα και διαχείριση εγκαταστάσεων.....	23
2.5 Τεχνητή Νοημοσύνη, Ψηφιακά Δίδυμα και προγνωστική συντήρηση	24

2.6	Ερευνητικό κενό και συμβολή της εργασίας	25
2.7	Ερευνητικά Ερωτήματα	26
2.8	Ερευνητική Προσέγγιση	26
3	Μεθοδολογία	28
3.1	Περιγραφή της εγκατάστασης και υφιστάμενη κατάσταση	28
3.2	Εφαρμογή αρχών PM ² Advanced στη διαχείριση και υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας	29
3.3	Φάσεις υλοποίησης της εργασίας σύμφωνα με PM ² προσέγγιση.....	30
3.4	Αναγνώριση Ενδιαφερόμενων Μερών (Stakeholders) Εργασίας.....	30
3.5	Διαχείριση παραδοτέων (Deliverables Management)	31
3.6	Διαχείριση κινδύνων (Risk Management)	33
3.7	Παρακολούθηση προόδου και ποιοτικός έλεγχος	34
3.8	Συλλογή και προετοιμασία δεδομένων	35
3.9	Ανάπτυξη του BIM μοντέλου	39
3.10	Δημιουργία Rooms και οργάνωση χωρικής πληροφορίας	40
3.11	Ενσωμάτωση H/M εξοπλισμού και ενεργειακών δεδομένων	41
3.12	Δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου	42
3.13	Διερεύνηση μελλοντικής σύνδεσης με BMS, αισθητήρες και AI	42
3.14	Αξιολόγηση της μεθοδολογίας	44
3.15	Στατιστική αξιολόγηση εργασίας	44
3.16	Ερευνητικές Υποθέσεις και Στατιστική Διερεύνηση.....	50
4	Αποτελέσματα	52
4.1	Αποτέλεσμα ανάπτυξης του BIM μοντέλου	52
4.2	Αποτελέσματα οργάνωσης χώρων μέσω Rooms.....	54
4.3	Αποτελέσματα παραμετροποίησης χώρων	55
4.4	Αποτελέσματα ενσωμάτωσης H/M πληροφορίας	56
4.5	Αποτελέσματα δημιουργίας Στατικού Ψηφιακού Διδύμου	57

4.6	Αξιολόγηση πληρότητας του μοντέλου	57
4.7	Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων και δεικτών αξιολόγησης.....	58
4.8	Στατιστική Αξιολόγηση Ερευνητικού Ερωτηματολογίου	59
4.8.1	Περιγραφή δείγματος.....	59
4.8.2	Δεδομένη κατάσταση τεχνικής πληροφορίας.....	66
4.8.3	Αντιλαμβανόμενη αξία BIM και Static Digital Twin.....	68
4.8.4	Μελλοντική εξέλιξη: BMS, αισθητήρες, ΑΙ και επέκταση εφαρμογής...	72
4.8.5	Ανοικτού τύπου ερωτήσεις	75
4.8.6	Έλεγχος αξιοπιστίας ερευνητικών κλιμάκων	76
4.9	Συμπερασματική αποτίμηση αποτελεσμάτων	78
5	Συζήτηση - Συμπεράσματα.....	79
5.1	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	79
5.2	Ερευνητικά πορίσματα.....	81
5.2.1	Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα.....	81
5.2.2	Αποτελέσματα ερευνητικών υποθέσεων.	82
5.3	Επιστημονική και Πρακτική Συνεισφορά της Έρευνας	82
5.4	Περιορισμοί της Έρευνας	83
5.5	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα και Εξέλιξη	84
6	Βιβλιογραφία	87
7	Παράρτημα Ι – Πολεοδομικά Σχέδια / Σκαριφήματα αυτοψίας	89
8	Παράρτημα ΙΙ – Παραδοτέα μοντελοποίησης.....	91

1 Εισαγωγή – Σύντομη Βιβλιογραφική Επισκόπηση

1.1 Κίνητρο – Πρόβλημα

Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας των τεχνικών έργων και των κτιριακών εγκαταστάσεων βρίσκεται σε περίοδο έντονου ψηφιακού μετασχηματισμού. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των τεχνικών εγκαταστάσεων, η στόχευση για αποδοτικότερη διαχείριση πόρων, η ανάγκη περιορισμού του λειτουργικού κόστους, καθώς και η σημασία της ενεργειακής απόδοσης και της βιωσιμότητας, καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων στον κύκλο ζωής των έργων.

Στο πλαίσιο αυτό, η Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών, γνωστή διεθνώς ως Building Information Modeling (BIM), έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων τα οποία δεν περιλαμβάνουν μόνο γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός κτιρίου, αλλά και δομημένες πληροφορίες που σχετίζονται με τα δομικά στοιχεία, τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις, τα υλικά, τη λειτουργία και τη συντήρησή του (Smith & Tardif, 2009). Παράλληλα, η ανάπτυξη της έννοιας των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) εισάγει μία περισσότερο ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση υποδομών, επιτρέποντας τη διασύνδεση φυσικών εγκαταστάσεων με ψηφιακά μοντέλα και πληροφοριακά δεδομένα (Daniotti et al., 2022).

Πρόσφατες μελέτες καταδεικνύουν ότι τα Ψηφιακά Δίδυμα στα κτίρια αποτελούν μία ταχέως αναπτυσσόμενη ερευνητική περιοχή, η οποία συνδέεται με το BIM, το Internet of Things (IoT), τα συστήματα αυτοματισμού, την ενεργειακή παρακολούθηση, τη διαχείριση εγκαταστάσεων και την προγνωστική συντήρηση (Liu et al., 2024). Ωστόσο, η μετάβαση από ένα συμβατικό BIM μοντέλο σε ένα λειτουργικό Ψηφιακό Δίδυμο δεν είναι άμεση ούτε αυτονόητη. Σύμφωνα με τους Deng, Menassa και Kamat (2021), είναι προϋπόθεση η σαφής οργάνωση των δεδομένων, δυνατότητα διασύνδεσης με λειτουργικές πληροφορίες και κατάλληλη δομή για την αξιοποίησή τους σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου.

Παρότι οι τεχνολογίες BIM και Digital Twin εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο σε νέα έργα και σύγχρονες εγκαταστάσεις, η εφαρμογή τους σε υφιστάμενα κτίρια παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Οι Volk et al. (2014) επισημαίνουν ότι η εφαρμογή BIM σε υφιστάμενα κτίρια παρουσιάζει σημαντικές

προκλήσεις λόγω ελλιπούς τεκμηρίωσης, παρωχημένων σχεδίων και περιορισμένης διαθεσιμότητας αξιόπιστων δεδομένων. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο σε εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών, όπου οι τεχνικές ανάγκες της εγκατάστασης, η αναγκαία προϋπόθεση αξιοπιστίας, ασφάλειας, διασφάλισης συνεχούς λειτουργίας των εγκαταστάσεων και τεχνικής τεκμηρίωσης είναι αυξημένες.

Ειδικά στην περίπτωση της Ελλάδας, η υιοθέτηση του BIM στον κατασκευαστικό τομέα βρίσκεται ακόμη σε στάδιο εξέλιξης, με σημαντικές θεσμικές, οργανωτικές και τεχνικές προκλήσεις (Bakogiannis et al., 2020). Βέβαια, η ανάγκη καθορισμού σαφών προδιαγραφών πληροφορίας στα ψηφιακά έργα είναι κρίσιμη, καθώς χωρίς κατάλληλη οργάνωση των δεδομένων, τα ψηφιακά μοντέλα δεν μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τη διαχείριση, τη συντήρηση και τη λήψη αποφάσεων (Tomczak et al., 2022).

Συνεπώς, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η δημιουργία Στατικών Ψηφιακών Διδύμων (Static Digital Twins), τα οποία βασίζονται κυρίως σε οργανωμένα BIM μοντέλα και δομημένα πληροφοριακά δεδομένα, χωρίς να προϋποθέτουν απαραίτητα συνεχή ροή δεδομένων πραγματικού χρόνου. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα ενδιάμεσο και ρεαλιστικό στάδιο ψηφιακής μετάβασης για υφιστάμενες εγκαταστάσεις, δημιουργώντας τη βάση για μελλοντική ενσωμάτωση συστημάτων αυτοματισμού, αισθητήρων, Building Management Systems (BMS) και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης.

1.2 Αντικείμενο και Σκοπός

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πιλοτική εφαρμογή τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM) και τη δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Static Digital Twin) σε υφιστάμενη κτιριακή εγκατάσταση του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), με στόχο τη διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησής τους στη διαχείριση εγκαταστάσεων και των προϋποθέσεων για μελλοντική εφαρμογή προγνωστικής συντήρησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύσσεται ψηφιακό μοντέλο BIM της εγκατάστασης, αξιοποιώντας διαθέσιμα αρχιτεκτονικά και τεχνικά σχέδια, στοιχεία ενεργειακής μελέτης, καθώς και πληροφορίες που συλλέχθηκαν μέσω διερεύνησης της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου και των ηλεκτρομηχανολογικών του υποδομών. Το μοντέλο

αυτό λειτουργεί ως οργανωμένη πληροφοριακή βάση, στην οποία ενσωματώνονται γεωμετρικά, λειτουργικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.

Η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η αξία του BIM δεν περιορίζεται στον σχεδιασμό και στην κατασκευή, αλλά επεκτείνεται στη φάση λειτουργίας και διαχείρισης του κτιρίου, εφόσον το μοντέλο περιλαμβάνει κατάλληλα δομημένες πληροφορίες (Smith & Tardif, 2009). Αντίστοιχα, τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να λειτουργήσουν ως μηχανισμοί υποστήριξης αποφάσεων, ιδίως όταν συνδυάζονται με δεδομένα λειτουργίας και μεθόδους ανάλυσης (Piras et al., 2024).

Ωστόσο, μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας επικεντρώνεται σε νέες εγκαταστάσεις ή σε περιβάλλοντα υψηλής ψηφιακής ωριμότητας, όπου υπάρχουν ήδη ανεπτυγμένες υποδομές αυτοματισμού, αισθητήρες και συστήματα Building Management Systems (BMS). Αντίθετα, περιορισμένες είναι οι εφαρμογές που εξετάζουν τη δυνατότητα ανάπτυξης Στατικών Ψηφιακών Διδύμων σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών με περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων και χαμηλότερο επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του ερευνητικού κενού, διερευνώντας κατά πόσο ένα κατάλληλα οργανωμένο BIM μοντέλο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία ενός λειτουργικού Στατικού Ψηφιακού Διδύμου σε πραγματική εγκατάσταση κρίσιμης ενεργειακής υποδομής.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Static Digital Twin) για υφιστάμενη κτιριακή εγκατάσταση με περιορισμένο βαθμό ψηφιακής ωριμότητας. Η προσέγγιση αυτή επιδιώκει να αναδείξει ότι ακόμη και χωρίς πλήρη διασύνδεση με αισθητήρες ή BMS, ένα καλά οργανωμένο BIM μοντέλο μπορεί να αποτελέσει ουσιαστικό εργαλείο διαχείρισης τεχνικής πληροφορίας. Παράλληλα, εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης του BIM ως πληροφοριακού υποβάθρου διαχείρισης της εγκατάστασης. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τη σύγχρονη ερευνητική κατεύθυνση που εξετάζει τη μετάβαση από το BIM στα Digital Twins και, ειδικότερα, στα Construction και Facility Digital Twins συμβάλλοντας περαιτέρω στη διερεύνηση της εφαρμογής τους σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις κρίσιμων ενεργειακών υποδομών (Deng et al., 2021, Revolti et al., 2024).

Ειδικότερα, οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι:

1. Η ανάπτυξη οργανωμένου BIM μοντέλου υφιστάμενης κτιριακής εγκατάστασης.

2. Η υλοποίηση Στατικού Ψηφιακού Διδύμου χωρίς απαίτηση συνεχούς ροής δεδομένων πραγματικού χρόνου.
3. Η παραμετροποίηση χώρων και Η/Μ εξοπλισμού με σκοπό την υποστήριξη της διαχείρισης και της συντήρησης.
4. Η αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης του μοντέλου σε εγκαταστάσεις κρίσιμων ενεργειακών υποδομών.
5. Η αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης του παραγόμενου μοντέλου ως βάσης για τη σταδιακή μετάβαση σε ολοκληρωμένο Digital Twin.
6. Η διερεύνηση των προϋποθέσεων μελλοντικής μετάβασης σε δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο, με χρήση αισθητήρων, BMS και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης.

1.3 Building Information Modeling (BIM) και Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)

Η Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των τεχνικών έργων. Σε αντίθεση με τα συμβατικά σχεδιαστικά εργαλεία, το BIM δεν περιορίζεται στην παραγωγή δισδιάστατων σχεδίων ή τρισδιάστατης γεωμετρίας, αλλά επιτρέπει τη δημιουργία ολοκληρωμένου πληροφοριακού μοντέλου, στο οποίο συνδυάζονται γεωμετρικά στοιχεία και τεχνικές πληροφορίες.

Το BIM λειτουργεί ως ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον στο οποίο οργανώνονται γεωμετρικά, τεχνικά και λειτουργικά δεδομένα ενός κτιρίου, υποστηρίζοντας αποτελεσματικότερα τη διαχείριση και τη συντήρησή του.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα αποτελούν εξέλιξη της λογικής αυτής, καθώς επιδιώκουν τη δημιουργία ψηφιακών αναπαραστάσεων φυσικών συστημάτων, οι οποίες μπορούν να ενημερώνονται και να αλληλεπιδρούν με δεδομένα λειτουργίας της πραγματικής εγκατάστασης. Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου διατυπώθηκε από τους Grieves και Vickers (2017), οι οποίοι το περιγράφουν ως ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος με δυνατότητα αμφίδρομης ανταλλαγής πληροφορίας κατά τον κύκλο ζωής του.

Στον κτιριακό τομέα, τα Digital Twins συνδέονται με την παρακολούθηση της λειτουργίας, την ενεργειακή ανάλυση, τη διαχείριση εξοπλισμού και την υποστήριξη συντήρησης (Liu et al., 2024).

Ανάλογα με το επίπεδο διασύνδεσης και αυτοματισμού, τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να διακριθούν σε Στατικά και Δυναμικά, ανάλογα με τον βαθμό σύνδεσής τους με δεδομένα πραγματικού χρόνου. Η διάκριση αυτή αναλύεται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 2.

Η μετάβαση από το BIM στο Digital Twin δεν είναι μόνο τεχνολογική αλλά και πληροφοριακή. Σύμφωνα με τους Boje et al. (2020), το BIM αποτελεί το βασικό πληροφοριακό υπόβαθρο για την ανάπτυξη Ψηφιακών Διδύμων στον κατασκευαστικό τομέα, παρέχοντας τη δομή δεδομένων πάνω στην οποία αναπτύσσονται οι δυναμικές λειτουργίες ενός Digital Twin. Είναι κρίσιμος ο καθορισμός του είδους της πληροφορίας που πρέπει να συλλεχθεί, να οργανωθεί και να διατηρηθεί, καθώς και η δημιουργία κατάλληλων δομών δεδομένων. Η σημασία των απαιτήσεων πληροφορίας στα ψηφιακά έργα έχει αναδειχθεί από τους Tomczak et al. (2022), οι οποίοι επισημαίνουν ότι χωρίς σαφώς προσδιορισμένες πληροφοριακές προδιαγραφές, η αξιοποίηση των ψηφιακών μοντέλων παραμένει περιορισμένη.

Η αξιοποίηση των Ψηφιακών Διδύμων στη διαχείριση εγκαταστάσεων συνδέεται επίσης με την προληπτική και την προγνωστική συντήρηση. Μέσα από την οργάνωση τεχνικών δεδομένων, ιστορικών πληροφοριών και στοιχείων εξοπλισμού, είναι δυνατή η καλύτερη τεκμηρίωση της κατάστασης της εγκατάστασης και η υποστήριξη αποφάσεων συντήρησης. Σε πιο εξελιγμένα περιβάλλοντα, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την ανάλυση δεδομένων και την πρόβλεψη τεχνικών αστοχιών (Piras et al., 2024).

Παρά τα σημαντικά οφέλη τους, η εφαρμογή BIM και Digital Twin σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις εξακολουθεί να συνοδεύεται από τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις, ιδίως σε περιβάλλοντα περιορισμένης ψηφιακής ωριμότητας. Η ελληνική πραγματικότητα παρουσιάζει επιπλέον προκλήσεις, καθώς η υιοθέτηση του BIM βρίσκεται ακόμη σε εξελισσόμενο στάδιο, τόσο σε επίπεδο θεσμικού πλαισίου όσο και σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής (Bakogiannis et al., 2020· Matos et al., 2024).

Βάσει αυτών, η ανάπτυξη Στατικών Ψηφιακών Διδύμων μπορεί να αποτελέσει ένα ρεαλιστικό και εφαρμόσιμο πρώτο στάδιο ψηφιακού μετασχηματισμού. Μέσω της δημιουργίας ενός οργανωμένου BIM μοντέλου, της παραμετροποίησης των χώρων και του εξοπλισμού και της συσχέτισης των τεχνικών δεδομένων με τις λειτουργικές ανάγκες της εγκατάστασης, μπορεί να δημιουργηθεί μία αξιόπιστη βάση για μελλοντική εξέλιξη προς δυναμικά Ψηφιακά Δίδυμα.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο BIM, Ψηφιακών Διδύμων και Τεχνητής Νοημοσύνης

2.1 Building Information Modeling (BIM)

Η Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών (Building Information Modeling – BIM) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των τεχνικών έργων και των κατασκευών τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού, οι οποίες βασίζονταν κυρίως σε δισδιάστατα σχέδια και αποσπασματική πληροφορία, το BIM επιτρέπει τη δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού πληροφοριακού μοντέλου, στο οποίο ενσωματώνονται γεωμετρικά, τεχνικά, λειτουργικά και διαχειριστικά δεδομένα ενός έργου.

Σύμφωνα με τους Smith & Tardif (2009), το BIM δεν αποτελεί απλώς ένα εργαλείο τρισδιάστατης μοντελοποίησης, αλλά μία στρατηγική διαδικασία διαχείρισης πληροφορίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός έργου. Σύμφωνα με τον Azhar (2011), τα σημαντικότερα οφέλη του BIM περιλαμβάνουν τη βελτίωση του συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, τη μείωση σφαλμάτων σχεδιασμού μέσω ανίχνευσης συγκρούσεων (clash detection), την καλύτερη διαχείριση πληροφοριών και τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων κατά τον κύκλο ζωής του έργου.

Από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι το BIM έχει εξελιχθεί από εργαλείο τρισδιάστατης μοντελοποίησης σε ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης πληροφορίας, το οποίο υποστηρίζει τη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής ενός έργου.

Η σημασία του BIM έχει αυξηθεί ιδιαίτερα, καθώς η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων έργων απαιτεί καλύτερο συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων μελετητών, κατασκευαστών και διαχειριστών εγκαταστάσεων. Μέσω της αξιοποίησης ψηφιακών τεχνολογιών στον κατασκευαστικό τομέα επιδιώκεται η βελτίωση της αποδοτικότητας, της διαλειτουργικότητας και της ποιότητας των τεχνικών δεδομένων (Matos et al., 2024).

Πίνακας 2.1 Περιγραφή βασικών διαστάσεων BIM. Προσαρμογή βάσει Smith & Tardif (2009), Eastman et al. (2018) και Matos et al. (2024)

Διάσταση BIM	Περιγραφή
3D	Γεωμετρικό μοντέλο
4D	Χρόνος / Scheduling
5D	Κόστος
6D	Ενεργειακή απόδοση
7D	Facility Management / Συντήρηση

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάσταση 7D BIM, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων. Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι η αξιοποίηση του BIM δεν περιορίζεται στη φάση του σχεδιασμού ή της κατασκευής, αλλά επεκτείνεται ολοένα και περισσότερο στη διαχείριση εγκαταστάσεων (Facility Management), υποστηρίζοντας την παρακολούθηση εξοπλισμού, τη διαχείριση τεχνικών δεδομένων και τις διαδικασίες συντήρησης.

Παρόλα αυτά, η υιοθέτηση του BIM εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ χωρών και οργανισμών. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με τους Bakogiannis et al. (2020), η εφαρμογή του BIM βρίσκεται ακόμη σε στάδιο εξέλιξης, με σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με το θεσμικό πλαίσιο, την εκπαίδευση των επαγγελματιών, τη διαλειτουργικότητα λογισμικών και την οργανωμένη διαχείριση δεδομένων. Η κατάσταση αυτή καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη διερεύνηση εφαρμογών BIM σε πραγματικές ελληνικές εγκαταστάσεις, ιδίως σε οργανισμούς που διαχειρίζονται κρίσιμες υποδομές και διαθέτουν μεγάλο όγκο τεχνικής πληροφορίας.

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία συγκλίνει στο ότι το BIM αποτελεί πλέον όχι μόνο τεχνολογία ψηφιακής μοντελοποίησης, αλλά και ολοκληρωμένο πλαίσιο οργάνωσης και διαχείρισης πληροφορίας. Η δυνατότητα συγκέντρωσης γεωμετρικών, τεχνικών και λειτουργικών δεδομένων σε ενιαίο περιβάλλον καθιστά το BIM βασικό πληροφοριακό υπόβαθρο για τη διαχείριση εγκαταστάσεων και τη μελλοντική ανάπτυξη Ψηφιακών Διδύμων. Για τον λόγο αυτό, η κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών του αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη διερεύνηση της μετάβασης από τα BIM μοντέλα στα Digital Twins.

2.2 Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)

Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου εξελίχθηκε σημαντικά κατά την τελευταία δεκαετία και πλέον εφαρμόζεται σε πλήθος τομέων, όπως η βιομηχανία, η ενέργεια, οι μεταφορές και οι κτιριακές εγκαταστάσεις. Η ευρεία υιοθέτησή της οφείλεται στη δυνατότητα ενοποίησης γεωμετρικών, λειτουργικών και ιστορικών δεδομένων σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον. Παράλληλα, η αξιοποίησή τους στον κτιριακό και κατασκευαστικό τομέα παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη ανάπτυξη. Σύμφωνα με τους Liu et al. (2024), τα Digital Twins στα κτίρια συνδέονται με τεχνολογίες BIM, Internet of Things (IoT), αισθητήρες, συστήματα αυτοματισμού, ενεργειακή παρακολούθηση και τεχνητή νοημοσύνη.

Σύμφωνα με τους Grieves και Vickers (2017), ένα Ψηφιακό Δίδυμο αποτελεί την ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος, η οποία συνδέεται με αυτό καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του μέσω ανταλλαγής πληροφοριών και δεδομένων. Η έννοια αυτή διαφοροποιείται από τα συμβατικά ψηφιακά μοντέλα, καθώς δεν περιορίζεται στην απλή ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, αλλά επιδιώκει τη συνεχή αξιοποίηση δεδομένων με σκοπό την υποστήριξη λειτουργικών και διαχειριστικών αποφάσεων.

Η βασική φιλοσοφία ενός Ψηφιακού Διδύμου είναι η διασύνδεση της φυσικής εγκατάστασης με ένα ψηφιακό πληροφοριακό περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει τη συγκέντρωση και αξιοποίηση δεδομένων καθ' όλο τον κύκλο ζωής του έργου. Ανάλογα με τον βαθμό διασύνδεσης και ενημέρωσης του ψηφιακού μοντέλου, τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να διακριθούν σε:

- Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα (Static Digital Twins)
- Δυναμικά ή real-time Ψηφιακά Δίδυμα (Dynamic Digital Twins)

Η διάκριση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις, όπου η απουσία ολοκληρωμένων συστημάτων αυτοματισμού, αισθητήρων και υποδομών συλλογής δεδομένων καθιστά συχνά ανέφικτη την άμεση ανάπτυξη Δυναμικών Ψηφιακών Διδύμων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να αποτελέσουν ρεαλιστική και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση ψηφιακού μετασχηματισμού.

Τα Δυναμικά Ψηφιακά Δίδυμα βασίζονται σε συνεχή ροή δεδομένων από αισθητήρες, BMS και IoT συστήματα, επιτρέποντας την παρακολούθηση της λειτουργίας της εγκατάστασης σε πραγματικό χρόνο. Αντίθετα, τα Στατικά Ψηφιακά

Δίδυμα στηρίζονται κυρίως σε οργανωμένα BIM μοντέλα και δομημένα πληροφοριακά δεδομένα, χωρίς απαραίτητα συνεχή ενημέρωση από αισθητήρες.

Πίνακας 2.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών Static Digital Twin και Dynamic Digital Twin. Προσαρμογή βάσει Grieves & Vickers (2017), Liu et al. (2024) και Piras et al. (2024).

Χαρακτηριστικό	Static DT	Dynamic DT
BIM Model	✓	✓
Τεχνικά δεδομένα	✓	✓
Ιστορικά στοιχεία	✓	✓
Αισθητήρες	✗	✓
BMS σύνδεση	✗	✓
Δεδομένα πραγματικού χρόνου	✗	✓
Προγνωστική συντήρηση	Περιορισμένη	Εκτεταμένη
Κόστος υλοποίησης	Χαμηλότερο	Υψηλότερο

Συνολικά, τα Ψηφιακά Δίδυμα αποτελούν εξέλιξη των παραδοσιακών ψηφιακών μοντέλων, προσφέροντας δυνατότητες οργάνωσης, διαχείρισης και αξιοποίησης τεχνικών δεδομένων σε όλο τον κύκλο ζωής μιας εγκατάστασης. Η διαφοροποίηση μεταξύ Στατικών και Δυναμικών Ψηφιακών Διδύμων αναδεικνύει ότι η ψηφιακή μετάβαση μπορεί να πραγματοποιηθεί σταδιακά, ανάλογα με τις τεχνολογικές δυνατότητες και τον βαθμό ψηφιακής ωριμότητας κάθε οργανισμού.

2.3 Από το BIM στα Ψηφιακά Δίδυμα

Η μετάβαση από το BIM στα Ψηφιακά Δίδυμα αποτελεί ένα από τα βασικότερα αντικείμενα της σύγχρονης έρευνας στον τομέα της ψηφιακής διαχείρισης έργων και εγκαταστάσεων.

Σύμφωνα με τους Deng, Menassa και Kamat (2021), το BIM αποτελεί το βασικό πληροφοριακό υπόβαθρο πάνω στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν Ψηφιακά Δίδυμα. Παρόλα αυτά, τα δύο συστήματα δεν ταυτίζονται. Το BIM επικεντρώνεται κυρίως στη δημιουργία και οργάνωση του πληροφοριακού μοντέλου, ενώ το Digital Twin επεκτείνει αυτή τη λογική μέσω της διασύνδεσης με λειτουργικά δεδομένα, συστήματα παρακολούθησης και μηχανισμούς ανάλυσης. Αντίστοιχα, οι Revolti et al. (2024)

επισημαίνουν ότι για τη μετάβαση από το BIM προς τα Construction Digital Twins απαιτούνται οργανωμένη πληροφοριακή δομή, διαλειτουργικότητα, σαφείς προδιαγραφές δεδομένων και δυνατότητα συνεχούς ενημέρωσης του μοντέλου.

Παρότι το BIM και τα Ψηφιακά Δίδυμα παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες ως προς τη χρήση ψηφιακών μοντέλων και δομημένης πληροφορίας, το Digital Twin διαφοροποιείται ως προς τον σκοπό και τη λειτουργία του. Ενώ το BIM επικεντρώνεται κυρίως στη δημιουργία και οργάνωση πληροφοριών σχετικά με ένα έργο ή μία εγκατάσταση, το Ψηφιακό Δίδυμο αποσκοπεί στη συνεχή αξιοποίηση των πληροφοριών αυτών για την υποστήριξη λειτουργικών, διαχειριστικών και συντηρησιακών διαδικασιών.

Η μετάβαση αυτή δεν αποτελεί απλή τεχνολογική εξέλιξη, αλλά κυρίως διαδικασία οργάνωσης, διαχείρισης και αξιοποίησης της πληροφορίας, καθώς απαιτεί σαφείς πληροφοριακές απαιτήσεις, διαδικασίες ενημέρωσης δεδομένων και μηχανισμούς διαχείρισης πληροφορίας σε όλο τον κύκλο ζωής της εγκατάστασης. Παράλληλα, προϋποθέτει τον προσδιορισμό του είδους της πληροφορίας που πρέπει να συλλέγεται, να οργανώνεται και να συντηρείται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτή διαδραματίζουν οι πληροφοριακές ανάγκες του μοντέλου (Information Requirements). Σύμφωνα με τους Tomczak et al. (2022), χωρίς σαφώς καθορισμένες πληροφοριακές απαιτήσεις, η αξιοποίηση των ψηφιακών μοντέλων παραμένει περιορισμένη, καθώς η πληροφορία συχνά παραμένει αποσπασματική και δύσκολα αξιοποιήσιμη.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι η επιτυχής μετάβαση από ένα BIM μοντέλο σε ένα Ψηφιακό Δίδυμο δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογία, αλλά κυρίως από την ποιότητα, πληρότητα και δομή της διαθέσιμης πληροφορίας. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη οργανωμένων πληροφοριακών μοντέλων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική αξιοποίηση των Ψηφιακών Διδύμων.

Στην παρούσα εργασία, η ανάπτυξη του BIM μοντέλου αντιμετωπίζεται ως το πληροφοριακό υπόβαθρο για τη δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου. Η οργάνωση των χώρων, η παραμετροποίηση του εξοπλισμού και η δημιουργία δομημένων δεδομένων επιδιώκουν να δημιουργήσουν μία ενιαία πληροφοριακή βάση διαχείρισης της εγκατάστασης.

Πίνακας 2.3 Σύγκριση Ψηφιακού Μοντέλου BIM και Ψηφιακού Διδύμου (Στατικό & Πραγματικού Χρόνου)

Παράμετρος	Ψηφιακού Μοντέλου BIM	Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο	Ψηφιακό Δίδυμο Πραγματικού Χρόνου
Γεωμετρία	Ναι	Ναι	Ναι
Τεχνικά δεδομένα	Ναι	Ναι	Ναι
Δεδομένα πραγματικού χρόνου	Όχι απαραίτητα	Όχι	Ναι
Υποστήριξη συντήρησης	Περιορισμένη	Αυξημένη	Εκτεταμένη
Σύνδεση με BMS	Όχι απαραίτητη	Δυνητική	Απαραίτητη
Χρήση AI	Περιορισμένη	Υποστηρικτική	Εκτεταμένη

2.4 Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα και διαχείριση εγκαταστάσεων

Τα Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα δεν θα πρέπει να θεωρούνται υποδεέστερη μορφή των Δυναμικών Ψηφιακών Διδύμων, αλλά διαφορετική προσέγγιση η οποία ανταποκρίνεται σε εγκαταστάσεις με περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων και χαμηλότερο βαθμό ψηφιακής ωριμότητας. Η αξία τους έγκειται στην οργάνωση και αξιοποίηση της διαθέσιμης πληροφορίας. Σύμφωνα με τους Piras, Agostinelli και Muzi (2024), η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται μέσω οργανωμένων πληροφοριακών πλατφορμών οι οποίες επιτρέπουν τη διαχείριση τεχνικών δεδομένων, την παρακολούθηση εξοπλισμού, την οργάνωση διαδικασιών συντήρησης και τη σταδιακή μετάβαση προς περισσότερο δυναμικά ψηφιακά συστήματα.

Η αξιοποίηση των Στατικών Ψηφιακών Διδύμων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για υφιστάμενες εγκαταστάσεις, όπου συχνά δεν υπάρχουν επαρκείς υποδομές αισθητήρων ή ολοκληρωμένα συστήματα Building Management Systems (BMS).

Μέσω ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου είναι δυνατή η οργάνωση χώρων, η τεκμηρίωση του εξοπλισμού, η συγκέντρωση τεχνικών χαρακτηριστικών, η διαχείριση εγγράφων και η υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης. Για τον λόγο αυτό, τα Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να αποτελέσουν αποτελεσματικά εργαλεία υποστήριξης του Facility Management ακόμη και χωρίς συνεχή ροή δεδομένων πραγματικού χρόνου.

Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία για οργανισμούς που διαχειρίζονται κρίσιμες υποδομές, όπως ενεργειακές εγκαταστάσεις, υποσταθμούς, διοικητικά κτίρια και τεχνικές εγκαταστάσεις υψηλής λειτουργικής σημασίας.

Η οργάνωση των δεδομένων σε ένα ενιαίο BIM-based μοντέλο επιτρέπει την καταγραφή των χώρων, την τεκμηρίωση του Η/Μ εξοπλισμού, τη δημιουργία ζωνών

συντήρησης, τη συσχέτιση τεχνικών πληροφοριών και την υποστήριξη διαδικασιών Facility Management.

Συνεπώς, η δημιουργία ενός οργανωμένου Στατικού Ψηφιακού Διδύμου μπορεί να αποτελέσει ρεαλιστικό πρώτο στάδιο ψηφιακού μετασχηματισμού, καθώς δημιουργεί το απαραίτητο πληροφοριακό υπόβαθρο για μελλοντική ενσωμάτωση αισθητήρων, BMS και λειτουργικών δεδομένων πραγματικού χρόνου.

Η παρούσα εργασία υιοθετεί τη λογική του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου, καθώς η υπό μελέτη εγκατάσταση δεν διαθέτει ολοκληρωμένο δίκτυο αισθητήρων ή συστήματα BMS που να επιτρέπουν την ανάπτυξη πλήρως δυναμικού Ψηφιακού Διδύμου. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα επικεντρώνεται στην οργάνωση της διαθέσιμης πληροφορίας μέσω BIM και στη δημιουργία δομημένης ψηφιακής βάσης δεδομένων για τη διαχείριση της εγκατάστασης.

Κατά συνέπεια, τα Στατικά Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της διαχείρισης τεχνικής πληροφορίας σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, δημιουργώντας παράλληλα τις προϋποθέσεις για μελλοντική μετάβαση σε περισσότερο δυναμικές εφαρμογές Ψηφιακών Διδύμων.

2.5 Τεχνητή Νοημοσύνη, Ψηφιακά Δίδυμα και προγνωστική συντήρηση

Η ανάπτυξη τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) και μηχανικής μάθησης (Machine Learning) δημιουργεί νέες δυνατότητες αξιοποίησης των δεδομένων που οργανώνονται μέσω BIM και Ψηφιακών Διδύμων.

Η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης σε περιβάλλοντα Digital Twin συνδέεται κυρίως με την ανάλυση λειτουργικών δεδομένων, την ανίχνευση ανωμαλιών, την ενεργειακή βελτιστοποίηση και την προγνωστική συντήρηση εξοπλισμού (Liu et al., 2024; Piras et al., 2024). Ωστόσο, η αποτελεσματική αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης προϋποθέτει αξιόπιστο πληροφοριακό υπόβαθρο, οργανωμένη πληροφοριακή δομή, κατάλληλη παραμετροποίηση και επαρκή ιστορικά στοιχεία λειτουργίας.

Παρότι οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Ελλιπή, μη δομημένα ή ασυνεπή δεδομένα περιορίζουν σημαντικά την αξιοπιστία των αλγορίθμων και την αξία των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Η προγνωστική συντήρηση βασίζεται στην ανάλυση δεδομένων λειτουργίας και στην εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης μελλοντικών αστοχιών, επιτρέποντας τον προγραμματισμό ενεργειών συντήρησης πριν την εκδήλωση βλάβης (Liu et al., 2024). Στα πιο εξελιγμένα Digital Twins, τα δεδομένα από αισθητήρες μπορούν να αναλυθούν μέσω αλγορίθμων AI, επιτρέποντας την εκτίμηση της κατάστασης λειτουργίας και της πιθανότητας αστοχίας εξοπλισμού.

Επομένως, η δημιουργία οργανωμένων BIM μοντέλων και Στατικών Ψηφιακών Διδύμων μπορεί να θεωρηθεί απαραίτητο πρώτο βήμα για τη μελλοντική ανάπτυξη πιο εξελιγμένων εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης στις τεχνικές εγκαταστάσεις. Παρότι η παρούσα εργασία δεν περιλαμβάνει υλοποίηση εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης, η ανάπτυξη οργανωμένου BIM μοντέλου και Στατικού Ψηφιακού Διδύμου δημιουργεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τη μελλοντική αξιοποίηση τέτοιων τεχνολογιών.

Συνεπώς, η δημιουργία δομημένων πληροφοριακών μοντέλων μέσω BIM και Στατικών Ψηφιακών Διδύμων δεν υποστηρίζει μόνο τις σημερινές ανάγκες διαχείρισης εγκαταστάσεων, αλλά δημιουργεί και το αναγκαίο πληροφοριακό υπόβαθρο για τη μελλοντική αξιοποίηση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και προγνωστικής συντήρησης.

2.6 Ερευνητικό κενό και συμβολή της εργασίας

Παρά τη σημαντική ανάπτυξη των τεχνολογιών BIM και Digital Twin, η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι μεγάλο μέρος της έρευνας επικεντρώνεται είτε σε νέα έργα είτε σε εγκαταστάσεις με υψηλό επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας και εκτεταμένες υποδομές αισθητήρων και αυτοματισμών.

Αντίθετα, περιορισμένος αριθμός ερευνητικών εργασιών εξετάζει τη δυνατότητα ανάπτυξης Στατικών Ψηφιακών Διδύμων σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις κρίσιμων ενεργειακών υποδομών, όπου τα διαθέσιμα δεδομένα είναι συχνά ελλιπή και η ψηφιακή ωριμότητα περιορισμένη.

Στόχος της εργασίας είναι να συμβάλει στην κάλυψη μέρους αυτού του ερευνητικού κενού, διερευνώντας τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός BIM-based Στατικού Ψηφιακού Διδύμου σε πραγματική εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ. Η συμβολή της έρευνας έγκειται στην εφαρμογή της προσέγγισης αυτής σε υφιστάμενη εγκατάσταση κρίσιμης ενεργειακής υποδομής και στην αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησής της για σκοπούς διαχείρισης εγκαταστάσεων (Facility Management).

Πίνακας 2.4 Επίπεδα ψηφιακής ωριμότητας εγκατάστασης

Επίπεδο	Περιγραφή	Σχέση με την παρούσα εργασία
Level 0	Έντυπα σχέδια / αποσπασματικά δεδομένα	Αρχική κατάσταση
Level 1	Ψηφιοποιημένο BIM μοντέλο	Βασικό αποτέλεσμα
Level 2	Static Digital Twin	Στόχος εργασίας
Level 3	Σύνδεση με BMS / αισθητήρες	Μελλοντική προοπτική
Level 4	AI-assisted real-time twin	Ερευνητική επέκταση

2.7 Ερευνητικά Ερωτήματα

Με βάση το ερευνητικό κενό που εντοπίστηκε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διαμορφώθηκαν τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

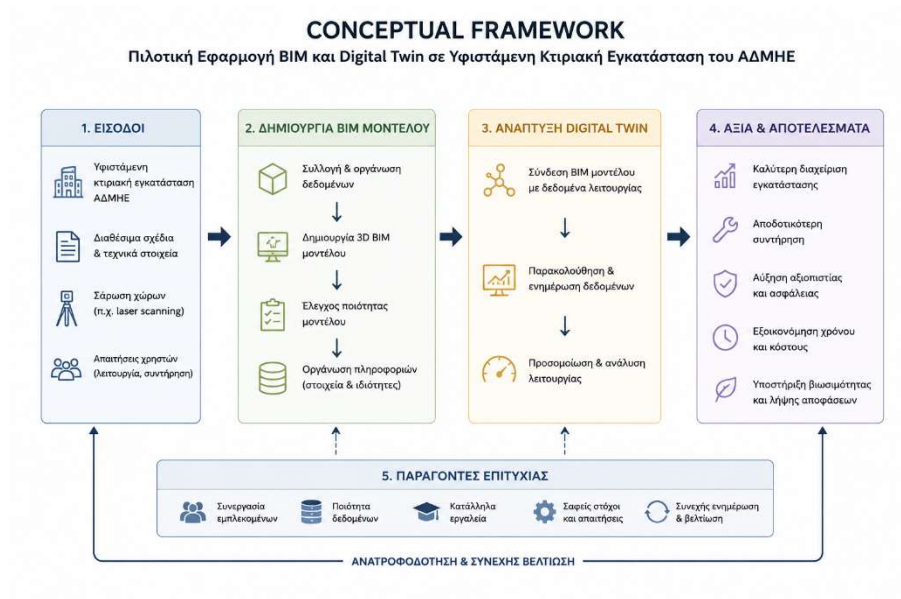
1. Μπορεί η ανάπτυξη ενός BIM μοντέλου να αποτελέσει αποτελεσματική βάση για τη δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου σε υφιστάμενη κτιριακή υποδομή κρίσιμης ενεργειακής υποδομής;
2. Ποιες πληροφορίες και ποια επίπεδα δεδομένων απαιτούνται για την υποστήριξη διαδικασιών διαχείρισης εγκαταστάσεων (Facility Management) μέσω ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου;
3. Ποια είναι τα βασικά οφέλη και οι κυριότερες προκλήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή BIM και Static Digital Twin σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις;
4. Ποιες προϋποθέσεις απαιτούνται για τη μελλοντική μετάβαση από ένα Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο σε ένα Δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο με αξιοποίηση τεχνολογιών αισθητήρων, BMS και Τεχνητής Νοημοσύνης;

2.8 Ερευνητική Προσέγγιση

Η έρευνα ακολουθεί τη λογική πιλοτικής εφαρμογής, καθώς επικεντρώνεται στην εφαρμογή τεχνολογιών BIM και Στατικού Ψηφιακού Διδύμου σε πραγματική εγκατάσταση κρίσιμης ενεργειακής υποδομής του ΑΔΜΗΕ.

Η στρατηγική υλοποίησης της έρευνας διαμορφώθηκε με σκοπό να απεικονίζει τη διαδικασία μετάβασης από την υπό μελέτη εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ στη δημιουργία ενός στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) μέσω τεχνολογιών BIM.

Η προσέγγιση βασίζεται στη συλλογή και οργάνωση διαθέσιμων δεδομένων, στην ανάπτυξη τρισδιάστατου BIM μοντέλου και στη διασύνδεσή του με πληροφορίες λειτουργίας και συντήρησης. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής αποσκοπεί στη βελτίωση της διαχείρισης των υποδομών, στην υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης και στη διευκόλυνση της λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων. Παράλληλα, διερευνώνται κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας, όπως η ποιότητα των δεδομένων, η συνεργασία των εμπλεκόμενων μερών και οι διαδικασίες διαρκούς επικαιροποίησης του μοντέλου.



Σχήμα 2.1 Ερευνητική Προσέγγιση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανάπτυξης BIM-based Static Digital Twin για την υπό μελέτη εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ.

3 Μεθοδολογία

3.1 Περιγραφή της εγκατάστασης και υφιστάμενη κατάσταση

Η διπλωματική εργασία αποτελεί πιλοτική εφαρμογή σε κτιριακή υποδομή του ΑΔΜΗΕ, με στόχο τη δημιουργία μοντέλου BIM και Στατικού Ψηφιακού Διδύμου για τη διαχείριση, παρακολούθηση και υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης του κτιρίου. Η επιλογή της εγκατάστασης βασίστηκε στη διαθεσιμότητα τεχνικών στοιχείων, στην ύπαρξη πραγματικών λειτουργικών και ενεργειακών δεδομένων, καθώς και στη δυνατότητα αξιοποίησης του μοντέλου ως οδηγού για αντίστοιχες εγκαταστάσεις κρίσιμων ενεργειακών υποδομών.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε συλλογή και αξιολόγηση των διαθέσιμων στοιχείων της εγκατάστασης. Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν περιλαμβάνουν πολεοδομικά σχέδια, αρχιτεκτονικές κατόψεις, τεχνικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους, πληροφορίες για τον φέροντα οργανισμό, στοιχεία Η/Μ εγκαταστάσεων, δεδομένα ενεργειακής συμπεριφοράς και στοιχεία από την υφιστάμενη ενεργειακή μελέτη του κτιρίου. Η εγκατάσταση που μελετάται περιλαμβάνει υπόγειο και τρεις υπέργειους ορόφους, με χρήσεις όπως γραφεία, διάδρομοι, αποθήκες, χώροι κλιμακοστασίων/ανελκυστήρων, WC, μηχανουργείο και κυλικείο, όπως καταγράφεται και στην ενεργειακή μελέτη.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αποτύπωση των χώρων και των επιμέρους χρήσεων, καθώς η ορθή οργάνωση των Rooms αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία ενός λειτουργικού Στατικού Ψηφιακού Διδύμου. Κάθε χώρος αντιμετωπίστηκε όχι μόνο ως γεωμετρική οντότητα, αλλά ως φορέας πληροφορίας, ο οποίος μπορεί να συσχετιστεί με Η/Μ εξοπλισμό, ενεργειακά χαρακτηριστικά, ανάγκες συντήρησης και λειτουργικά δεδομένα.



Σχήμα 3.1 Γενική θέση εγκατάστασης και κτίριο μελέτης. Πηγή: Εικόνες αεροφωγίας από αρχείο Υπηρεσίας ΔΑΓΥ.

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτική καταγραφή χρήσεων ανά όροφο.

Πίνακας - Basic Room Parameters & MEP Data														
Room Number	Room Name	ET_Floor	Area, m ²	ET_Thermal_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Air_Mass_Flow	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone
B-01	Αίθουσα	ET_Floor	72.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-02	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-03	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-04	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
Σύνολο Χρήσεων														
Πίνακας - Basic Room Parameters & MEP Data														
Room Number	Room Name	ET_Floor	Area, m ²	ET_Thermal_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Air_Mass_Flow	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone
1	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
2	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
3	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
4	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
5	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
6	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
Σύνολο Χρήσεων														
Πίνακας - Basic Room Parameters & MEP Data														
Room Number	Room Name	ET_Floor	Area, m ²	ET_Thermal_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Air_Mass_Flow	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone
B-01	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-02	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-03	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-04	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
Σύνολο Χρήσεων														
Πίνακας - Basic Room Parameters & MEP Data														
Room Number	Room Name	ET_Floor	Area, m ²	ET_Thermal_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Air_Mass_Flow	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Cooling_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone	ET_Heating_Zone	ET_Thermal_Zone
B-01	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-02	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-03	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
B-04	Αίθουσα	ET_Floor	18.00	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone	Thermal Zone
Σύνολο Χρήσεων														

3.2 Εφαρμογή αρχών PM² Advanced στη διαχείριση και υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας

Για την οργάνωση και την υλοποίηση του εγχειρήματος υιοθετήθηκε προσαρμοσμένη προσέγγιση βασισμένη στις αρχές της μεθοδολογίας PM² (Project Management Methodology) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, με στοιχεία PM² Advanced, προκειμένου να επιτευχθεί σαφής δομή εργασιών, οργανωμένη διαχείριση

παραδοτέων, έλεγχος χρονοδιαγράμματος, αναγνώριση και διαχείριση κινδύνων, συστηματική παρακολούθηση της προόδου της έρευνας.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης πραγματοποιήθηκε λόγω της πολυπλοκότητας του αντικειμένου και της ανάγκης διαχείρισης διαφορετικών κατηγοριών δεδομένων. Επιπλέον, η εμπλοκή διαφορετικών γνωστικών αντικειμένων και η σταδιακή ανάπτυξη και αξιολόγηση του πληροφοριακού μοντέλου καθιστούν απαραίτητη την οργανωμένη προσέγγιση που παρέχει η μεθοδολογία PM².

Η εφαρμογή αρχών PM² στην παρούσα εργασία δεν αντιμετωπίζει τη διπλωματική αποκλειστικά ως ακαδημαϊκή διαδικασία, αλλά ως οργανωμένο τεχνικό έργο (project), με οργάνωση σε διακριτές φάσεις, συγκεκριμένα παραδοτέα, εκπόνηση και παρακολούθηση χρονοδιαγράμματος, αναγνώριση και αντιμετώπιση κινδύνων, αναγνώριση εμπλεκόμενων μερών, διαδικασίες ελέγχου.

3.3 Φάσεις υλοποίησης της εργασίας σύμφωνα με PM² προσέγγιση

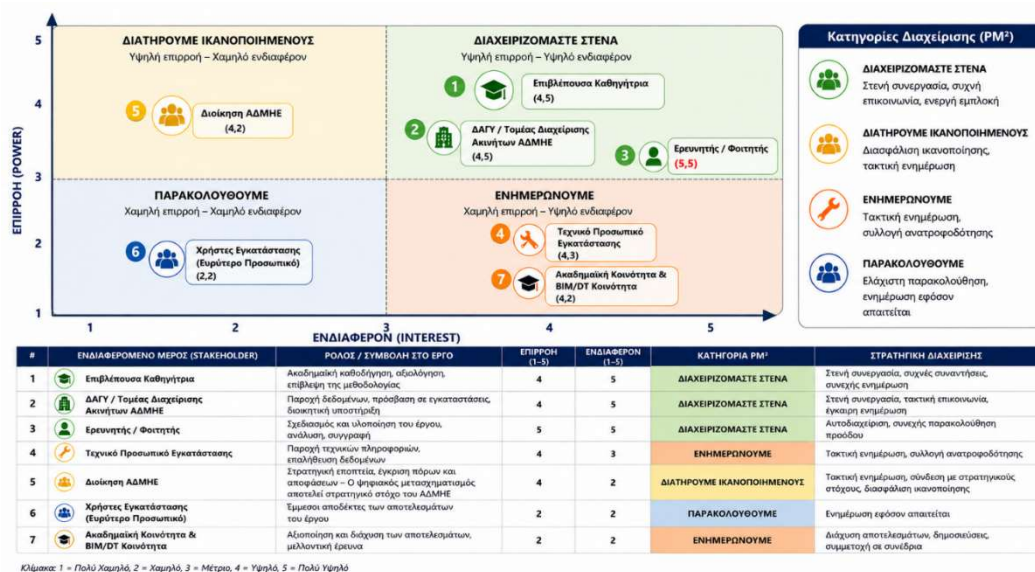
Η ανάπτυξη της διπλωματικής οργανώθηκε σε επιμέρους φάσεις, σύμφωνα με τη λογική κύκλου ζωής έργου που προτείνει η PM² μεθοδολογία, PM² Alliance (2023).

Πίνακας 3.2 Φάσεις υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας

Φάση	Περιγραφή
Φάση Έναρξης	Καθορισμός θέματος, στόχων και score
Φάση Σχεδιασμού	Σχεδιασμός μεθοδολογίας και χρονοδιαγράμματος
Φάση Υλοποίησης	Συλλογή δεδομένων και ανάπτυξη BIM μοντέλου
Φάση Ελέγχου και παρακολούθησης	Έλεγχος ποιότητας μοντέλου και πληρότητας δεδομένων
Φάση Κλεισίματος	Τελική αξιολόγηση, συμπεράσματα και παρουσίαση

3.4 Αναγνώριση Ενδιαφερόμενων Μερών (Stakeholders) Εργασίας

Σύμφωνα με τις αρχές της μεθοδολογίας PM², πραγματοποιήθηκε αναγνώριση και αξιολόγηση των βασικών ενδιαφερόμενων μερών (stakeholders) εξασφαλίζοντας ότι το παραγόμενο Static Digital Twin ανταποκρίνεται στις ανάγκες των βασικών χρηστών του.



Σχήμα 3.2 PM² Stakeholder Power-Interest Matrix για την ανάπτυξη BIM και Στατικού Ψηφιακού Διδύμου σε υφιστάμενη κτιριακή υποδομή

Η αξιολόγηση βασίστηκε σε δύο κριτήρια: τον βαθμό επιρροής (Power) και τον βαθμό ενδιαφέροντος (Interest) κάθε stakeholder ως προς την επιτυχή υλοποίηση και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της εργασίας.

Ο ερευνητής/φοιτητής, η επιβλέπουσα καθηγήτρια και η ΔΑΓΥ του ΑΔΜΗΕ κατατάσσονται στην κατηγορία «Διαχειριζόμαστε Στενά» (Manage Closely), καθώς διαθέτουν υψηλή επιρροή και υψηλό ενδιαφέρον για την επιτυχία του έργου. Επιπλέον, η Διοίκηση του ΑΔΜΗΕ παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον λόγω της άμεσης σύνδεσης του αντικειμένου της έρευνας με τον στρατηγικό στόχο του οργανισμού για τον ψηφιακό μετασχηματισμό των υποδομών και των διαδικασιών του Διαχειριστή. Αντίστοιχα, το τεχνικό προσωπικό της εγκατάστασης, οι Facility Managers, οι χρήστες της εγκατάστασης και η ευρύτερη ακαδημαϊκή και επαγγελματική κοινότητα BIM/Digital Twin αξιολογούνται βάσει της συμβολής τους στην παροχή δεδομένων, την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων και τη μελλοντική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Η ανάλυση αυτή υποστηρίζει τον αποτελεσματικό σχεδιασμό επικοινωνίας και τη διαχείριση των προσδοκιών των εμπλεκόμενων μερών καθ' όλη τη διάρκεια του έργου.

3.5 Διαχείριση παραδοτέων (Deliverables Management)

Η διαχείριση των παραδοτέων οργανώθηκε με βάση τα βασικά στάδια της εργασίας, με σκοπό τη σταδιακή αξιολόγηση της προόδου, τη διασφάλιση αποδεκτού επιπέδου ποιότητας και τη συνεχή παρακολούθηση της εξέλιξης του έργου.

Πίνακας 3.3 Κύρια παραδοτέα της εργασίας

Παραδοτέο	Περιγραφή
Βιβλιογραφία	Βιβλιογραφική επισκόπηση BIM / DT / AI
Συγκέντρωση τεχνικών στοιχείων	Συγκέντρωση σχεδίων και τεχνικών στοιχείων
Ψηφιακό Μοντέλο Κτιριακών Πληροφοριών	Ανάπτυξη μοντέλου στο Revit
Βάση δεδομένων	Δομή και οργάνωση πληροφοριών
Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο	Πληροφοριακό μοντέλο διαχείρισης
Αξιολόγηση	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων
Τελικό σώμα διπλωματικής εργασίας	Τελική συγγραφή και τεκμηρίωση

Τα παραδοτέα δεν αντιμετωπίστηκαν ως ανεξάρτητα προϊόντα, αλλά ως αλληλοσυνδεόμενα στοιχεία της συνολικής διαδικασίας ανάπτυξης του Static Digital Twin.

3.6 Διαχείριση κινδύνων (Risk Management)

Στο πλαίσιο της προσέγγισης αυτής πραγματοποιήθηκε επίσης αναγνώριση βασικών κινδύνων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν συνολικά την εργασία.

Πίνακας 3.4 Ενδεικτικοί κίνδυνοι της εργασίας

Κίνδυνος	Επίδραση	Πιθανότητα	Επίπτωση	Απόκριση
Ελλιπή σχέδια	Μειωμένη ακρίβεια μοντέλου	Μεσαία	Υψηλή	Συμπλήρωση στοιχείων μέσω αυτοψιών και διασταύρωσης δεδομένων
Έλλειψη δεδομένων H/M	Περιορισμένη πληροφοριακή πληρότητα	Υψηλή	Υψηλή	Συνεντεύξεις με τεχνικό προσωπικό και αξιοποίηση διαθέσιμων τεχνικών φακέλων
Αποκλίσεις as-built στοιχείων	Ανάγκη πρόσθετων αυτοψιών	Υψηλή	Μεσαία	Επιτόπιοι έλεγχοι και επικαιροποίηση μοντέλου BIM
Περιορισμένος χρόνος	Καθυστέρηση παραδοτέων	Μεσαία	Υψηλή	Χρήση χρονοδιαγράμματος κατά PM ² και συνεχής παρακολούθηση προόδου
Υψηλή πολυπλοκότητα δεδομένων	Αυξημένο επίπεδο διαχείρισης	Μεσαία	Μεσαία	Τυποποίηση δομής δεδομένων και σταδιακή παραμετροποίηση

Σύμφωνα με τις αρχές της μεθοδολογίας PM², οι κίνδυνοι αξιολογήθηκαν ποιοτικά βάσει της πιθανότητας εμφάνισης και της πιθανής επίπτωσής τους στην επίτευξη των στόχων της εργασίας. Για κάθε αναγνωρισμένο κίνδυνο καθορίστηκαν κατάλληλα μέτρα μετριασμού και διορθωτικές ενέργειες, με σκοπό τη διασφάλιση της ομαλής εξέλιξης του έργου και της ποιότητας των παραδοτέων.

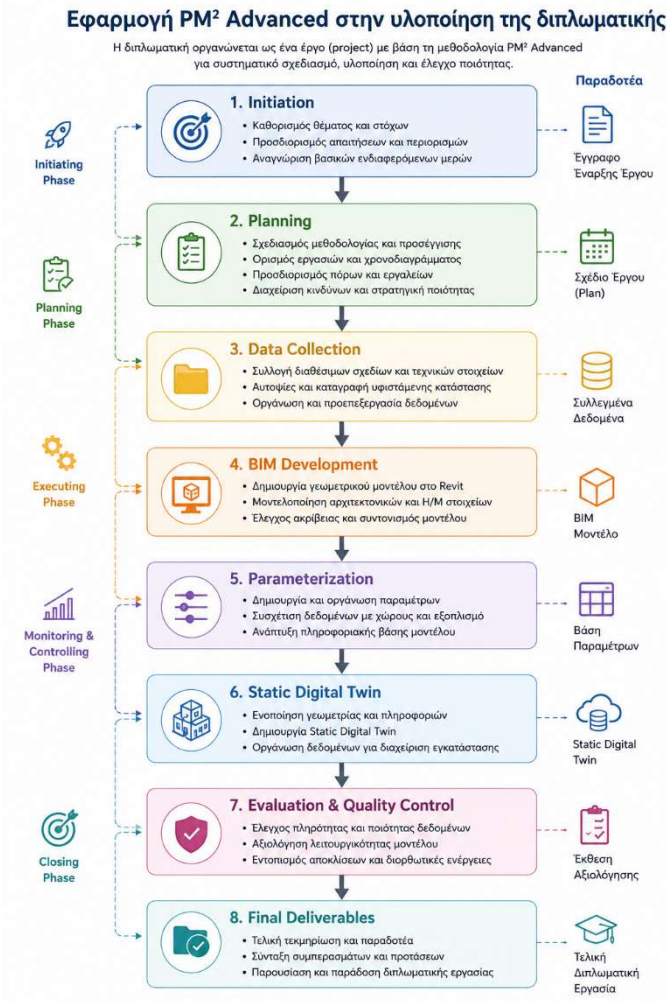
3.7 Παρακολούθηση προόδου και ποιοτικός έλεγχος

Η πρόοδος της εργασίας παρακολουθήθηκε με οργανωμένη μεθοδολογική προσέγγιση όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5 Κύρια στάδια παρακολούθησης προόδου και ποιοτικού ελέγχου της εργασίας

Στάδιο Ελέγχου	Περιγραφή Διαδικασίας	Σκοπός
Περιοδικοί έλεγχοι BIM μοντέλου	Πραγματοποιήθηκαν τακτικοί έλεγχοι του ψηφιακού μοντέλου κατά τη διάρκεια ανάπτυξής του.	Διασφάλιση συνοχής, λειτουργικότητας και σταδιακής βελτίωσης του μοντέλου.
Επαλήθευση πληρότητας parameters	Ελέγχθηκε η συμπλήρωση και η ορθή οργάνωση των παραμέτρων χώρων και H/M εξοπλισμού.	Εξασφάλιση αξιοποιήσιμης και δομημένης πληροφορίας για το Static Digital Twin.
Έλεγχος αντιστοίχισης χώρων και εξοπλισμού	Πραγματοποιήθηκε έλεγχος συσχέτισης των H/M στοιχείων με τους αντίστοιχους χώρους εγκατάστασης.	Βελτίωση της αξιοπιστίας της πληροφοριακής δομής και της λειτουργικής οργάνωσης.
Συνεχής αξιολόγηση πληροφοριακής δομής	Αξιολογήθηκε η συνοχή της δομής δεδομένων και η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης του μοντέλου.	Διασφάλιση διαλειτουργικότητας και δυνατότητας μελλοντικής αναβάθμισης.
Επανέλεγχοι γεωμετρικής ακρίβειας μέσω αυτοψίας	Πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες επαληθεύσεις της αποτύπωσης του κτιρίου και των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών.	Περιορισμός αποκλίσεων μεταξύ πραγματικής εγκατάστασης και BIM μοντέλου.
Έλεγχοι πληρότητας H/M δεδομένων	Συλλέχθηκαν και επαληθεύθηκαν στοιχεία μέσω συνεντεύξεων και επικοινωνίας με χρήστες των χώρων και τεχνικό προσωπικό.	Συμπλήρωση και τεκμηρίωση λειτουργικών και τεχνικών πληροφοριών.
Έλεγχος διαθέσιμων τεχνικών εγγράφων	Έγινε διασταύρωση στοιχείων μέσω σχεδίων, τεχνικών εκθέσεων και λοιπών διαθέσιμων εγγράφων.	Επιβεβαίωση αξιοπιστίας των δεδομένων που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο.

Δοκιμές εξαγωγής δεδομένων	Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξαγωγής στοιχείων σε πίνακες, schedules και μητρώα δεδομένων.	Αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης του μοντέλου για Facility Management και τεχνική διαχείριση.
----------------------------	--	---



Σχήμα 3.3 Εφαρμογή PM² Advanced στην υλοποίηση της διπλωματικής

Η εφαρμογή αρχών PM² Advanced στην παρούσα εργασία συνέβαλε στη συστηματική οργάνωση της ερευνητικής διαδικασίας και ανέδειξε ότι οι μεθοδολογίες διαχείρισης έργων μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά όχι μόνο σε τεχνικά έργα κατασκευών, αλλά και σε έργα ψηφιακού μετασχηματισμού και ανάπτυξης πληροφοριακών υποδομών.

3.8 Συλλογή και προετοιμασία δεδομένων

Για την ανάπτυξη του BIM μοντέλου και του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου χρειάστηκε η προετοιμασία διαφορετικών κατηγοριών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά

διαχωρίστηκαν σε γεωμετρικά, τεχνικά, λειτουργικά, ενεργειακά και δεδομένα συντήρησης.

Τα γεωμετρικά δεδομένα προήλθαν κυρίως από τα διαθέσιμα σχέδια της εγκατάστασης. Σε πρώτο στάδιο εξετάστηκε η πληρότητα και αξιοπιστία των σχεδίων, ώστε να καθοριστεί ο βαθμός ακρίβειας με τον οποίο θα αναπτυχθεί το BIM μοντέλο. Στη συνέχεια, τα σχέδια χρησιμοποιήθηκαν ως υπόβαθρο για τη δημιουργία των επιπέδων, των αξόνων, του φέροντος οργανισμού, των τοίχων, των ανοιγμάτων, των κουφωμάτων, της στέγης και των βασικών αρχιτεκτονικών στοιχείων.

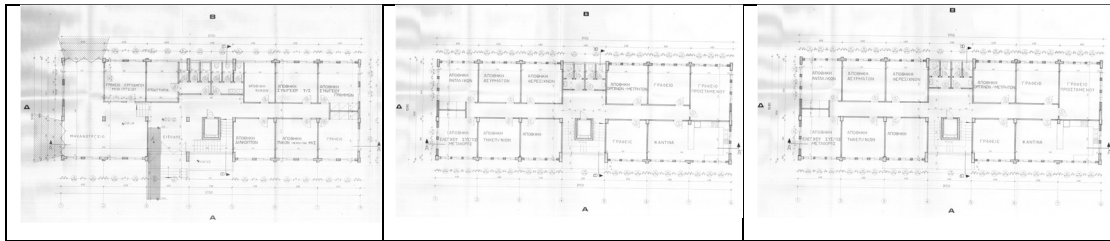
Τα τεχνικά και λειτουργικά δεδομένα αντλήθηκαν από την ενεργειακή μελέτη, την αυτοψία και τα διαθέσιμα στοιχεία της εγκατάστασης. Για κάθε κατηγορία στοιχείου εξετάστηκε ποια πληροφορία μπορεί να ενσωματωθεί στο BIM μοντέλο και ποια πληροφορία πρέπει να αποθηκευτεί σε βοηθητικούς πίνακες ή schedules. Ενδεικτικά, για τους χώρους καταγράφηκαν χρήση, όροφος, επιφάνεια, ωράριο λειτουργίας, αριθμός χρηστών, τύπος φωτισμού, σύστημα θέρμανσης/ψύξης και τύπος αερισμού.

Για την οργάνωση των δεδομένων δημιουργήθηκε μητρώο χώρων και εξοπλισμού σε μορφή πίνακα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως ενδιάμεσο εργαλείο μεταξύ της μελέτης και του Revit. Το μητρώο αυτό επιτρέπει τη συστηματική αντιστοίχιση κάθε Room με τις αντίστοιχες παραμέτρους του και διευκολύνει τον έλεγχο πληρότητας των δεδομένων πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

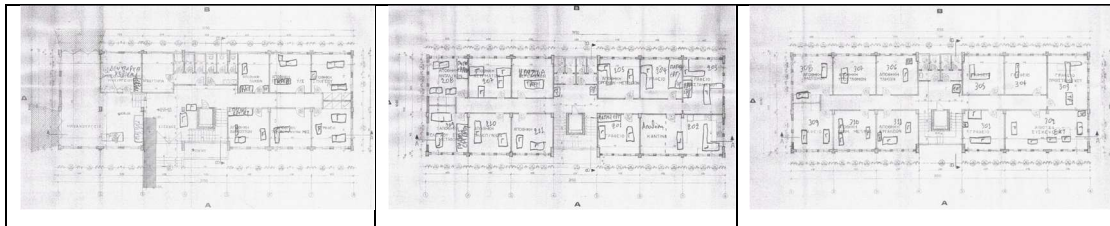


Σχήμα 3.4 Ροή συλλογής και προετοιμασίας δεδομένων.

Βήμα 1^ο: Συλλογή πολεοδομικών - 2D σχεδίων (πηγή: Αρχείο Υπηρεσίας ΑΔΜΗΕ, κατόπιν παραλαβής από την αρμόδια Υ.ΔΟΜ.)



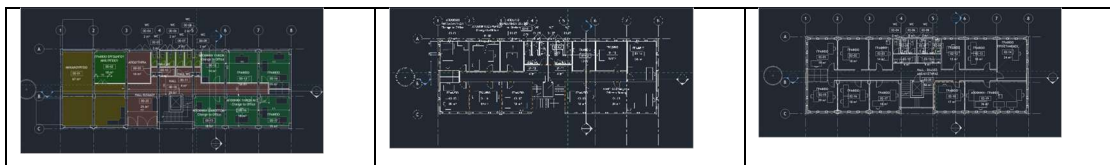
Βήμα 2º: Επικαιροποίηση μέσω αυτοψίας - 2D σχεδίων (πηγή: Αρχείο εργαζόμενου ΑΔΜΗΕ, κατόπιν επικοινωνίας και διενέργειας σχετικής αυτοψίας)



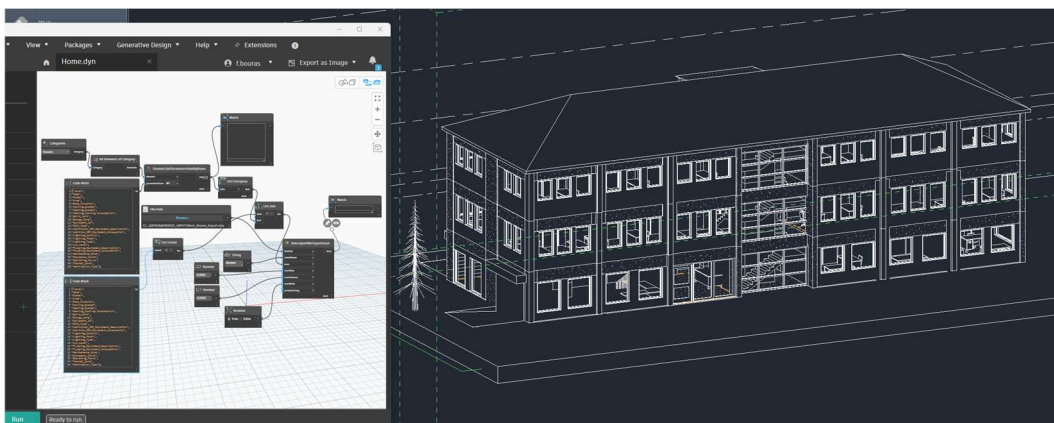
Βήμα 3º: BIM Model (πηγή: Δημιουργία αρχείου βάσει πολεοδομικών στοιχείων και στοιχείων που συλλέχθηκαν συνολικά)



Βήμα 4º: Δημιουργία Rooms και οργάνωση χωρικής πληροφορίας.



Βήμα 5º: Δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου μέσω οργάνωσης χώρων, παραμέτρων και τεχνικών δεδομένων.



Βήμα 6ο: Εξαγωγή αρχείου Excel για έλεγχο, συντήρηση και διαχείριση της εγκατάστασης

Βήμα 7ο: Διερεύνηση δυνατότητας ελέγχου και αναθεώρησης αποτελεσμάτων με χρήση AI και διασταύρωση με H/M προμελέτη.

Θα σου φτιάξω οργανωμένο Excel με tabs ανά όροφο και στήλες για Rooms, χρήση επιφάνειες, HVAC, φωτισμό, αερισμό, εξοπλισμό και παραμέτρους Revit/Digital Twin. Θα βασιστώ στη μελέτη που ανέβασες και όπου δεν υπάρχει ανάλυση ανά δωμάτιο θα βάλω καθαρές θέσεις για συμπλήρωση/αυτοφία, όχι αυθαίρετα νοήματα.

Έχω στήσει τη δομή του workbook με φύλλα ανά όροφο, σύνολη και ξεχωριστό φύλλο για προτεινόμενα Revit shared parameters. Τώρα κάνω έναν γρήγορο έλεγχο στα σύνολα και στις στήλες ώστε να μη σου παραδώσω αρχείο με μπερδεμένες επιφάνειες.

Thought for 2m 46s

Έτοιμο. Το έφτιαξα σε Excel με tabs ανά όροφο, σύνολη και φύλλο Revit parameters. Οι επιφάνειες βασίζονται στον πίνακα χρήσεων της μελέτης και τα H/M πεδία στη μελέτη υφιστάμενης/προτεινόμενης κατάστασης.

PIP_Tripoli_Static_Digital_Twin_Rooms MEP_Register.xlsx

	A	B	C
1	Static Digital Twin - Ri		
2	Πηγή δεδομένων	2024	
3	Ημερομηνία αρχείου	2026-05-08	
4	Στοιχείο	static digital twin	
5	Σημείωση	επιβεβαιωθούν από τα σχέδια/Revit Rooms.	
6			
7	Όροφος	Γραφείο	Διαδρομή
8	Υπόγειο		0.00
9	1ος όροφος		64.72
10	Α' όροφος		227.09
11	Β' όροφος		268.12
12	Σύνολο		6.00
13	Σύνολο		559.93

Σύνολη Υπόγειο 1ος Όροφος 2ος Όροφος Σύνολο Revit Params

Δεδομένα Στατικού Ψηφιακού Διδύμου για έλεγχο με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης για διασταύρωση πληροφορίας με ενεργειακά στοιχεία του κτιρίου - Ισόγειο

Room Name	Room Area	Room Volume	Room Height	Room Type	Room Category	Room Subcategory	Room Material	Room Color	Room Texture	Room Image	Room Status	Room Notes
Room 1	100.00	1000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 2	200.00	2000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 3	300.00	3000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 4	400.00	4000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 5	500.00	5000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 6	600.00	6000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 7	700.00	7000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 8	800.00	8000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 9	900.00	9000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 10	1000.00	10000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	

Δεδομένα Στατικού Ψηφιακού Διδύμου για έλεγχο με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης για διασταύρωση πληροφορίας με ενεργειακά στοιχεία του κτιρίου – 1^{ος} Όροφος

Room Name	Room Area	Room Volume	Room Height	Room Type	Room Category	Room Subcategory	Room Material	Room Color	Room Texture	Room Image	Room Status	Room Notes
Room 11	1100.00	11000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 12	1200.00	12000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 13	1300.00	13000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 14	1400.00	14000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 15	1500.00	15000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 16	1600.00	16000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 17	1700.00	17000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 18	1800.00	18000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 19	1900.00	19000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 20	2000.00	20000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	

Δεδομένα Στατικού Ψηφιακού Διδύμου για έλεγχο με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης για διασταύρωση πληροφορίας με ενεργειακά στοιχεία του κτιρίου – 2^{ος} Όροφος

Room Name	Room Area	Room Volume	Room Height	Room Type	Room Category	Room Subcategory	Room Material	Room Color	Room Texture	Room Image	Room Status	Room Notes
Room 21	2100.00	21000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 22	2200.00	22000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 23	2300.00	23000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 24	2400.00	24000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 25	2500.00	25000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 26	2600.00	26000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 27	2700.00	27000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 28	2800.00	28000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 29	2900.00	29000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	
Room 30	3000.00	30000.00	10.00	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Active	

Σχήμα 3.1 Από το 2D σε BIM και από BIM στο Στατικό και Δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο

Πίνακας 3.6 Κατηγορίες δεδομένων εισόδου.

Κατηγορία δεδομένων	Περιεχόμενο	Πηγή	Χρήση στο μοντέλο
Γεωμετρικά	Κατόψεις, Τομές, Όψεις	Πολυεδομικά σχέδια	BIM geometry
Χωρικά	Χρήσεις, Επιφάνειες, Όροφοι	Μελέτη / Αυτοψία	Rooms
H/M	FCU, Φωτιστικά, Λέβητας, Split units	Ενεργειακή μελέτη	MEP metadata
Ενεργειακά	U-values, Καταναλώσεις, Ισχύς	Ενεργειακή μελέτη	Energy parameters
Συντήρησης	Κατάσταση, Ζώνη, Εξοπλισμός	Αυτοψία / εκτίμηση	Maintenance register

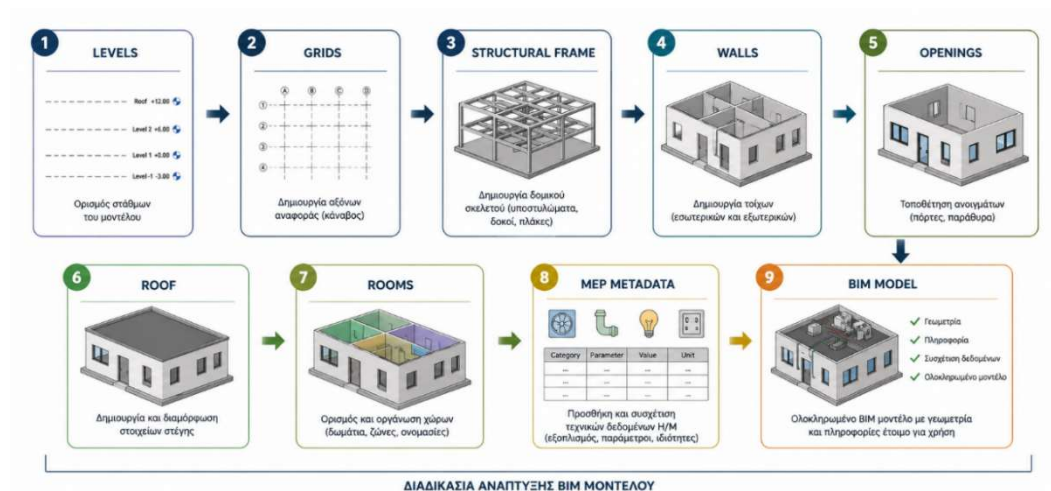
3.9 Ανάπτυξη του BIM μοντέλου

Η ανάπτυξη του BIM μοντέλου πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Autodesk Revit. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα βασικά επίπεδα του κτιρίου, σύμφωνα με τις στάθμες των διαθέσιμων σχεδίων. Στη συνέχεια εισήχθησαν τα αρχιτεκτονικά υπόβαθρα και έγινε προσανατολισμός του μοντέλου, ώστε η γεωμετρία να ακολουθεί κατά το δυνατόν την πραγματική θέση και διάταξη του κτιρίου.

Σε πρώτο στάδιο μοντελοποιήθηκε ο βασικός φέρων οργανισμός του κτιρίου. Δημιουργήθηκαν οι κολώνες, οι δοκοί και τα βασικά στοιχεία του σκελετού, ώστε να διαμορφωθεί ένα αξιόπιστο υπόβαθρο για την ανάπτυξη των υπόλοιπων αρχιτεκτονικών και λειτουργικών στοιχείων. Στη συνέχεια ακολούθησαν οι τοιχοποιίες, τα ανοίγματα, τα κουφώματα, οι πόρτες, η στέγη και τα βασικά στοιχεία του περιβάλλοντος χώρου.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη σωστή οργάνωση του μοντέλου σε επίπεδα, views και κατηγορίες στοιχείων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ξεχωριστές κατόψεις για αρχιτεκτονική αποτύπωση, φέροντα οργανισμό, Rooms και μελλοντική H/M πληροφορία. Η διάκριση αυτή κρίθηκε απαραίτητη ώστε το μοντέλο να παραμένει καθαρό, επεξεργάσιμο και κατάλληλο για εξαγωγή δεδομένων.

Το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου καθορίστηκε με βάση τον σκοπό της εργασίας. Δεδομένου ότι αντικείμενο δεν είναι η πλήρης κατασκευαστική μελέτη, αλλά η δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου, το μοντέλο αναπτύχθηκε με έμφαση στη γεωμετρική επάρκεια, στη χωρική οργάνωση και στην ενσωμάτωση κρίσιμων πληροφοριών για τη λειτουργία και συντήρηση του κτιρίου.



Σχήμα 3.2 Διαδικασία ανάπτυξης BIM μοντέλου.

Πίνακας 3.7 Επίπεδο ανάπτυξης μοντέλου ανά κατηγορία στοιχείου.

Κατηγορία	Τρόπος αποτύπωσης	Σκοπός
Φέρων οργανισμός	3D στοιχεία	Βασική γεωμετρική τεκμηρίωση
Τοίχοι	Layered walls	Αποτύπωση κελύφους
Κουφώματα	Families με υλικά	Ενεργειακή και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση
Στέγη	Roof layers	Ενεργειακή αποτύπωση
Rooms	Revit Rooms	Data containers
H/M εξοπλισμός	Families ή metadata	Static twin information

3.10 Δημιουργία Rooms και οργάνωση χωρικής πληροφορίας

Μετά την ολοκλήρωση της βασικής γεωμετρίας δημιουργήθηκαν Rooms ώστε κάθε χώρος να αποκτήσει μοναδική ταυτότητα και να αποτελέσει βασική μονάδα οργάνωσης της πληροφοριακής δομής του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή αποτέλεσε κρίσιμο στάδιο της μεθοδολογίας, καθώς τα Rooms λειτουργούν ως βασικές πληροφοριακές μονάδες του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου.

Για κάθε Room καταχωρίστηκαν βασικά στοιχεία, όπως όνομα χώρου, αριθμός χώρου, όροφος, χρήση, επιφάνεια, τύπος λειτουργίας, αριθμός χρηστών και ωράριο λειτουργίας. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν ή αξιοποιήθηκαν παράμετροι που σχετίζονται

με τον Η/Μ εξοπλισμό, όπως σύστημα θέρμανσης, σύστημα ψύξης, τύπος φωτισμού, ισχύς φωτισμού, τύπος αερισμού, θερμική ζώνη και ζώνη συντήρησης.

Η επιλογή των παραμέτρων έγινε με γνώμονα τη δυνατότητα μελλοντικής αξιοποίησης του μοντέλου ως εργαλείου διαχείρισης εγκατάστασης. Έτσι, οι παράμετροι δεν περιορίστηκαν σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά επεκτάθηκαν σε λειτουργικά και τεχνικά δεδομένα που μπορούν να υποστηρίξουν τη συντήρηση, την ενεργειακή παρακολούθηση και τη λήψη αποφάσεων.

Πίνακας 3.8 Παράμετροι Room για το Static Digital Twin.

Ομάδα παραμέτρων	Παραδείγματα
Ταυτότητα χώρου	Room Name, Room Number
Λειτουργία	Occupancy, Department, Room Function
Χρήση	Occupancy Count, Operating Hours
HVAC	Heating System, Cooling System, HVAC Type, FCU Count
Φωτισμός	Lighting Type, Lighting Power, Lighting Control, Lux Level
Αερισμός	Ventilation Type
Συντήρηση	Maintenance Zone, Equipment ID
Ενεργειακή πληροφορία	Thermal Zone, Energy Zone

3.11 Ενσωμάτωση Η/Μ εξοπλισμού και ενεργειακών δεδομένων

Στο επόμενο στάδιο έγινε η συσχέτιση των χώρων με τον υφιστάμενο και προτεινόμενο Η/Μ εξοπλισμό. Η πληροφορία αυτή οργανώθηκε με βάση τις κατηγορίες θέρμανσης, ψύξης, αερισμού, φωτισμού, ζεστού νερού χρήσης και λοιπού ηλεκτρικού εξοπλισμού.

Για τις ανάγκες του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου δεν κρίθηκε απαραίτητη η πλήρης μοντελοποίηση όλων των δικτύων σωληνώσεων, καλωδιώσεων και αεραγωγών. Αντίθετα, επιλέχθηκε η σταδιακή προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία τα βασικά στοιχεία εξοπλισμού αποτυπώνονται ως οικογένειες ή ως πληροφοριακές εγγραφές συνδεδεμένες με τους αντίστοιχους χώρους. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο μπορεί να παραμείνει λειτουργικό, χωρίς να επιβαρύνεται με υπερβολική γεωμετρική λεπτομέρεια.

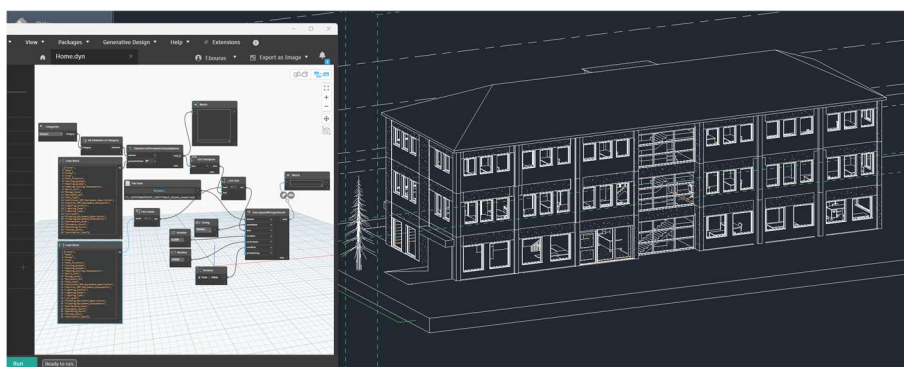
Ενδεικτικά, σε κάθε χώρο καταγράφηκε αν εξυπηρετείται από fan coil unit, split unit, φυσικό ή μηχανικό αερισμό, καθώς και ο τύπος και η ισχύς του φωτισμού. Συγχρόνως, σε τεχνικούς χώρους, όπως λεβητοστάσιο και μηχανοστάσιο, καταχωρίστηκαν στοιχεία για τον κεντρικό εξοπλισμό και τη ζώνη συντήρησης.

3.12 Δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου

Μετά την ανάπτυξη του BIM μοντέλου και την εισαγωγή των βασικών παραμέτρων, το μοντέλο οργανώθηκε ως Ψηφιακό Δίδυμο Στατικού Τύπου. Η μετάβαση από απλό BIM μοντέλο σε Static Digital Twin πραγματοποιήθηκε μέσω της συστηματικής σύνδεσης γεωμετρίας, χώρων, εξοπλισμού και λειτουργικών δεδομένων.

Το προτεινόμενο μοντέλο δεν λαμβάνει δεδομένα πραγματικού χρόνου, αλλά λειτουργεί ως οργανωμένη ψηφιακή αναπαράσταση της εξεταζόμενης εγκατάστασης. Παρέχει τη δυνατότητα αναζήτησης πληροφορίας, εξαγωγής schedules, δημιουργίας μητρώων χώρων και εξοπλισμού, καθώς και υποστήριξης αποφάσεων σχετικών με συντήρηση και ενεργειακή αναβάθμιση.

Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν πίνακες και schedules μέσα από το Revit, καθώς και βοηθητικά αρχεία Excel, ώστε να είναι δυνατή η οργάνωση και ο έλεγχος της πληροφορίας. Η δυνατότητα εξαγωγής αυτών των δεδομένων αποτελεί βασικό στοιχείο της μεθοδολογίας, καθώς επιτρέπει τη μελλοντική σύνδεση του μοντέλου με dashboards, βάσεις δεδομένων ή εργαλεία επιχειρησιακής ανάλυσης.



Σχήμα 3.3 Από το BIM Model στο Static Digital Twin.

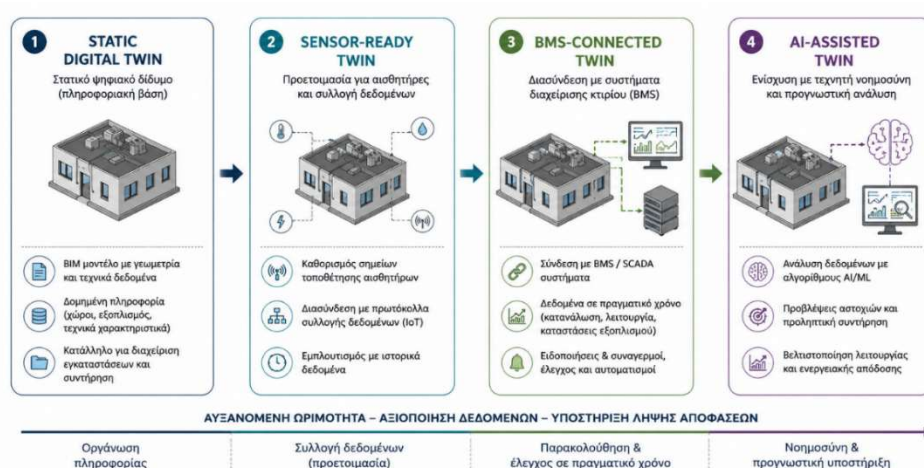
3.13 Διερεύνηση μελλοντικής σύνδεσης με BMS, αισθητήρες και AI

Εξετάζεται επίσης η δυνατότητα μελλοντικής εξέλιξης του στατικού μοντέλου σε περισσότερο δυναμικό περιβάλλον. Για τον σκοπό αυτό αξιολογείται ποια δεδομένα θα

ήταν απαραίτητα για τη σύνδεση του μοντέλου με BMS, αισθητήρες ή συστήματα συλλογής δεδομένων πραγματικού χρόνου.

Ενδεικτικά, τέτοια δεδομένα θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν θερμοκρασία χώρων, σχετική υγρασία, κατάσταση λειτουργίας fan coils, κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, παραγωγή φωτοβολταϊκού συστήματος, ποιότητα αέρα, πληρότητα χώρων και κατάσταση εξοπλισμού. Η συλλογή και οργάνωση αυτών των δεδομένων θα μπορούσε να επιτρέψει την αναβάθμιση του στατικού μοντέλου σε συνδεδεμένο ή real-time Ψηφιακό Δίδυμο.

Σε επόμενο επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τη ραγδαία εξέλιξη των ψηφιακών μοντέλων και της τεχνητής νοημοσύνης, είναι σκόπιμο να διερευνηθεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης εφαρμογών AI σε τέτοια μοντέλα. Η τεχνητή νοημοσύνη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αναζήτηση τεχνικής πληροφορίας, την ανάλυση ιστορικού συντήρησης, την υποστήριξη προγνωστικής συντήρησης, την παραγωγή εισηγήσεων και τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης.



Σχήμα 3.4 Μελλοντική εξέλιξη του μοντέλου.

Πίνακας 3.9 Δεδομένα για μελλοντική real-time σύνδεση.

Δεδομένο	Πηγή
Θερμοκρασία χώρου	Αισθητήρας
Κατανάλωση ενέργειας	Μετρητής
Κατάσταση FCU	BMS
CO ₂ / ποιότητα αέρα	Αισθητήρας
Πληρότητα χώρου	Αισθητήρας παρουσίας
Βλάβες εξοπλισμού	CMMS / manual input

3.14 Αξιολόγηση της μεθοδολογίας

Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας πραγματοποιείται με βάση την πληρότητα του μοντέλου, τη δυνατότητα οργάνωσης της πληροφορίας, τη χρησιμότητα για τη διαχείριση της εγκατάστασης και τη δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης. Εξετάζεται κατά πόσο το μοντέλο μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων για συντήρηση, ενεργειακή αναβάθμιση και διαχείριση χώρων.

Επιπλέον, αξιολογούνται οι περιορισμοί που προέκυψαν κατά την εφαρμογή, όπως η ελλιπής διαθεσιμότητα δεδομένων, η ανάγκη παραδοχών, η απουσία real-time υποδομών και η δυσκολία αντιστοίχισης ορισμένων Η/Μ στοιχείων με συγκεκριμένους χώρους.

Η αξιολόγηση αυτή είναι απαραίτητη ώστε η προτεινόμενη μεθοδολογία να μην περιοριστεί στην ανάπτυξη ενός μεμονωμένου μοντέλου, αλλά να μπορεί να αποτελέσει οδηγό εφαρμογής για αντίστοιχες εγκαταστάσεις του ΑΔΜΗΕ ή άλλων φορέων κρίσιμων υποδομών.

3.15 Στατιστική αξιολόγηση εργασίας

Η στατιστική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά προς την τεχνική ανάπτυξη του μοντέλου, με σκοπό τη διερεύνηση της αντιλαμβανόμενης χρησιμότητας των τεχνολογιών BIM, Static Digital Twin, AI και BMS από επαγγελματίες του τεχνικού κλάδου.

Το ερωτηματολόγιο αναπτύχθηκε μέσω της πλατφόρμας Google Forms και απευθύνθηκε σε μηχανικούς, στελέχη διαχείρισης τεχνικών έργων, επαγγελματίες Facility Management και λοιπούς επαγγελματίες του τεχνικού κλάδου. Η συμμετοχή ήταν εθελοντική και ανώνυμη, διασφαλίζοντας την προστασία των προσωπικών δεδομένων και τη διατύπωση αμερόληπτων απαντήσεων.

Η στατιστική επεξεργασία περιλάμβανε περιγραφική και επαγωγική ανάλυση. Για τις κατηγορικές μεταβλητές υπολογίστηκαν απόλυτες και σχετικές συχνότητες, ενώ για τις βαθμονομούμενες μεταβλητές μέσοι όροι, διάμεσοι, τυπικές αποκλίσεις και ποσοστά θετικών απαντήσεων.

Μέσος Όρος (Mean)

Ο μέσος όρος χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της κεντρικής τάσης των απαντήσεων.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

όπου:

$\bar{x}$ = μέσος όρος

x_i = τιμή κάθε παρατήρησης

n = πλήθος παρατηρήσεων

Τυπική Απόκλιση (Standard Deviation)

Η τυπική απόκλιση εκφράζει τη διασπορά των τιμών γύρω από τον μέσο όρο.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

όπου:

s = τυπική απόκλιση δείγματος

x_i = κάθε παρατήρηση

$\bar{x}$ = μέσος όρος

n = πλήθος παρατηρήσεων

Συντελεστής Αξιοπιστίας Cronbach's Alpha

Για την αξιολόγηση της εσωτερικής συνοχής των επιμέρους θεματικών κλιμάκων υπολογίστηκε ο συντελεστής αξιοπιστίας Cronbach's Alpha. Ο δείκτης Cronbach's Alpha χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της εσωτερικής συνοχής μίας κλίμακας ερωτήσεων.

$$\alpha = \frac{k}{k - 1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_T^2} \right)$$

όπου:

α = Cronbach's Alpha

k = αριθμός ερωτήσεων της κλίμακας

σ_i^2 = διακύμανση κάθε ερώτησης

σ_T^2 = διακύμανση του συνολικού σκορ

Ο δείκτης εφαρμόστηκε αποκλειστικά σε ομάδες ερωτήσεων που μετρούν κοινή εννοιολογική διάσταση, όπως οι δυσκολίες διαχείρισης τεχνικής πληροφορίας και η αντιλαμβανόμενη αξία του BIM και του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου.

Συντελεστής Συσχέτισης Spearman's rho

Για τη διερεύνηση σχέσεων μεταξύ μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός συντελεστής συσχέτισης Spearman's rho, ο οποίος είναι κατάλληλος για διατεταγμένες μεταβλητές και δεν απαιτεί την παραδοχή κανονικής κατανομής. Ο συντελεστής Spearman χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση μονοτονικών σχέσεων μεταξύ δύο μεταβλητών.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

όπου:

ρ = συντελεστής συσχέτισης Spearman

d_i = διαφορά μεταξύ των βαθμολογικών κατατάξεων των δύο μεταβλητών

n = πλήθος παρατηρήσεων

Στατιστική Σημαντικότητα (p-value)

Για τον έλεγχο των ερευνητικών υποθέσεων χρησιμοποιήθηκε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας:

$$\alpha = 0.05$$

ή ισοδύναμα:

$$p < 0.05$$

όπου:

- p = p-value του στατιστικού ελέγχου
- α = προκαθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας

Τέλος, οι ανοικτές ερωτήσεις αναλύθηκαν μέσω θεματικής ανάλυσης (Thematic Analysis), με στόχο την αναγνώριση επαναλαμβανόμενων θεμάτων, αντιλήψεων και προτάσεων των συμμετεχόντων.

3.15.1 Ερμηνεία του συντελεστή Spearman

Για τη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών του ερωτηματολογίου χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός συντελεστής συσχέτισης **Spearman (ρ)**, ο οποίος είναι κατάλληλος για δεδομένα που προέρχονται από διατακτικές κλίμακες, όπως οι κλίμακες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Ο συντελεστής **ρ (rho)** λαμβάνει τιμές από **-1 έως +1**. Θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι όσο αυξάνεται η μία μεταβλητή, τείνει να αυξάνεται και η άλλη (θετική συσχέτιση), ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν αντίθετη σχέση. Τιμές κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν ασθενή ή ανύπαρκτη συσχέτιση. 47

Για την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας χρησιμοποιήθηκε η τιμή **p-value**. Όταν $p < 0,05$, η συσχέτιση θεωρείται στατιστικά σημαντική, γεγονός που σημαίνει ότι είναι πολύ μικρή η πιθανότητα το παρατηρούμενο αποτέλεσμα να οφείλεται σε τυχαία διακύμανση των δεδομένων. Αντίθετα, όταν $p \geq 0,05$, δεν προκύπτουν επαρκή στατιστικά στοιχεία ώστε να θεωρηθεί ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών.

Στην παρούσα εργασία, η ένταση της συσχέτισης ερμηνεύθηκε ενδεικτικά ως εξής:

- $|\rho| < 0,30$: ασθενής συσχέτιση
- $0,30 \leq |\rho| < 0,50$: μέτρια συσχέτιση
- $|\rho| \geq 0,50$: ισχυρή συσχέτιση

Αξιολόγηση εφαρμογής BIM και Στατικού Ψηφιακού Διδύμου στη διαχείριση κτιριακών εγκαταστάσεων κρίσιμων υποδομών

Ενημερωτικό Σημείωμα Συμμετέχοντα

Αγαπητέ/ή συμμετέχοντα/ουσα,

Το παρόν ερωτηματολόγιο πραγματοποιείται στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας με τίτλο:

«Πιλοτική Εφαρμογή Τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM) και Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) σε Υφιστάμενη Κτιριακή Εγκατάσταση Κρίσιμης Ενεργειακής Υποδομής για τη Δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου»

η οποία εκπονείται στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου (ΕΑΠ).

Σκοπός του ερωτηματολογίου είναι η διερεύνηση του βαθμού γνώσης, εξοικείωσης και αποδοχής των τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM) και Digital Twin στον τεχνικό κλάδο, καθώς και η αποτύπωση των αντιλήψεων σχετικά με την εφαρμογή τους στη διαχείριση και λειτουργία υφιστάμενων κτιριακών υποδομών.

Η συμπλήρωση του ερωτηματολογίου είναι απόλυτως ανώνυμη και τα δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά για ερευνητικούς και ακαδημαϊκούς σκοπούς, σύμφωνα με τις αρχές προστασίας προσωπικών δεδομένων.

Ο απαιτούμενος χρόνος συμπλήρωσης δεν ξεπερνά τα 10 λεπτά.

Η συμμετοχή σας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιτυχία της έρευνας και σας ευχαριστώ θερμά για τον χρόνο και τη συμβολή σας.

1. Επιλέξτε την ιδιότητα που σας εκφράζει περισσότερο *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

- ☐ Φοιτητής, -τρια
- ☐ Πολιτικός Μηχανικός
- ☐ Αρχιτέκτονας Μηχανικός
- ☐ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
- ☐ Μηχανολόγος Μηχανικός
- ☐ Τοπογράφος Μηχανικός
- ☐ Project Manager
- ☐ Facility Manager
- ☐ Εργαζόμενος,-η στον κλάδο ενέργειας
- ☐ Εργαζόμενος,-η σε δημόσιο φορέα
- ☐ Άλλο:

2. Έτη εμπειρίας *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

- ☐ 0-2
- ☐ 2-5
- ☐ 5-10
- ☐ 10-15
- ☐ 15+

Building Information Model (BIM) & Digital Twin (Ψηφιακό Δίδυμο)

Building Information Model (BIM)

Το Building Information Modeling (BIM) αποτελεί μεθοδολογία ψηφιακής μοντελοποίησης και διαχείρισης πληροφοριών ενός κτιρίου ή τεχνικού έργου. Μέσω ενός ενιαίου ψηφιακού μοντέλου οργανώνονται γεωμετρικά, τεχνικά και λειτουργικά δεδομένα, υποστηρίζοντας τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων σε όλο τον κύκλο ζωής τους.

Digital Twin (Ψηφιακό Δίδυμο)

Το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) αποτελεί ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος ή εγκατάστασης, η οποία μπορεί να συνδέεται με πραγματικά λειτουργικά δεδομένα. Χρησιμοποιείται για παρακολούθηση, ανάλυση, διαχείριση και υποστήριξη λήψης αποφάσεων, ενώ δύναται να εξελχθεί σε δυναμικό σύστημα real-time μέσω αισθητήρων, BMS και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης.

3. Γνωρίζετε τις τεχνολογίες BIM; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

1 2 3 4 5
Δε γ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Έχω πλήρη εξοκίωση

4. Έχετε συμμετάσχει σε έργο BIM *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

- ☐ Ναι
- ☐ Όχι

5. Περιγράψτε συνοπτικά πως έχετε αξιοποιήσει λογισμικό BIM

6. Γνωρίζετε τις τεχνολογίες Digital Twin; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

1 2 3 4 5
Δε γ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Έχω πλήρη εξοκίωση

7. Έχετε συμμετάσχει σε έργο όπου χρησιμοποιήθηκε Digital Twin; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

- ☐ Ναι
- ☐ Όχι

8. Περιγράψτε συνοπτικά πως έχετε αξιοποιήσει λογισμικό Digital Twin

9. Έχετε εμπειρία σε συντήρηση εγκαταστάσεων / facility management; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

- ☐ Ναι
- ☐ Όχι

10. Έχετε εμπειρία σε κτιριακές εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών (ενέργεια, τηλεπικοινωνίες, μεταφορές, ύδρευση, δημόσια ασφάλεια κ.λπ.); *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

- ☐ Ναι
- ☐ Όχι

Στην παρακάτω βαθμονομημένη ερώτηση η αρίθμηση ακολουθεί την εξής λογική:
1: Μη αξιοποίηση, 2: Χαμηλή, 3: Μέτρια, 4: Αρκετά καλή, 5: Πλήρης

11. Ποια η ποιότητα τεχνικών δεδομένων που αξιοποιείται, κατά μέσω όρο; *

(π.χ. σχέδια κτιρίων, κατόψεις, μητρώα εξοπλισμού, εγχειρίδια λειτουργίας, πιστοποιητικά πυρασφάλειας, στοιχεία συντήρησης, τεχνικές εκθέσεις, αρχεία παρεμβάσεων και ανακαινίσεων)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

Στις παρακάτω βαθμονομημένες ερωτήσεις η αρίθμηση ακολουθεί την εξής λογική:
1: Καθόλου, 2: Λίγο, 3: Μέτρια, 4: Αρκετά, 5: Πολύ

12. Η έλλειψη επικαιροποιημένων τεχνικών δεδομένων πόσο δυσκολεύει την εργασία σας; *

(π.χ. ενημερωμένα σχέδια και κατόψεις, στοιχεία εξοπλισμού, εγχειρίδια λειτουργίας, ιστορικό συντηρήσεων, τεχνικές εκθέσεις και αρχεία προηγούμενων παρεμβάσεων, ρυθμίσεις αυθαιρεσιών κ.λπ.)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

13. Θεωρείτε ότι η αναζήτηση τεχνικής πληροφορίας απαιτεί σημαντικό χρόνο από την εργασία σας; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

17. Ποιο θεωρείτε το σημαντικότερο στάδιο για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου Digital Twin; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ BIM Model (τριδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του κτιρίου και των εγκαταστάσεων)
☐ Τεχνικά δεδομένα (σχέδια, εγχειρίδια, μελέτη πυρασφάλειας, άδειες λειτουργίας, πολεοδομικές άδειες, τεχνικές εκθέσεις και ιστορικό συντήρησης)
☐ Μητρώο Ακινήτου / Asset Registry (καταγραφή των χώρων, του εξοπλισμού και των παγίων στοιχείων της εγκατάστασης)
☐ Αισθητήρες / IoT (αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο)
☐ Τεχνητή Νοημοσύνη

Στις παρακάτω βαθμονομημένες ερωτήσεις η αρίθμηση ακολουθεί την εξής λογική:
1: Καθόλου, 2: Λίγο, 3: Μέτρια, 4: Αρκετά, 5: Πολύ

18. Η δημιουργία και οργάνωση των χώρων (Rooms) ως φορέων πληροφορίας για κάθε δωμάτιο ή λειτουργική ενότητα μιας εγκατάστασης θεωρείτε ότι είναι χρήσιμη για τη διαχείριση της εγκατάστασης (Facility Managment); *

(π.χ. κάθε χώρος να διαθέτει συγκεντρωμένες πληροφορίες για τη χρήση του, τον εξοπλισμό που περιέχει, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του και το ιστορικό συντήρησης που τον αφορά)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

14. Η σύνδεση των χώρων, του εξοπλισμού και του ιστορικού συντήρησης δεν είναι πάντα σαφής *

(π.χ. δεν είναι εύκολο να γνωρίζουμε ποιος εξοπλισμός βρίσκεται σε κάθε χώρο, τότε συντηρήθηκε τελευταία φορά ή ποια προβλήματα έχουν παρουσιαστεί στο παρελθόν)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

15. Θεωρείτε ότι ένα BIM μοντέλο μπορεί να βοηθήσει στην οργάνωση τεχνικών δεδομένων; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

16. Η ύπαρξη και χρήση ενός Ψηφιακού Διδύμου με χειροκίνητη ενημέρωση αρχείων (Static Digital Twin) θεωρείτε ότι μπορεί να υποστηρίξει τη διαχείριση εγκαταστάσεων ακόμη και χωρίς real-time δεδομένα; *

(π.χ. μέσω συγκεντρωμένων και επικαιροποιημένων πληροφοριών για χώρους, εξοπλισμό, σχέδια, τεχνικά έγγραφα και ιστορικό συντήρησης, χωρίς συνεχή λήψη δεδομένων από αισθητήρες)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ Δεν μπορεί να υποστηρίξει
☐ Μάλλον όχι
☐ Μάλλον ναι
☐ Μπορεί να υποστηρίξει

19. Η παραμετροποίηση χώρων και εξοπλισμού πόσο πιστεύετε ότι μπορεί να βελτιώσει τη διαδικασία συντήρησης; *

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

12345

☐
☐
☐
☐
☐

20. Η εξαγωγή πινάκων / μητρώων από το μοντέλο δίνοντας συγκεντρωμένη την επιλεγμένη πληροφορία μπορεί να συνδράμει στις εργασίες συντήρησης ή αναβάθμισης κτιριακής εγκατάστασης; *

(π.χ. λίστα εξοπλισμού, χώροι που χρειάζονται συντήρηση, στοιχεία εγκαταστάσεων, ιστορικό εργασιών και τεχνικές πληροφορίες σε μία ενιαία αναφορά)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ Καθόλου
☐ Σε ελάχιστες περιπτώσεις
☐ Σε αρκετές περιπτώσεις
☐ Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων

21. Η σταδιακή ανάπτυξη ενός Ψηφιακού Διδύμου με περιοδική χειροκίνητη ενημέρωση των πληροφοριών (Static Digital Twin) θεωρείτε ότι αποτελεί μια ρεαλιστική προσέγγιση για υφιστάμενες εγκαταστάσεις; *

(π.χ. αρχική καταγραφή χώρων, εξοπλισμού και τεχνικών δεδομένων, με σταδιακή εμπλοκή του μοντέλου χωρίς απαραίτητα χρήση αισθητήρων ή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ Συμφωνώ
☐ Διαφωνώ
☐ Δεν γνωρίζω

22. Η μελλοντική σύνδεση του ψηφιακού μοντέλου με συστήματα αυτοματισμού κτιρίων (BMS) και αισθητήρες θεωρείτε ότι θα αύξανε την αξία και τη χρησιμότητά του;
(π.χ. μέσω αυτόματης παρακολούθησης κατανάλωσης ενέργειας, θερμοκρασιών, βλαβών, λειτουργίας εξοπλισμού και κατάστασης των εγκαταστάσεων σε πραγματικό χρόνο)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ Συμφωνώ
☐ Διαφωνώ
☐ Δε γνωρίζω

23. Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιηθεί μελλοντικά για προγνωστική συντήρηση (δηλαδή για την πρόβλεψη πιθανών βλαβών και τον έγκαιρο προγραμματισμό εργασιών συντήρησης πριν εμφανιστεί πρόβλημα στον εξοπλισμό ή στις εγκαταστάσεις)

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ Συμφωνώ
☐ Διαφωνώ
☐ Δε γνωρίζω

24. Η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών πέραν κρίσιμων ενεργειακών υποδομών του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της Ελλάδας.

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

☐ Συμφωνώ
☐ Διαφωνώ
☐ Δε γνωρίζω

25. Πόσο πιθανό θεωρείτε να εφαρμοστεί BIM ή Digital Twin στον οργανισμό σας μέσα στην επόμενη πενταετία;

Na επισημαίνεται μόνο μία έλλειψη.

1 2 3 4 5

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

26. Ποιο θεωρείτε το σημαντικότερο όφελος μιας τέτοιας εφαρμογής; (Με τον όρο «όφελος» εννοούμε τη μεγαλύτερη θετική επίδραση που θα μπορούσε να έχει στη λειτουργία, συντήρηση, διαχείριση ή λήψη αποφάσεων για μια κτιριακή εγκατάσταση.)

27. Ποια θεωρείτε τη μεγαλύτερη δυσκολία εφαρμογής;

28. Τι θα προτείνατε να προστεθεί σε ένα τέτοιο μοντέλο;

Στις παρακάτω βαθμονομημένες ερωτήσεις η αρίθμηση ακολουθεί την εξής λογική: 1: Μηνιαία Πιθανότητα, 2: Μικρή Πιθανότητα, 3: Μέτρια Πιθανότητα, 4: Αρκετά Πιθανό, 5: Σίγουρο

Σχήμα 3.5 Δομή ερωτηματολογίου.

3.16 Ερευνητικές Υποθέσεις και Στατιστική Διερεύνηση

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, το εννοιολογικό πλαίσιο της έρευνας και τα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας εργασίας, διατυπώθηκαν οι ακόλουθες ερευνητικές υποθέσεις:

H1: Η γνώση BIM σχετίζεται θετικά με την αντιλαμβανόμενη συμβολή του BIM στην οργάνωση και διαχείριση τεχνικών δεδομένων.

H2: Η γνώση BIM σχετίζεται θετικά με την αντιλαμβανόμενη χρησιμότητα των Rooms για εφαρμογές Facility Management.

H3: Η γνώση BIM σχετίζεται θετικά με την αξιολόγηση της παραμετροποίησης χώρων και εξοπλισμού σε ένα ψηφιακό μοντέλο.

H4: Η γνώση Digital Twin σχετίζεται θετικά με την αντιλαμβανόμενη αξία ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου.

H5: Η γνώση Digital Twin σχετίζεται θετικά με την αποδοχή εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης για προγνωστική συντήρηση.

H6: Η γνώση Digital Twin σχετίζεται θετικά με την αποδοχή διασύνδεσης Ψηφιακών Διδύμων με συστήματα BMS και αισθητήρες.

50

H7: Η γνώση Digital Twin σχετίζεται θετικά με την εκτιμώμενη πιθανότητα εφαρμογής τεχνολογιών BIM και Digital Twin στους οργανισμούς των συμμετεχόντων.

H8: Η εμπειρία σε διαδικασίες Facility Management σχετίζεται θετικά με την αντιλαμβανόμενη χρησιμότητα των Rooms και της δομημένης πληροφορίας χώρων.

H9: Η εμπειρία σε κρίσιμες υποδομές σχετίζεται θετικά με την αποδοχή επέκτασης της προτεινόμενης προσέγγισης σε άλλες κατηγορίες κρίσιμων εγκαταστάσεων.

Οι παραπάνω υποθέσεις ελέγχθηκαν μέσω ανάλυσης συσχετίσεων Spearman και αξιολογήθηκαν ως προς τη στατιστική τους σημαντικότητα στο επίπεδο $p < 0.05$.

4 Αποτελέσματα

4.1 Αποτέλεσμα ανάπτυξης του BIM μοντέλου

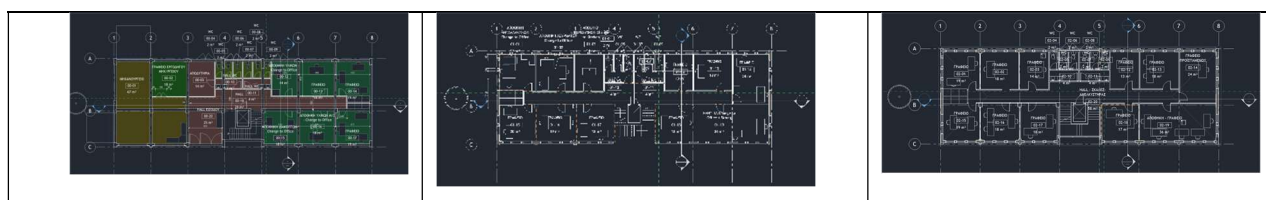
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε πιλοτικό BIM μοντέλο κτιριακής εγκατάστασης του ΑΔΜΗΕ, με σκοπό να αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου. Το μοντέλο δημιουργήθηκε με βάση τα διαθέσιμα πολεοδομικά και τεχνικά σχέδια, τα στοιχεία της ενεργειακής μελέτης, καθώς και τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά τη διερεύνηση της υφιστάμενης κατάστασης.

Το τελικό BIM μοντέλο περιλαμβάνει τη βασική γεωμετρική αποτύπωση του κτιρίου, τον φέροντα οργανισμό, τις τοιχοποιίες, τα ανοίγματα, τα κουφώματα, τη στέγη, τους βασικούς χώρους και την οργάνωση των επιμέρους ορόφων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη δημιουργία ενός μοντέλου που δεν λειτουργεί μόνο ως τρισδιάστατη αναπαράσταση, αλλά ως πληροφοριακή βάση για τη διαχείριση της εγκατάστασης.

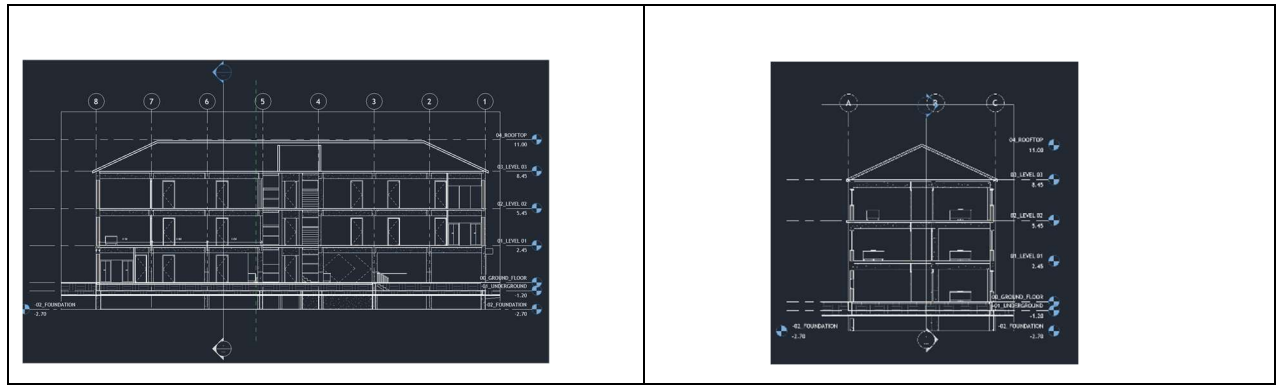
Η διαχείριση της πιλοτικής εφαρμογής οργανώθηκε σύμφωνα με τις βασικές αρχές της μεθοδολογίας PM² της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία παρέχει ένα δομημένο πλαίσιο σχεδιασμού, διαχείρισης κινδύνων, διαχείρισης ενδιαφερομένων μερών και παρακολούθησης έργων (PM² Alliance, 2023).



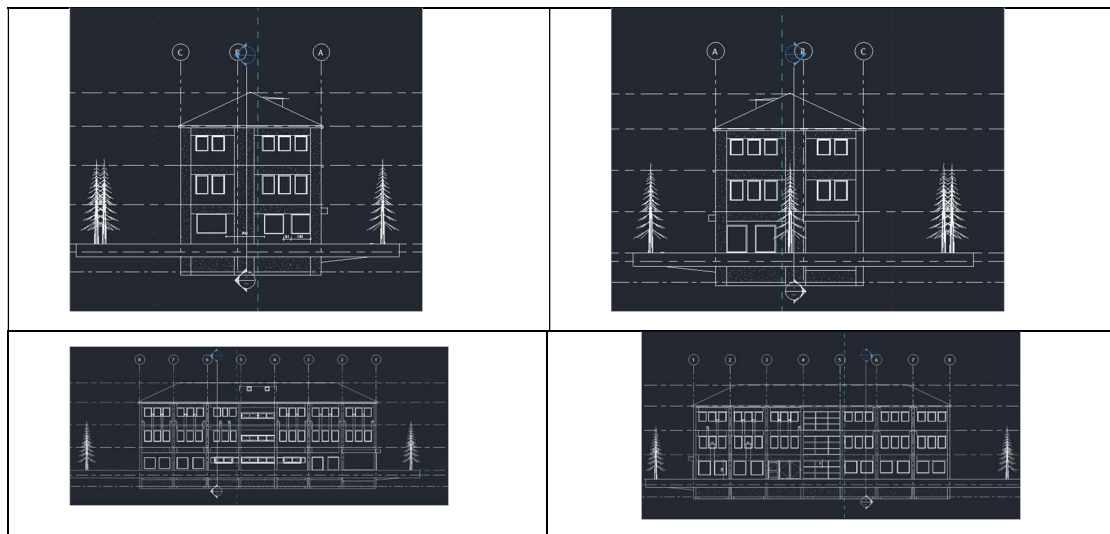
Σχήμα 4.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση του τελικού BIM μοντέλου.



Σχήμα 4.2 Κάτοψη ισογείου / ορόφου από το BIM μοντέλο.



Σχήμα 4.3 Τομή του μοντέλου με εμφάνιση φέροντος οργανισμού (άνευ οπλισμών), τοιχοποιιών και στέγης.



Σχήμα 4.4 Όψεις του μοντέλου.

4.2 Αποτελέσματα οργάνωσης χώρων μέσω Rooms

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν Rooms για τους επιμέρους χώρους του κτιρίου. Κάθε Room αντιστοιχήθηκε σε συγκεκριμένη χρήση και όροφο, ώστε να είναι δυνατή η συστηματική οργάνωση της χωρικής πληροφορίας. Η διαδικασία αυτή αποτέλεσε βασικό στάδιο για τη μετάβαση από το BIM μοντέλο σε Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο.

Για κάθε χώρο καταχωρίστηκαν βασικές πληροφορίες όπως όνομα, αριθμός χώρου, χρήση, όροφος, επιφάνεια, λειτουργική κατηγορία και θερμική ζώνη. Επιπλέον, δημιουργήθηκε η δυνατότητα συσχέτισης κάθε χώρου με τα αντίστοιχα δεδομένα Η/Μ εξοπλισμού, φωτισμού, αερισμού, θέρμανσης, ψύξης και συντήρησης.

Πίνακας 4.1 Συνοπτική ενδεικτική παρουσίαση Rooms ανά όροφο.

Όροφος	Είδος χώρων	Παραδείγματα χρήσεων	Παρατηρήσεις
Υπόγειο	Τεχνικοί / Βοηθητικοί χώροι	Λεβητοστάσιο, μηχανοστάσιο, αποθήκες	Κρίσιμοι χώροι για Η/Μ πληροφορία
Ισόγειο	Μικτές χρήσεις	Γραφεία, Μηχανουργείο, WC, αποδυτήρια	Υψηλή λειτουργική διαφοροποίηση
Α' όροφος	Γραφειακοί / Βοηθητικοί χώροι	Γραφεία, Κυλικείο, WC, διάδρομοι	Βασική ζώνη διοικητικής λειτουργίας
Β' όροφος	Γραφειακοί χώροι	Γραφεία, WC, διάδρομοι	Σημαντική ζώνη χρήσης γραφείων

Σχήμα 4.5 Room Schedule από το Revit.

4.3 Αποτελέσματα παραμετροποίησης χώρων

Μετά τη δημιουργία των Rooms, πραγματοποιήθηκε παραμετροποίηση των χώρων με στόχο την ενσωμάτωση λειτουργικών και τεχνικών δεδομένων. Οι παράμετροι οργανώθηκαν σε ομάδες που αφορούν την ταυτότητα του χώρου, τη χρήση, τον φωτισμό, τη θέρμανση, την ψύξη, τον αερισμό, τη θερμική ζώνη, την ενεργειακή ζώνη και τη ζώνη συντήρησης.

Η παραμετροποίηση αυτή επέτρεψε τη δημιουργία πινάκων και schedules, μέσω των οποίων είναι δυνατή η αναζήτηση και ταξινόμηση πληροφορίας ανά χώρο, ανά όροφο ή ανά σύστημα. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο μπορεί να υποστηρίξει πρακτικές ανάγκες διαχείρισης εγκατάστασης και διαδικασιών συντήρησης.

Πίνακας 4.2 Παράδειγμα παραμέτρων χώρου, Αναλυτικός Πίνακας στο Αντίστοιχο Παράρτημα.

Level	Name	Num.	Cooling Syst.	Heating Syst.	Ventilation Type	Maintenance Zone	Plumbing_Equipment_Consumption [m3/d]	Occupancy_Count
00_GROUND_FLOOR	ΜΗΧ/ΡΓΕΙΟ	00-01	FCU	FCU	Mechanical	Restricted	0.05-0.15	1
00_GROUND_FLOOR	ΓΡΑΦΕΙΟ ΕΡΓΟΔ. ΜΗΧ/ΡΓΕΙΟ	00-02	FCU	FCU	Natural	Gen. Area	0	1
00_GROUND_FLOOR	ΑΠΟΔ.	00-03	FCU	FCU	Natural	Gen. Area	0.10-0.30	2-4
00_GROUND_FLOOR	WC	00-04	Near by Syst.	Near by Syst.	Mechan.	Gen. Area	0.05-0.15	1

Upper Limit	00_GROUND_FLOOR
Limit Offset	3.0480
Base Offset	0.0000
Text	
Addition_MEP_Equipment_Consumption	2.4 kW
Additional_MEP_Equipment_Description	Industrial LED Lighting + Workshop Equipm...
Critical_Equipment	1
Envelope_Type	
Heating_Cooling_Consumption	Central Boiler System
Plumbing_Equipment_Consumption	Utility Sink + Floor Drain
Plumbing_Equipment_Description	0.05 0.15 m³/day
Dimensions	
Identity Data	
Number	00_01
Name	ΜΗΧΑΝΟΥΡΕΙΟ
Image	
Comments	Ισόγειο μηχανουργείο. Υφιστάμενος αερισ...
Occupancy	Technical
Department	MEP
Base_Finish	
Ceiling_Finish	
Wall_Finish	
Floor_Finish	
Cooling_System	FCU
Energy_Zone	Technical
Equipment_ID	Workshop equipment
FCU_Count	-
Heating_System	FCU
HVAC_Type	Mechanical
Lighting_Control	Manual
Lighting_Power	10-12 W/m²
Lighting_Type	LED Industrial
Lux_Level	750
Maintenance_Zone	Restricted
Occupancy_Count	1
Occupant	1
Operating_Hours	08:00 - 16:00
Room_Function	Technical

Σχήμα 4.6 Παράθυρο ιδιοτήτων Room με συμπληρωμένες παραμέτρους.

4.4 Αποτελέσματα ενσωμάτωσης H/M πληροφορίας

Στο επόμενο στάδιο έγινε η συσχέτιση των χώρων με τον υφιστάμενο και προτεινόμενο H/M εξοπλισμό. Τα δεδομένα οργανώθηκαν με βάση τις βασικές κατηγορίες συστημάτων, δηλαδή θέρμανση, ψύξη, φωτισμός, αερισμός, ZNX και λοιπός ηλεκτρικός εξοπλισμός.

Για τις ανάγκες του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου, δεν κρίθηκε απαραίτητη η πλήρης τρισδιάστατη μοντελοποίηση όλων των δικτύων. Αντίθετα, δόθηκε έμφαση στη δημιουργία ενός πληροφοριακού μητρώου εξοπλισμού, το οποίο συνδέεται με τους αντίστοιχους χώρους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς διαχείρισης, ελέγχου και συντήρησης.

Πίνακας 4.3 Συνοπτικό μητρώο H/M εξοπλισμού.

Κατηγορία εξοπλισμού	Συσχέτιση με χώρο	Χρήση στο Static Digital Twin
FCU	Γραφεία / χώροι χρήσης	Θέρμανση / ψύξη / συντήρηση
Split units	Επιμέρους χώροι	Δευτερεύον σύστημα θέρμανσης-ψύξης

Φωτιστικά	Ανά Room	Υπολογισμός ισχύος και αντικατάστασης
Λέβητας	Λεβητοστάσιο	Κεντρικός εξοπλισμός θέρμανσης
Κυκλοφορητές	Μηχανοστάσιο / λεβητοστάσιο	Βοηθητικός εξοπλισμός
Αερισμός	Ανά χρήση χώρου	Υφιστάμενη / μελλοντική κατάσταση

4.5 Αποτελέσματα δημιουργίας Στατικού Ψηφιακού Διδύμου

Με βάση τα παραπάνω, το τελικό αποτέλεσμα δεν αποτελεί απλώς ένα γεωμετρικό μοντέλο, αλλά μία οργανωμένη ψηφιακή αναπαράσταση της εγκατάστασης, στην οποία συνδυάζονται χώροι, δομικά στοιχεία, Η/Μ εξοπλισμός και λειτουργικές πληροφορίες.

Το προτεινόμενο μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα αναζήτησης πληροφοριών ανά χώρο, ανά εξοπλισμό, ανά όροφο και ανά σύστημα. Επιπλέον, επιτρέπει την εξαγωγή δεδομένων σε μορφή schedules ή Excel, ώστε να υποστηρίζεται περαιτέρω ανάλυση και διαχείριση της πληροφορίας.

Πίνακας 4.4 Λειτουργίες που υποστηρίζει το Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο.

Λειτουργία	Υλοποίηση στο μοντέλο	Χρήση
Αναζήτηση χώρων	Rooms / schedules	Διαχείριση χώρων
Μητρώο εξοπλισμού	Equipment parameters	Συντήρηση
Ενεργειακή πληροφορία	energy zones / lighting power	Ενεργειακή αξιολόγηση
Ζώνες συντήρησης	maintenance parameters	Υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης
Εξαγωγή δεδομένων	Excel / schedules	Ανάλυση και reporting

4.6 Αξιολόγηση πληρότητας του μοντέλου

Η πληρότητα του μοντέλου αξιολογήθηκε ως προς τέσσερις βασικές διαστάσεις: γεωμετρική αποτύπωση, χωρική οργάνωση, Η/Μ πληροφορία και δυνατότητα υποστήριξης συντήρησης. Η αξιολόγηση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς ο σκοπός της

εργασίας δεν είναι μόνο η δημιουργία ενός μοντέλου Revit, αλλά η αποτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησής του ως εργαλείου διαχείρισης εγκατάστασης.

Πίνακας 4.5 Αξιολόγηση πληρότητας μοντέλου.

Πεδίο αξιολόγησης	Επίπεδο υλοποίησης	Παρατήρηση
Γεωμετρία κτιρίου	Υψηλό	Αποτύπωση βασικού κελύφους και ορόφων
Rooms	Υψηλό	Οργάνωση χώρων ανά χρήση και όροφο
Η/Μ εξοπλισμός	Μεσαίο	Πληροφοριακή αποτύπωση, όχι πλήρης δικτύωση
Ενεργειακή πληροφορία	Μεσαίο / υψηλό	Αξιοποίηση στοιχείων ενεργειακής μελέτης
Συντήρηση	Μεσαίο	Δυνατότητα μελλοντικού εμπλουτισμού
Real-time σύνδεση	Χαμηλό	Προτείνεται ως μελλοντική επέκταση
Τεχνητή Νοημοσύνη	Διερευνητικό	Χρειάζεται πρόσθετα δεδομένα

4.7 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων και δεικτών αξιολόγησης

Τα συνολικά αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα. Οι δείκτες δεν εκφράζουν αριθμητική ακρίβεια προσομοίωσης, όπως σε μία υπολογιστική προσομοίωση φυσικού φαινομένου, αλλά αποτυπώνουν την πληρότητα και τη χρησιμότητα του μοντέλου ως εργαλείου ψηφιακής διαχείρισης εγκατάστασης.

Πίνακας 4.6 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Κριτήριο	Αποτέλεσμα	Αξιολόγηση
Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Κτιριακών Πληροφοριών	Ολοκληρώθηκε βασικό μοντέλο	Επιτυχής
Δημιουργία Δωματίων - Rooms	Οργανώθηκαν οι χώροι ανά όροφο	Επιτυχής

Εισαγωγή Παραμέτρων / πληροφοριών στους χώρους	Δημιουργήθηκαν λειτουργικά και Η/Μ πεδία	Επιτυχής
Συσχέτιση χώρων με εξοπλισμό	Οργανώθηκε σε επίπεδο πληροφοριακών δεδομένων / παραμέτρων / ιδιοτήτων	Μερικώς επιτυχής
Δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου	Ολοκληρώθηκε πληροφοριακή δομή	Επιτυχής
Δυνατότητα Ψηφιακού Δεδομένου με εισαγωγή και ανανέωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	Δεν υλοποιήθηκε	Μελλοντική επέκταση
Δυνατότητα αξιοποίησης Τεχνητής Νοημοσύνης	Διερευνήθηκε θεωρητικά	Μελλοντική επέκταση

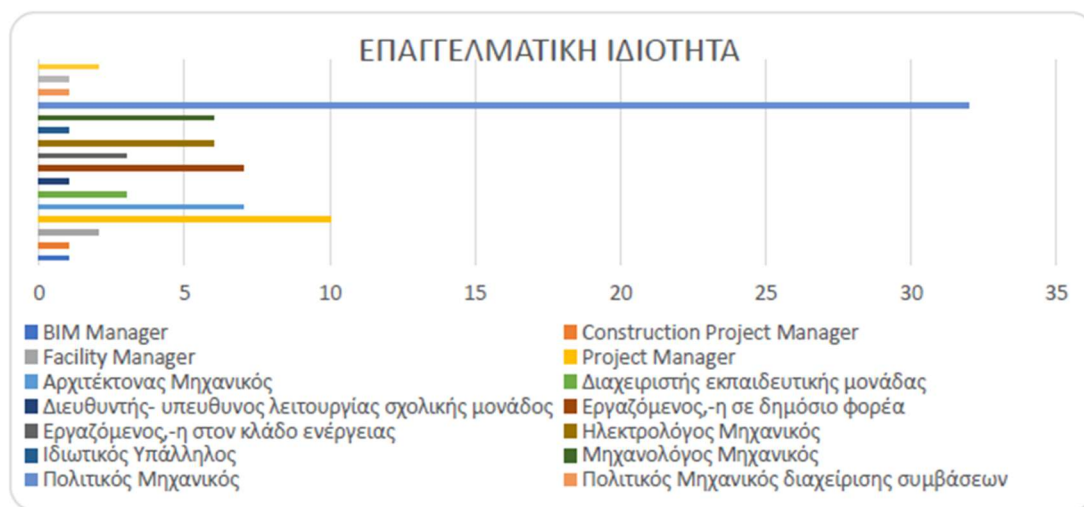
4.8 Στατιστική Αξιολόγηση Ερευνητικού Ερωτηματολογίου

Το ερωτηματολόγιο δημοσιοποιήθηκε για χρονική περίοδο μίας εβδομάδας και συγκεντρώθηκαν απαντήσεις από 84 συμμετέχοντες. Τα αποτελέσματα των απαντήσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.8.1 Περιγραφή δείγματος

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν την Επαγγελματική Ιδιότητα, έτη εμπειρίας, εμπειρία σε BIM, Digital Twin, Διαχείριση Εγκαταστάσεων και κρίσιμων υποδομών, των ερωτηθέντων.

4.8.1.1 Επαγγελματική Ιδιότητα

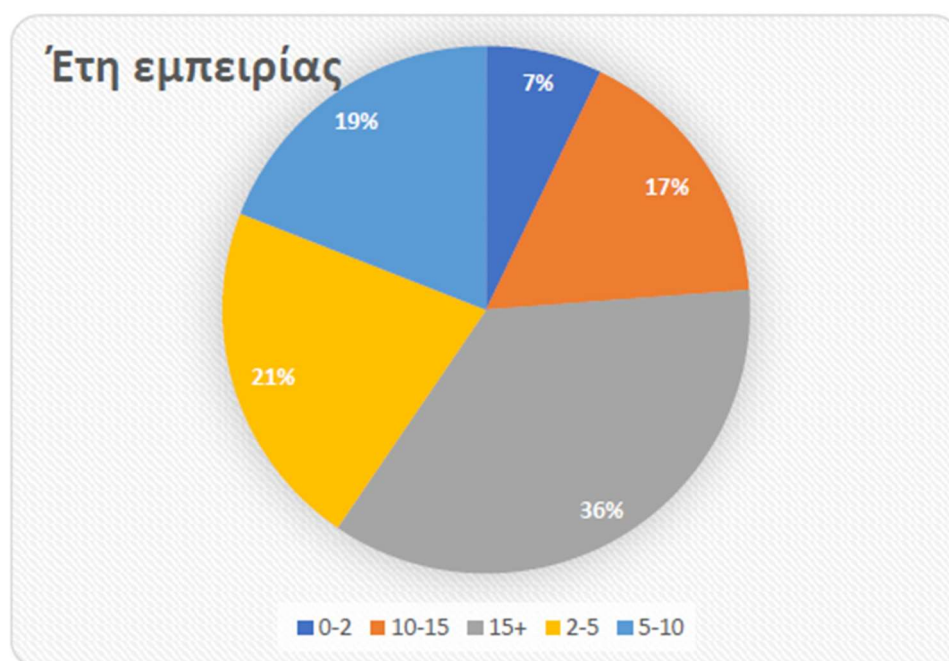


Σχήμα 4.7 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 1 του Ερωτηματολογίου.

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα Επαγγελματικής Ιδιότητας

Ιδιότητα	Πλήθος	Ποσοστό (%)
Πολιτικός Μηχανικός	29	36,3%
Project Manager	9	11,3%
Αρχιτέκτονας Μηχανικός	7	8,8%
Εργαζόμενος σε δημόσιο φορέα	7	8,8%
Μηχανολόγος Μηχανικός	6	7,5%
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός	6	7,5%
Λοιπές κατηγορίες	16	20,0%

4.8.1.2 Έτη επαγγελματικής εμπειρίας



Σχήμα 4.8 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 2 του Ερωτηματολογίου.

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα Ετών Εμπειρίας

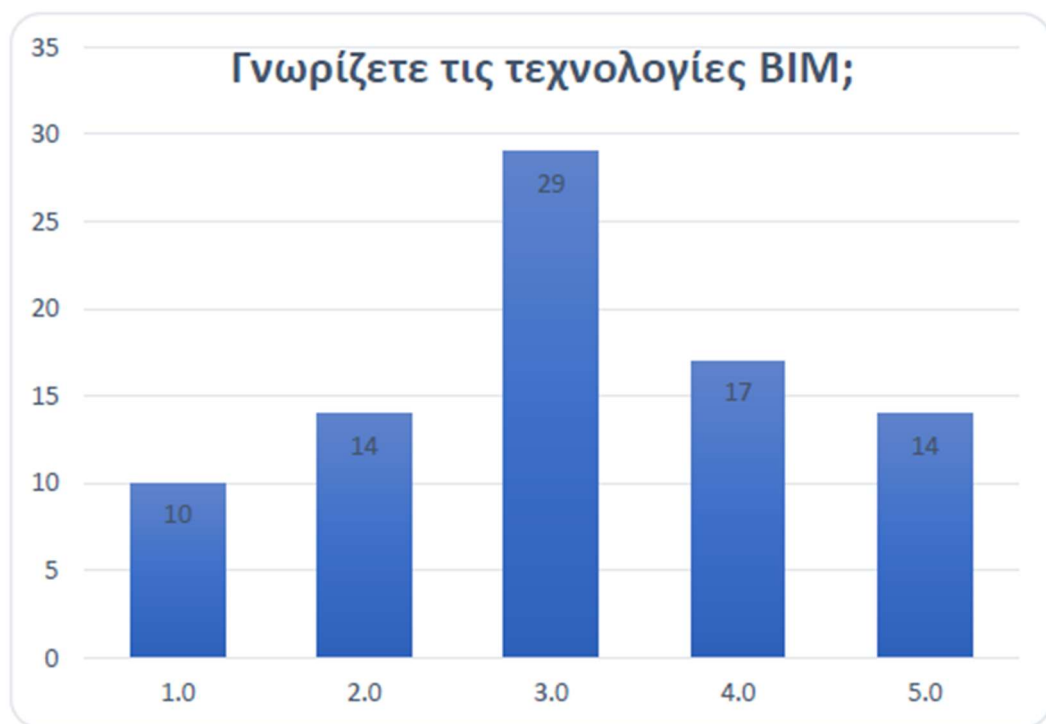
Έτη εμπειρίας	Πλήθος	Ποσοστό (%)
0-2	6	7,5%
2-5	17	21,3%
5-10	16	20,0%
10-15	14	17,5%
15+	27	33,8%

Το ερωτηματολόγιο συμπληρώθηκε από 84 συμμετέχοντες. Η πλειονότητα των συμμετεχόντων προέρχεται από τον τεχνικό κλάδο, με τους Πολιτικούς Μηχανικούς

να αποτελούν τη μεγαλύτερη κατηγορία του δείγματος (38,1%), ενώ σημαντική παρουσία καταγράφηκε από στελέχη Project Management, Αρχιτέκτονες, Ηλεκτρολόγους και Μηχανολόγους Μηχανικούς. Επιπλέον, στο δείγμα συμμετείχαν εργαζόμενοι σε δημόσιους φορείς, επαγγελματίες Facility Management και στελέχη του ενεργειακού τομέα.

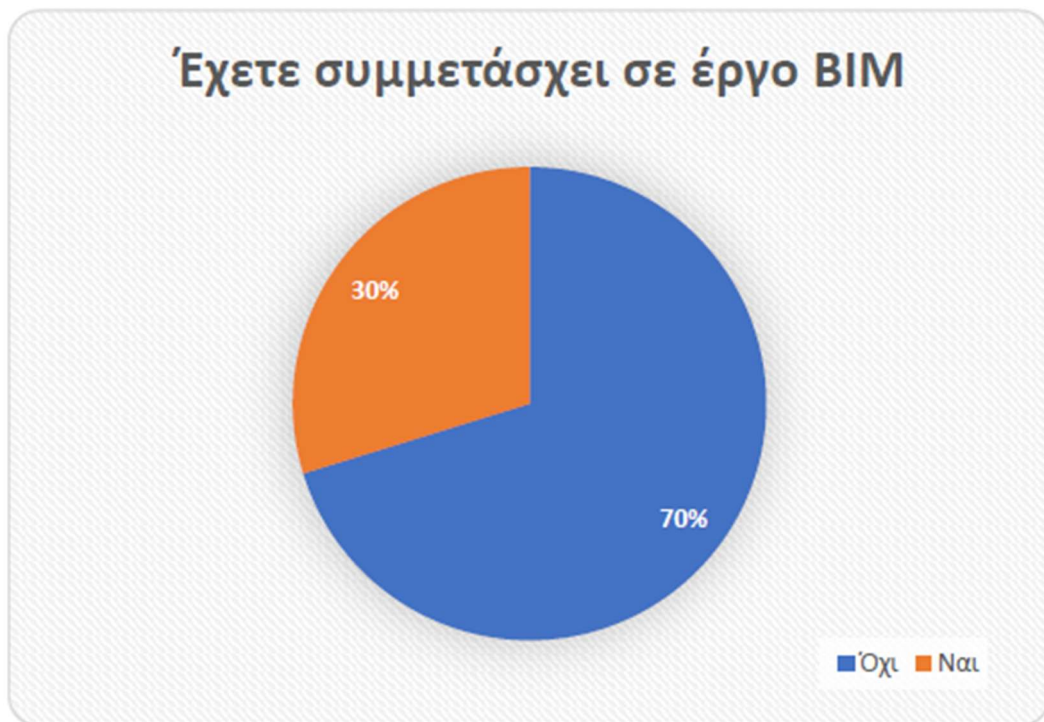
Ως προς την επαγγελματική εμπειρία, το 52,4% των συμμετεχόντων διαθέτει περισσότερα από δέκα έτη επαγγελματικής δραστηριότητας, ενώ μόλις το 7,1% βρίσκεται στα πρώτα δύο έτη της επαγγελματικής του πορείας. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι απαντήσεις προέρχονται σε σημαντικό βαθμό από έμπειρους επαγγελματίες με ουσιαστική γνώση των απαιτήσεων διαχείρισης τεχνικών έργων και εγκαταστάσεων.

4.8.1.3 Εξοικείωση με BIM



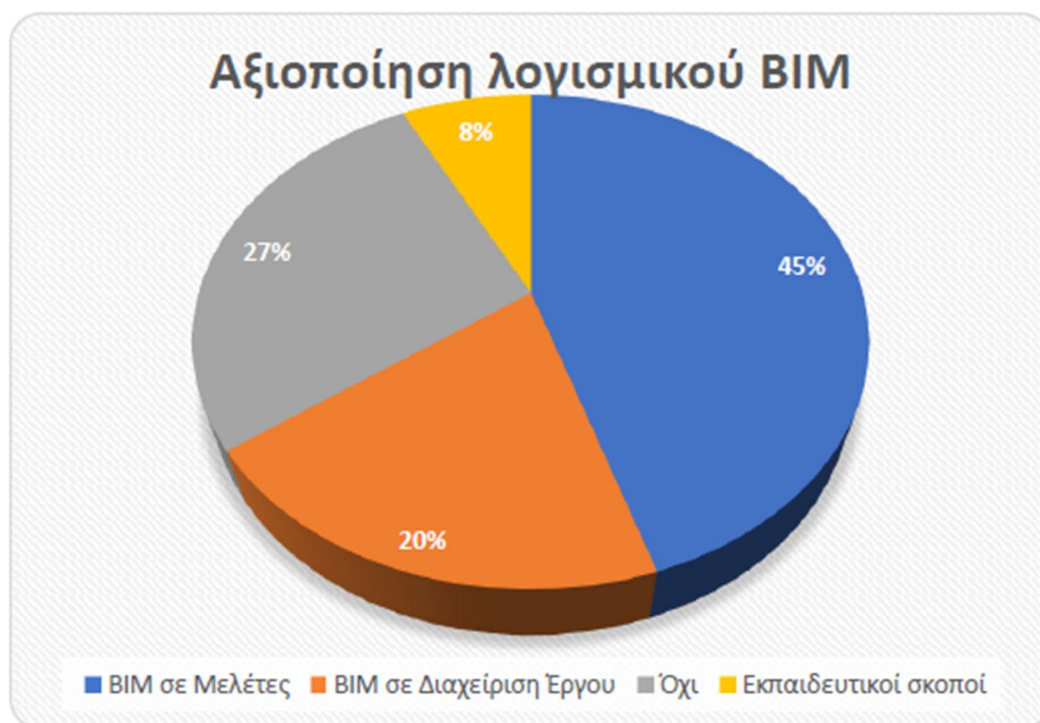
Σχήμα 4.9 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 3 του Ερωτηματολογίου.

Από υπολογισμό μέσου όρου στη σχετική απάντηση προκύπτει ότι το δείγμα των ερωτηθέντων παρουσιάζει μέτρια προς αρκετά καλή εξοικείωση με τις τεχνολογίες BIM, με μέσο όρο απαντήσεων 3,15.



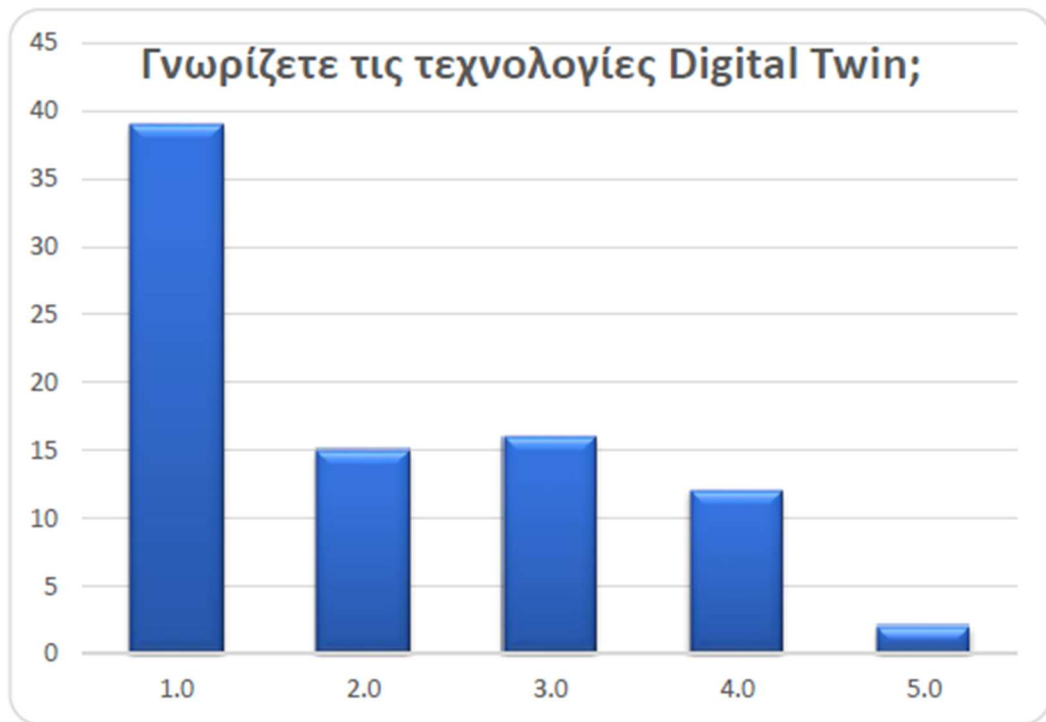
Σχήμα 4.10 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 4 του Ερωτηματολογίου.

Στην ερώτηση συμμετοχής σε έργο BIM, το 29,8% των ερωτηθέντων (25 από τους 84) δήλωσε ότι διαθέτει πρακτική εμπειρία, γεγονός που υποδηλώνει ότι περίπου τρεις στους δέκα συμμετέχοντες έχουν έρθει σε άμεση επαφή με έργα BIM.



Σχήμα 4.11 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 5 του Ερωτηματολογίου.

4.8.1.4 Εξοικείωση με Digital Twin



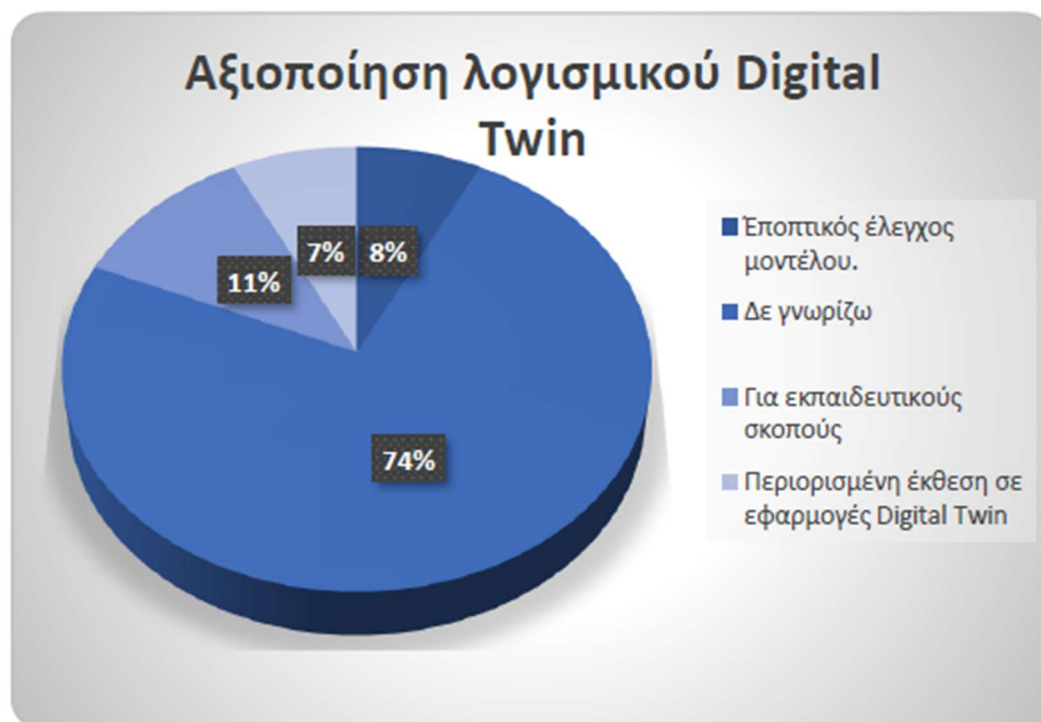
Σχήμα 4.12 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 6 του Ερωτηματολογίου.

Από υπολογισμό μέσου όρου στη σχετική απάντηση προκύπτει ότι το δείγμα των ερωτηθέντων παρουσιάζει σημαντικά χαμηλή εξοικείωση με τις τεχνολογίες Digital Twin, με μέσο όρο απαντήσεων 2,08.



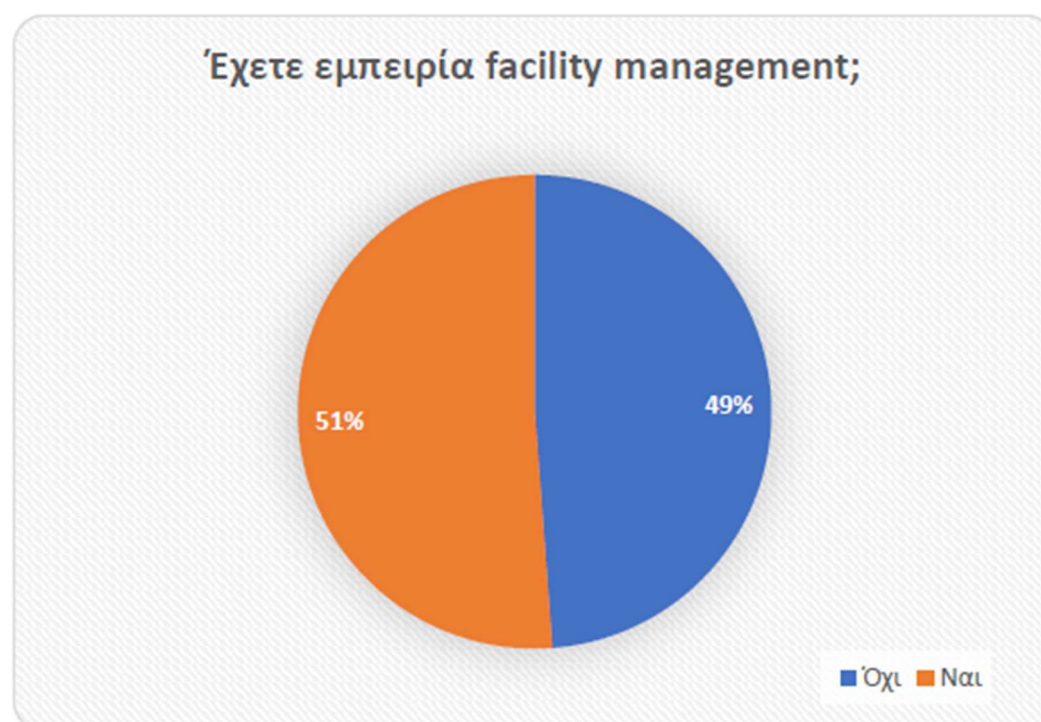
Σχήμα 4.13 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 7 του Ερωτηματολογίου.

Στην ερώτηση συμμετοχής των ερωτηθέντων σε έργο που χρησιμοποιήθηκε Digital Twin, μόλις το 4,8%, ουσιαστικά σχεδόν μηδενική έμπρακτη εμπειρία σε Digital Twin.



Σχήμα 4.14 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 8 του Ερωτηματολογίου.

4.8.1.5 Εξοικείωση με Διαχείριση Κτιριακών Υποδομών



Σχήμα 4.15 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 9 του Ερωτηματολογίου.

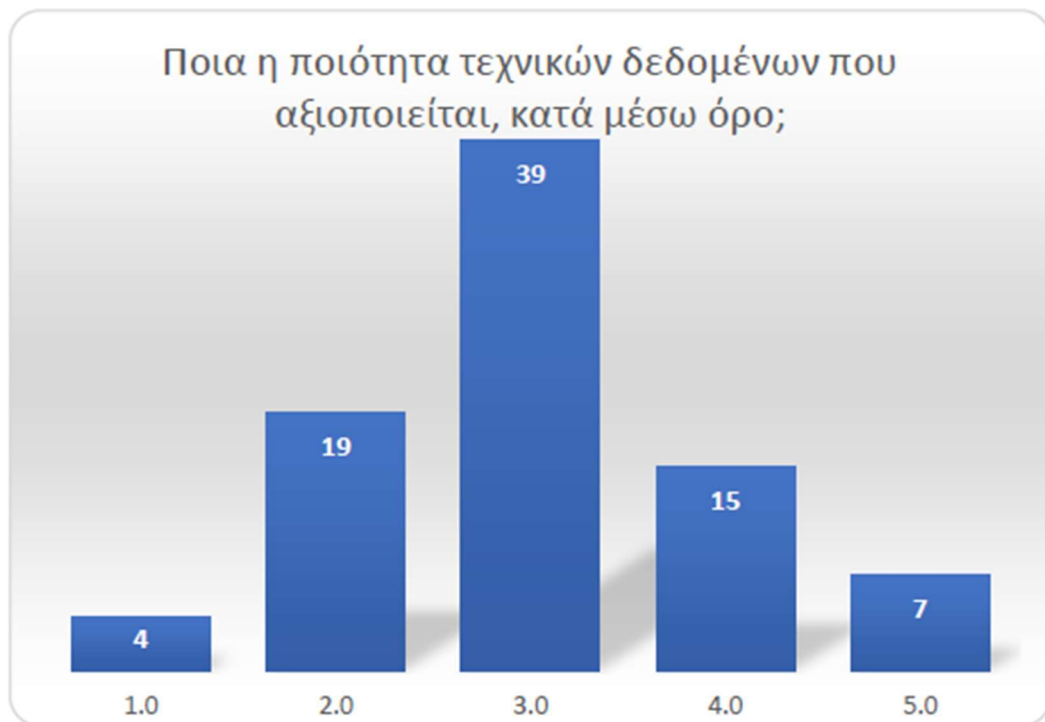
Οι απαντήσεις παρουσιάζουν σχεδόν ισομερή κατανομή μεταξύ των δύο κατηγοριών, με μικρή υπεροχή των συμμετεχόντων που διαθέτουν εμπειρία στη συντήρηση εγκαταστάσεων (51,2%).



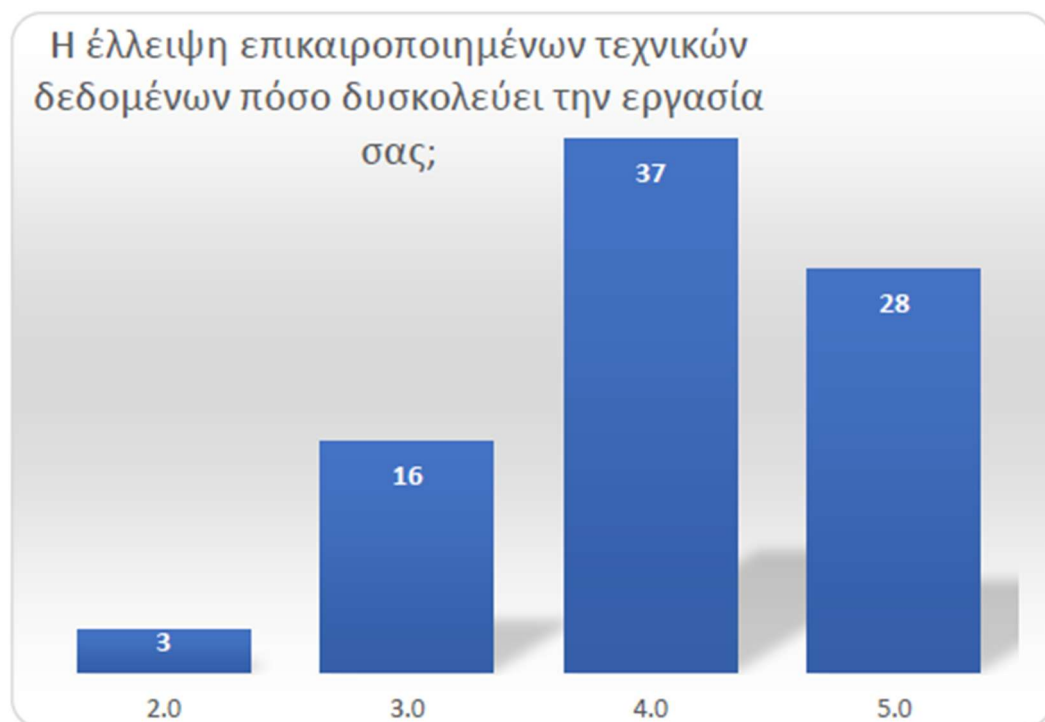
Σχήμα 4.16 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 10 του Ερωτηματολογίου.

Παράλληλα, το 70,2% των συμμετεχόντων δήλωσε ότι διαθέτει εμπειρία σε κτιριακές εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών, ενώ το 29,8% δεν διαθέτει σχετική εμπειρία. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι συμμετέχοντες διαθέτουν μέτριο επίπεδο εξοικείωσης με τις τεχνολογίες Building Information Modeling (M.O. = 3,13/5), ενώ η αντίστοιχη εξοικείωση με τις τεχνολογίες Digital Twin εμφανίζεται αισθητά χαμηλότερη (M.O. = 2,08/5). Επιπλέον, το 29,8% των συμμετεχόντων δήλωσε ότι έχει συμμετάσχει σε έργο BIM, ενώ μόλις το 4,8% σε έργο στο οποίο εφαρμόστηκε τεχνολογία Digital Twin.

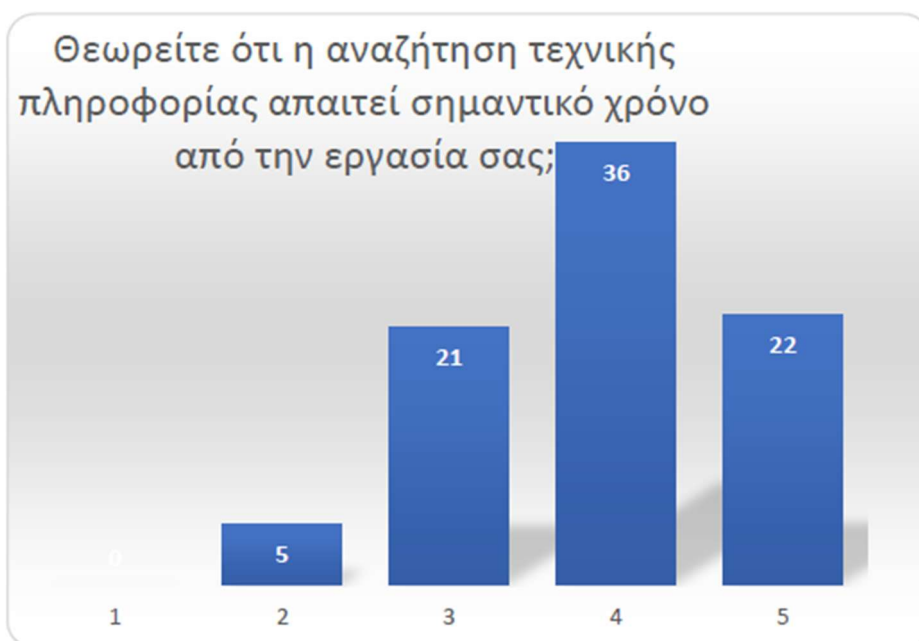
4.8.2 Δεδομένη κατάσταση τεχνικής πληροφορίας



Σχήμα 4.17 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 11 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.18 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 12 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.19 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 13 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.20 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 14 του Ερωτηματολογίου.

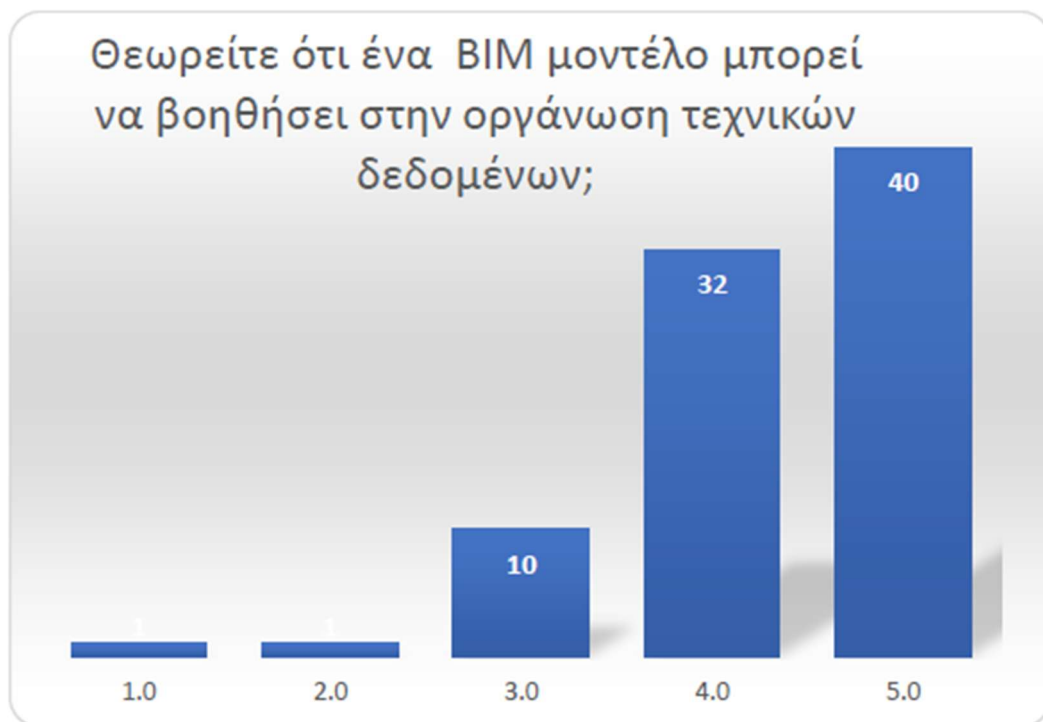
Πίνακας 4.9 Αξιολόγηση υφιστάμενης κατάστασης τεχνικών δεδομένων

Ερώτηση	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
Ποιότητα τεχνικών δεδομένων	3,04	0,97
Έλλειψη επικαιροποιημένων δεδομένων	4,09	0,83
Χρόνος αναζήτησης τεχνικής πληροφορίας	3,89	0,87
Σύνδεση χώρων – εξοπλισμού – συντήρησης	3,59	0,81

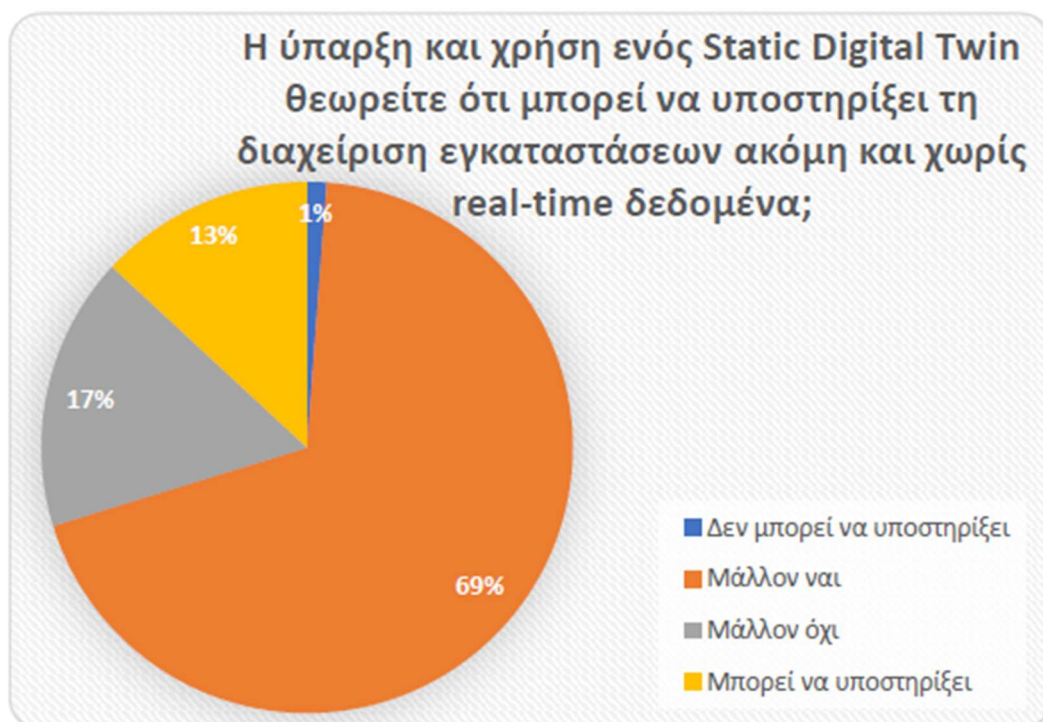
Τα αποτελέσματα της ενότητας αυτής αναδεικνύουν σημαντικές προκλήσεις στη διαχείριση τεχνικών πληροφοριών υφιστάμενων εγκαταστάσεων. Η ποιότητα των διαθέσιμων τεχνικών δεδομένων αξιολογήθηκε ως μέτρια (Μ.Ο.=3,02), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι οργανισμοί διαθέτουν τεχνική πληροφορία, η οποία όμως δεν χαρακτηρίζεται πάντοτε από επαρκή πληρότητα και επικαιρότητα.

Παράλληλα, η έλλειψη επικαιροποιημένων δεδομένων αξιολογήθηκε ως η σημαντικότερη δυσκολία (Μ.Ο.=4,07), ενώ η αναζήτηση τεχνικής πληροφορίας εξακολουθεί να απαιτεί σημαντικό χρόνο από τους επαγγελματίες του κλάδου (Μ.Ο.=3,89). Επιπλέον, η σύνδεση των χώρων, του εξοπλισμού και του ιστορικού συντήρησης αξιολογήθηκε ως μη επαρκώς οργανωμένη (Μ.Ο.=3,56), γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης κεντριοποιημένων συστημάτων διαχείρισης τεχνικής πληροφορίας, όπως τα BIM-based Static Digital Twins.

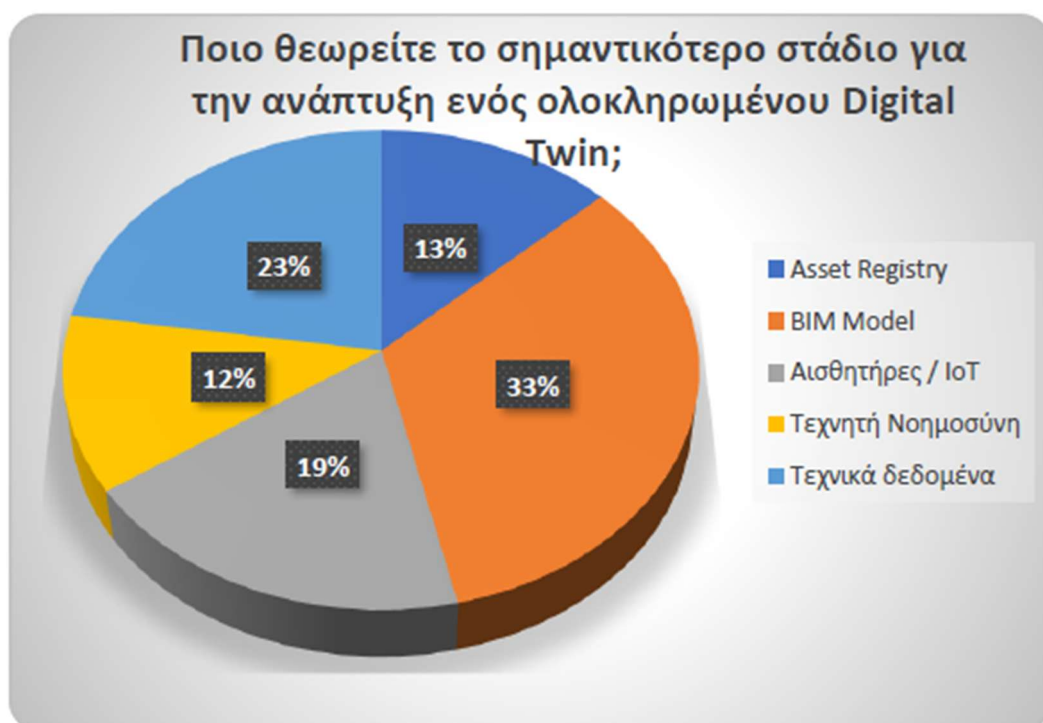
4.8.3 Αντιλαμβανόμενη αξία BIM και Static Digital Twin



Σχήμα 4.21 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 15 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.22 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 16 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.23 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 17 του Ερωτηματολογίου.



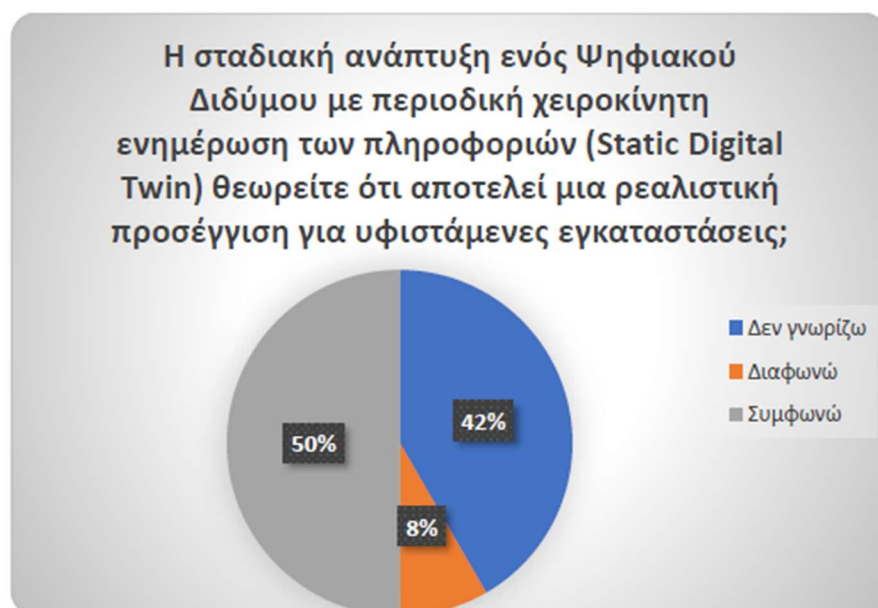
Σχήμα 4.24 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 18 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.25 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 19 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.26 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 20 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.27 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 21 του Ερωτηματολογίου.

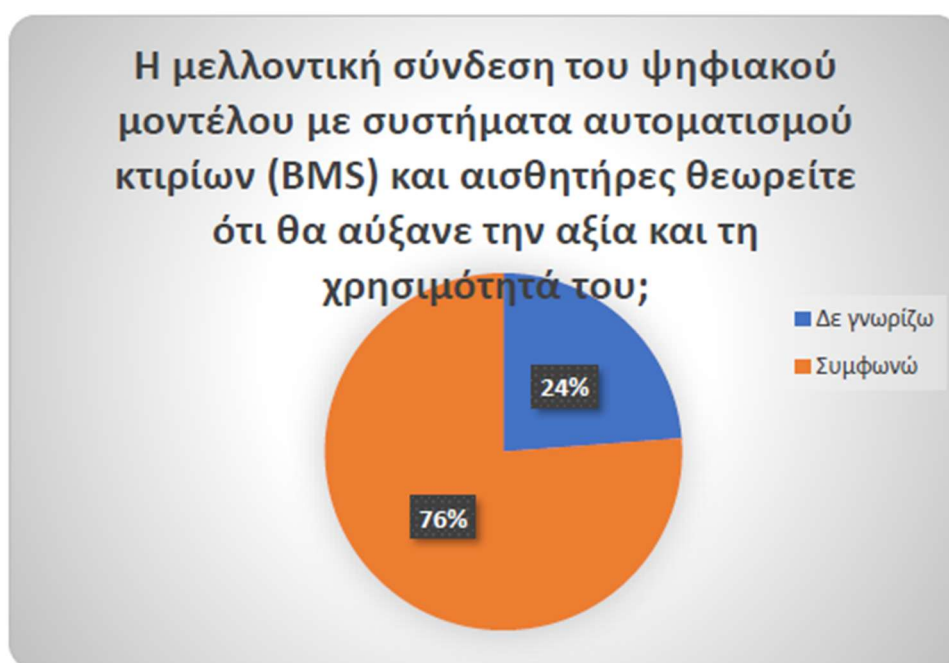
Πίνακας 4.10 Αξιολόγηση χρησιμότητας BIM και Static Digital Twin

Ερώτηση	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
BIM για οργάνωση τεχνικών δεδομένων	4,30	0,82
Χρησιμότητα Rooms για Facility Management	3,94	0,84
Παραμετροποίηση χώρων και εξοπλισμού	4,07	0,77

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν υψηλό βαθμό αποδοχής των βασικών αρχών της προτεινόμενης προσέγγισης. Οι συμμετέχοντες αξιολόγησαν ιδιαίτερα θετικά τη δυνατότητα αξιοποίησης BIM για την οργάνωση τεχνικών δεδομένων (Μ.Ο.=4,30), καθώς και τη δυνατότητα εξαγωγής πινάκων και μητρώων από το μοντέλο (σε ποσοστό 98%). Υψηλές αξιολογήσεις έλαβαν επίσης η παραμετροποίηση χώρων και εξοπλισμού (Μ.Ο.=4,07) και η χρήση των Rooms ως φορέων πληροφορίας για Facility Management (Μ.Ο.=3,94).

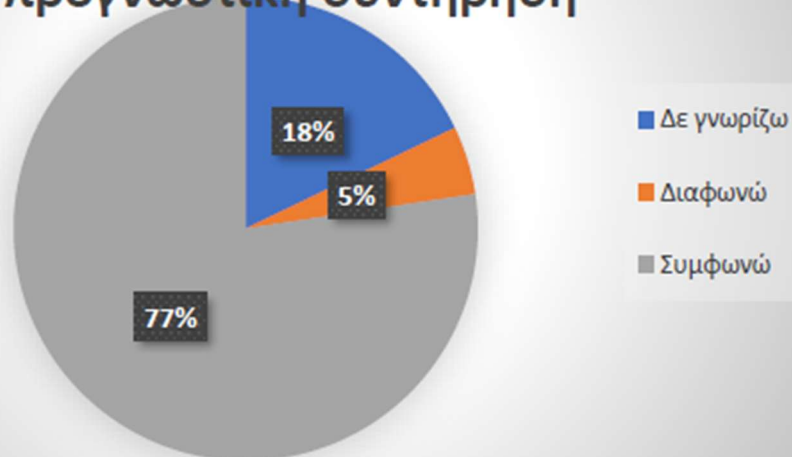
Η κλίμακα παρουσίασε ικανοποιητική εσωτερική συνοχή (Cronbach's $\alpha = 0,755$), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι επιμέρους ερωτήσεις μετρούν με συνέπεια την ίδια υποκείμενη έννοια, δηλαδή την αντιλαμβανόμενη αξία του Building Information Modeling (BIM) και του Στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Static Digital Twin) στη διαχείριση εγκαταστάσεων.

4.8.4 Μελλοντική εξέλιξη: BMS, αισθητήρες, AI και επέκταση εφαρμογής



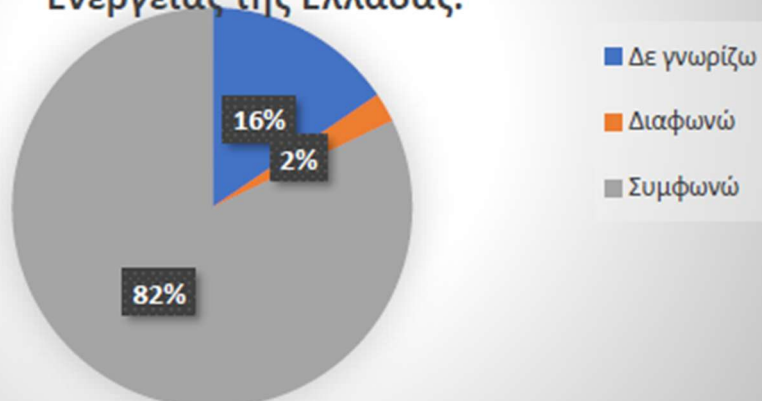
Σχήμα 4.28 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 22 του Ερωτηματολογίου.

Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιηθεί μελλοντικά για προγνωστική συντήρηση

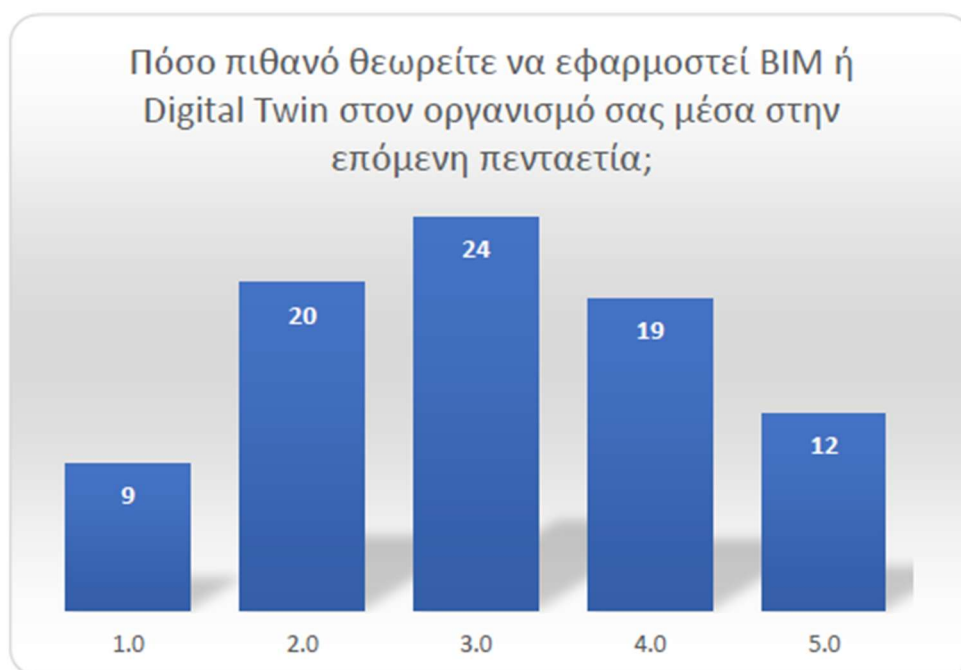


Σχήμα 4.29 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 23 του Ερωτηματολογίου.

Η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών πέραν κρίσιμων ενεργειακών υποδομών του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της Ελλάδας.



Σχήμα 4.30 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 24 του Ερωτηματολογίου.



Σχήμα 4.31 Γράφημα απαντήσεων Ερωτήματος 25 του Ερωτηματολογίου.

Πίνακας 4.11 Αξιολόγηση ανάπτυξης Static Digital Twin και προοπτικών αξιοποίησης BMS, αισθητήρων και Τεχνητής Νοημοσύνης

Ερώτηση	Συμφωνώ	Δεν γνωρίζω	Διαφωνώ
Σταδιακή ανάπτυξη Static Digital Twin	50,0%	41,7%	8,3%
Σύνδεση με BMS και αισθητήρες	76,2%	23,8%	0,0%
AI για υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης	77,4%	17,8%	4,8%
Επέκταση σε άλλες κρίσιμες υποδομές	82,1%	15,5%	2,4%

Τα αποτελέσματα της ενότητας καταδεικνύουν ιδιαίτερα θετική στάση των συμμετεχόντων απέναντι στις προοπτικές μελλοντικής εξέλιξης ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου. Η σύνδεση του μοντέλου με συστήματα διαχείρισης κτιρίων (Building Management Systems – BMS) και αισθητήρες αξιολογήθηκε θετικά από το 76,2% των συμμετεχόντων, ενώ αντίστοιχα υψηλό ποσοστό (77,4%) καταγράφηκε και για την αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης στην υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης.

Παράλληλα, το 82,1% των συμμετεχόντων θεωρεί ότι η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες κατηγορίες κρίσιμων υποδομών πέραν των ενεργειακών εγκαταστάσεων. Ωστόσο, η πιθανότητα εφαρμογής τεχνολογιών BIM ή Digital Twin στον οργανισμό των συμμετεχόντων κατά την επόμενη πενταετία αξιολογήθηκε ως μέτρια (Μ.Ο.=3,06), γεγονός που υποδηλώνει ότι εξακολουθούν να

υφίστανται οργανωτικά, οικονομικά και τεχνολογικά εμπόδια για την ευρύτερη υιοθέτηση των συγκεκριμένων τεχνολογιών.

4.8.5 Ανοικτού τύπου ερωτήσεις

4.8.5.1 Σημαντικότερο Όφελος της εφαρμογής

Η ανάλυση των ανοικτών απαντήσεων ανέδειξε ως κυρίαρχο αντιλαμβανόμενο όφελος τη συγκέντρωση, οργάνωση και άμεση πρόσβαση στην τεχνική πληροφορία μέσω ενός ενιαίου ψηφιακού περιβάλλοντος. Οι συμμετέχοντες αναφέρθηκαν συχνά στη μείωση του χρόνου αναζήτησης δεδομένων, στη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας τεχνικών στοιχείων και στη δυνατότητα υποστήριξης των διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης. Παράλληλα, αρκετές απαντήσεις επισήμαναν τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων, τη μείωση λειτουργικών σφαλμάτων και τη δυνατότητα δημιουργίας μιας αξιόπιστης ψηφιακής βάσης γνώσης για την εγκατάσταση.

4.8.5.2 Μεγαλύτερη δυσκολία της εφαρμογής

Ως σημαντικότερες προκλήσεις αναδείχθηκαν η συλλογή και επικαιροποίηση των απαραίτητων δεδομένων, το κόστος ανάπτυξης και συντήρησης του συστήματος, καθώς και η ανάγκη εξειδικευμένης τεχνογνωσίας. Πολλοί συμμετέχοντες αναφέρθηκαν επίσης σε οργανωτικά ζητήματα, όπως η αντίσταση στην αλλαγή, η δυσκολία υιοθέτησης νέων ψηφιακών διαδικασιών και η ανάγκη εκπαίδευσης του προσωπικού. Επιπλέον, επισημάνθηκαν δυσκολίες που σχετίζονται με τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων και την εξασφάλιση συνεχούς ενημέρωσης των δεδομένων.

4.8.5.3 Πρόσθετες λειτουργίες ή δυνατότητες

Οι συμμετέχοντες πρότειναν την περαιτέρω ενσωμάτωση συστημάτων αυτοματισμού, αισθητήρων και τεχνολογιών Internet of Things (IoT), με στόχο την εξέλιξη του μοντέλου σε δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εκφράστηκε για εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης με χρήση τεχνητής νοημοσύνης, για δυνατότητες παρακολούθησης εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο, καθώς και για τη διασύνδεση με συστήματα διαχείρισης συντήρησης (CMMS), BMS και ενεργειακής παρακολούθησης. Επιπλέον, αρκετοί συμμετέχοντες αναφέρθηκαν στην ανάγκη ανάπτυξης εύχρηστων εργαλείων αναζήτησης και αυτοματοποιημένης παραγωγής αναφορών και δεικτών απόδοσης.

4.8.6 Έλεγχος αξιοπιστίας ερευνητικών κλιμάκων

Πίνακας 4.12 Αποτελέσματα ελέγχου αξιοπιστίας

Κλίμακα	Ερωτήσεις	Cronbach α
Δυσκολίες διαχείρισης τεχνικής πληροφορίας	E12–E14	0,605
Αξία BIM & Static Digital Twin	E15–E21	0,755

Η κλίμακα δυσκολιών διαχείρισης τεχνικής πληροφορίας παρουσίασε οριακά αποδεκτή εσωτερική συνοχή (Cronbach's $\alpha=0,605$), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι σχετικές ερωτήσεις αποτυπώνουν συγγενείς αλλά όχι πλήρως ταυτόσημες διαστάσεις του προβλήματος.

Οι ερωτήσεις που αφορούν τις μελλοντικές δυνατότητες αξιοποίησης BMS, αισθητήρων και τεχνητής νοημοσύνης εξετάστηκαν περιγραφικά και δεν αντιμετωπίστηκαν ως ενιαία ψυχομετρική κλίμακα, καθώς αξιολογούν διαφορετικές διαστάσεις της μελλοντικής εξέλιξης των Ψηφιακών Διδύμων.

Πίνακας 4.13 Αποτελέσματα συσχετίσεων Spearman

Συσχέτιση	Spearman's ρ	p-value	Ερμηνεία
Γνώση BIM – Συμβολή BIM στην οργάνωση τεχνικών δεδομένων	0,339	0,0016	Μέτρια θετική, στατιστικά σημαντική
Γνώση BIM – Χρησιμότητα Rooms για Facility Management	0,215	0,049	Ασθενής θετική, στατιστικά σημαντική
Γνώση BIM – Παραμετροποίηση χώρων και εξοπλισμού	0,299	0,0058	Μέτρια θετική, στατιστικά σημαντική
Γνώση Digital Twin – Αξία Static Digital Twin	0,147	0,181	Ασθενής θετική, μη στατιστικά σημαντική
Γνώση Digital Twin – AI για προγνωστική συντήρηση	0,235	0,031	Ασθενής θετική, στατιστικά σημαντική

Γνώση Digital Twin – Σύνδεση με BMS και αισθητήρες	0,298	0,0059	Ασθενής προς μέτρια θετική, στατιστικά σημαντική
---	-------	--------	---

Πέραν του ελέγχου αξιοπιστίας, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ βασικών μεταβλητών του ερωτηματολογίου μέσω του μη παραμετρικού συντελεστή συσχέτισης Spearman (ρ). Ο συντελεστής Spearman χρησιμοποιήθηκε λόγω της διατακτικής φύσης των δεδομένων (κλίμακες Likert), ενώ ως επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας υιοθετήθηκε το $p < 0,05$.

Τα αποτελέσματα έδειξαν μέτρια θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ της γνώσης BIM και της αντιλαμβανόμενης συμβολής του BIM στην οργάνωση τεχνικών δεδομένων ($\rho = 0,388$, $p < 0,001$), καθώς και μεταξύ της γνώσης BIM και της αξιολόγησης της παραμετροποίησης χώρων και εξοπλισμού ($\rho = 0,302$, $p = 0,007$). Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι οι συμμετέχοντες με μεγαλύτερη εξοικείωση με το BIM αναγνωρίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα οφέλη που προσφέρει η οργανωμένη ψηφιακή πληροφορία στη διαχείριση τεχνικών εγκαταστάσεων.

Αντίθετα, η συσχέτιση μεταξύ της γνώσης BIM και της αντιλαμβανόμενης χρησιμότητας των Rooms για εφαρμογές Facility Management ήταν ασθενής θετική ($\rho = 0,202$) και δεν ήταν στατιστικά σημαντική ($p = 0,072$). Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η αξία της συγκεκριμένης λειτουργικότητας αναγνωρίζεται σε σημαντικό βαθμό ανεξάρτητα από το επίπεδο γνώσης των τεχνολογιών BIM.

Όσον αφορά τις τεχνολογίες Digital Twin, οι συσχετίσεις ήταν γενικά ασθενέστερες, γεγονός που είναι αναμενόμενο λόγω του χαμηλότερου επιπέδου εξοικείωσης των συμμετεχόντων με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η μεγαλύτερη εξοικείωση με τις τεχνολογίες BIM συνδέεται με θετικότερη αντίληψη για την αξιοποίηση της δομημένης ψηφιακής πληροφορίας στη διαχείριση κτιριακών εγκαταστάσεων, ενώ για τις τεχνολογίες Digital Twin απαιτείται περαιτέρω διάδοση και εφαρμογή τους στην πράξη, ώστε να διαμορφωθούν ισχυρότερες αντιλήψεις σχετικά με τις δυνατότητές τους.

4.9 Συμπερασματική αποτίμηση αποτελεσμάτων

Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας προκύπτει ότι η δημιουργία Στατικού Ψηφιακού Διδύμου σε κτιριακή υποδομή όπως η εξεταζόμενη είναι εφικτή, ακόμη και όταν δεν υπάρχουν πλήρεις υποδομές αυτοματισμού ή real-time δεδομένα. Η βασική προϋπόθεση είναι η σωστή ανάπτυξη του BIM μοντέλου και η συστηματική οργάνωση των διαθέσιμων πληροφοριών.

Το τελικό αποτέλεσμα δείχνει ότι ένα στατικό μοντέλο μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσο στάδιο ψηφιακής ωρίμανσης, παρέχοντας άμεσα οφέλη στη διαχείριση χώρων, στην τεκμηρίωση H/M εξοπλισμού και στην υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης. Παράλληλα, δημιουργεί τη βάση για μελλοντική σύνδεση με BMS, αισθητήρες, βάσεις δεδομένων και εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης, ώστε να καταστεί δυνατή σε επόμενο στάδιο η ανάπτυξη εφαρμογών προγνωστικής συντήρησης.

Η βασική αδυναμία της παρούσας εφαρμογής σχετίζεται με την περιορισμένη διαθεσιμότητα πραγματικών λειτουργικών δεδομένων και την απουσία συνεχούς ροής δεδομένων από την εγκατάσταση. Ωστόσο, αυτό δεν αναιρεί τη χρησιμότητα του στατικού μοντέλου, καθώς αναδεικνύεται μία ρεαλιστική και εφαρμόσιμη μεθοδολογία για υφιστάμενα κτίρια κρίσιμων υποδομών.

5 Συζήτηση - Συμπεράσματα

5.1 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Συμπερασματικά, η παρούσα έρευνα περιγράφει την ανάπτυξη ενός πληροφοριακού μοντέλου κτιριακών δεδομένων (Building Information Model – BIM) και τη δημιουργία ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου (Static Digital Twin) για υφιστάμενη εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ, με στόχο την αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών στη διαχείριση, τεκμηρίωση και υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης κτιριακών και ηλεκτρομηχανολογικών υποδομών. Παράλληλα, η εργασία διερευνά τις προϋποθέσεις μελλοντικής εξέλιξης του μοντέλου προς εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης.

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής και της στατιστικής διερεύνησης καταδεικνύουν ότι η ανάπτυξη ενός BIM-based Static Digital Twin αποτελεί τεχνικά εφικτή και λειτουργικά χρήσιμη προσέγγιση ακόμη και σε περιβάλλον όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα συστήματα αυτοματισμού ή συνεχής ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Μέσα από την έρευνα αναδείχθηκε ότι οι σημαντικότερες ανάγκες των χρηστών σχετίζονται με την οργάνωση, επικαιροποίηση και εύκολη πρόσβαση στα τεχνικά δεδομένα των εγκαταστάσεων. Τα ευρήματα αυτά συμφωνούν με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η οργανωμένη διαχείριση πληροφορίας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιτυχίας εφαρμογών BIM και Ψηφιακών Διδύμων σε υφιστάμενα κτίρια.

Ιδιαίτερα υψηλή αποδοχή καταγράφηκε για λειτουργίες που σχετίζονται με τη διαχείριση πληροφορίας, όπως η εξαγωγή πινάκων και μητρώων, η παραμετροποίηση χώρων και εξοπλισμού και η αξιοποίηση των Rooms ως φορέων πληροφορίας για εφαρμογές διαχείρισης εγκαταστάσεων. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι οι επαγγελματίες αντιλαμβάνονται το BIM όχι μόνο ως εργαλείο τρισδιάστατης μοντελοποίησης αλλά κυρίως ως περιβάλλον συγκέντρωσης και αξιοποίησης ψηφιακών δεδομένων.

Παράλληλα, οι συμμετέχοντες αξιολόγησαν ιδιαίτερα θετικά τη μελλοντική διασύνδεση των Ψηφιακών Διδύμων με συστήματα BMS, αισθητήρες και εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η σταδιακή μετάβαση από ένα

στατικού τύπου Ψηφιακό Δίδυμο σε ένα δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο αποτελεί ρεαλιστική προοπτική για τις κρίσιμες υποδομές.

Πίνακας 5.1 Προκλήσεις κατά την εφαρμογή BIM και Static Digital Twin

A/A	Παράγοντας	Περιγραφή
1	Πληρότητα διαθέσιμων δεδομένων	Η επάρκεια και η διαθεσιμότητα αρχιτεκτονικών, τεχνικών, ενεργειακών και λειτουργικών δεδομένων επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία και το επίπεδο ανάπτυξης του μοντέλου.
2	Ακρίβεια αποτύπωσης υφιστάμενης κατάστασης	Η ορθή γεωμετρική και λειτουργική αποτύπωση της πραγματικής κατάστασης της εγκατάστασης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιοπιστία του BIM μοντέλου και του Ψηφιακού Διδύμου.
3	Ορθή παραμετροποίηση χώρων και εξοπλισμού	Η σωστή οργάνωση των παραμέτρων, των χώρων και των στοιχείων H/M εξοπλισμού συμβάλλει στη λειτουργικότητα, την αναζήτηση και τη μελλοντική αξιοποίηση της πληροφορίας.
4	Συνοχή πληροφοριακής δομής	Η ύπαρξη ενιαίας και δομημένης πληροφοριακής λογικής εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα, τη συνέπεια των δεδομένων και τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης του μοντέλου.

Πίνακας 5.2 Βασικές προκλήσεις ανάπτυξης Static Digital Twin σε υφιστάμενα κτίρια

Πρόκληση	Επίδραση
Ελλιπή σχέδια	Μειωμένη ακρίβεια μοντέλου
Ασυμφωνία «ως κατασκευάσθαι» στοιχείων	Ανάγκη αυτοψιών
Αποσπασματικά δεδομένα H/M	Δυσκολία τεκμηρίωσης
Έλλειψη προτύπων πληροφορίας	Ασυνέπεια δεδομένων
Περιορισμένη ψηφιακή ωριμότητα	Δυσκολία οργάνωσης και διαχείρισης

Οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου Ψηφιακού Διδύμου και καταδεικνύουν ότι η μετάβαση προς πιο εξελιγμένα ψηφιακά περιβάλλοντα διαχείρισης απαιτεί συστηματική πληροφοριακή οργάνωση και τυποποίηση δεδομένων.

Μέσω της υλοποίησης του μοντέλου, η εργασία ανέδειξε ότι ακόμη και ένα Ψηφιακό Δίδυμο στατικής ανατροφοδότησης μπορεί να παρέχει ουσιαστικά οφέλη στη διαχείριση εγκαταστάσεων.

Πίνακας 5.3 Κύρια οφέλη εφαρμογής BIM και Static Digital Twin

Πεδίο	Δυνατότητα
Διαχείριση χώρων	Ψηφιακή αποτύπωση και ταξινόμηση χώρων
Διαχείριση παγίων	Καταγραφή και τεκμηρίωση H/M εξοπλισμού
Συντήρηση	Υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης
Αρχειοθέτηση	Ενιαίο ψηφιακό αποθετήριο δεδομένων
Διαχείριση υποδομών	Υποστήριξη λειτουργίας εγκαταστάσεων
Χρήση τεχνητής νοημοσύνης	Δημιουργία βάσης δεδομένων για μελλοντικές εφαρμογές AI

Η χρήση οργανωμένων παραμέτρων στο περιβάλλον BIM διευκόλυνε σημαντικά τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων σε μορφή πινάκων και μητρώων, επιτρέποντας τη διασύνδεση του μοντέλου με διαδικασίες τεχνικής διαχείρισης και λειτουργίας εγκαταστάσεων. Μέσω της διαδικασίας αυτής καθίσταται δυνατή η σταδιακή μετάβαση από ένα απλό γεωμετρικό μοντέλο σε ένα πληροφοριακά εμπλουτισμένο περιβάλλον διαχείρισης.

5.2 Ερευνητικά πορίσματα

5.2.1 Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

RQ1: Είναι εφικτή η ανάπτυξη ενός BIM-based Static Digital Twin σε υφιστάμενη εγκατάσταση κρίσιμης ενεργειακής υποδομής;

Η έρευνα έδειξε ότι η ανάπτυξη ενός BIM-based Static Digital Twin είναι τεχνικά εφικτή ακόμη και σε εγκαταστάσεις όπου δεν υπάρχουν ολοκληρωμένες ψηφιακές υποδομές ή διαθέσιμα δεδομένα πραγματικού χρόνου. Η ύπαρξη διαθέσιμων σχεδίων, η διενέργεια αυτοψιών και η κατάλληλη οργάνωση της πληροφορίας κρίθηκαν επαρκείς προϋποθέσεις για την ανάπτυξη του μοντέλου.

RQ2: Μπορεί ένα Static Digital Twin να υποστηρίξει διαδικασίες Facility Management και τεχνικής διαχείρισης;

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ένα Static Digital Twin μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά διαδικασίες Facility Management μέσω της οργάνωσης πληροφορίας χώρων, εξοπλισμού, τεχνικών χαρακτηριστικών και λειτουργικών δεδομένων. Η

δυνατότητα εξαγωγής μητρώων και η δομημένη πληροφοριακή οργάνωση αξιολογήθηκαν ιδιαίτερα θετικά από τους συμμετέχοντες.

RQ3: Ποια είναι τα κυριότερα οφέλη και οι βασικές προκλήσεις εφαρμογής;

Τα κυριότερα οφέλη αφορούν την κεντρικοποίηση τεχνικής πληροφορίας, τη μείωση του χρόνου αναζήτησης δεδομένων, τη βελτίωση της τεχνικής τεκμηρίωσης και την υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης. Οι σημαντικότερες προκλήσεις σχετίζονται με την πληρότητα και ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, το κόστος υλοποίησης, την ανάγκη εκπαίδευσης των χρηστών και την οργανωτική προσαρμογή των φορέων.

RQ4: Μπορεί ένα Static Digital Twin να αποτελέσει βάση για μελλοντική ανάπτυξη Dynamic Digital Twin;

Τα αποτελέσματα της έρευνας υποδεικνύουν ότι ένα οργανωμένο BIM-based Static Digital Twin μπορεί να αποτελέσει το απαραίτητο πρώτο στάδιο ψηφιακής ωρίμανσης και τη βάση για μελλοντική διασύνδεση με BMS, αισθητήρες IoT και εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης. Η θετική στάση των συμμετεχόντων απέναντι στις τεχνολογίες αυτές ενισχύει τη συγκεκριμένη προοπτική.

5.2.2 Αποτελέσματα ερευνητικών υποθέσεων.

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα ερευνητικών υποθέσεων

Υπόθεση	Αποτέλεσμα
H1	Υποστηρίζεται
H2	Δεν υποστηρίζεται
H3	Υποστηρίζεται
H4	Δεν υποστηρίζεται στατιστικά / ασθενής θετική τάση
H5	Δεν υποστηρίζεται
H6	Δεν υποστηρίζεται (με το τελικό δείγμα)
H7-H9	Οι υποθέσεις H7-H9 διατυπώθηκαν στο θεωρητικό πλαίσιο της έρευνας, ωστόσο δεν κατέστη δυνατή η στατιστική διερεύνησή τους βάσει των διαθέσιμων δεδομένων και του τελικού σχεδιασμού της ανάλυσης.

5.3 Επιστημονική και Πρακτική Συνεισφορά της Έρευνας

Η παρούσα εργασία συμβάλλει τόσο σε επιστημονικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο στην κατανόηση της εφαρμογής τεχνολογιών BIM και Ψηφιακού Διδύμου σε υφιστάμενες κτιριακές εγκαταστάσεις κρίσιμων ενεργειακών υποδομών.

Σε επιστημονικό επίπεδο, η έρευνα παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ανάπτυξης BIM-based Static Digital Twin σε πραγματική εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ, συνδυάζοντας στοιχεία μοντελοποίησης, πληροφοριακής οργάνωσης, Facility Management και ψηφιακού μετασχηματισμού. Παράλληλα, η έρευνα εμπλουτίζει τη βιβλιογραφία σχετικά με την αξιοποίηση Ψηφιακών Διδύμων σε υφιστάμενα κτίρια, όπου συχνά παρατηρούνται περιορισμοί ως προς τη διαθεσιμότητα δεδομένων και την ύπαρξη ψηφιακών υποδομών.

Σε πρακτικό επίπεδο, η εργασία αποδεικνύει ότι η δημιουργία ενός Στατικού Ψηφιακού Διδύμου μπορεί να προσφέρει άμεσα οφέλη χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη συστημάτων παρακολούθησης πραγματικού χρόνου. Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει την οργάνωση τεχνικής πληροφορίας, την ανάπτυξη δομημένων μητρώων εξοπλισμού, τη βελτίωση της τεκμηρίωσης και την υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης και διαχείρισης εγκαταστάσεων.

Ιδιαίτερη αξία παρουσιάζει η δυνατότητα αξιοποίησης της μεθοδολογίας από οργανισμούς που διαχειρίζονται κρίσιμες υποδομές, καθώς παρέχει ένα ρεαλιστικό και σταδιακό πλαίσιο μετάβασης προς πιο προηγμένα περιβάλλοντα Ψηφιακών Διδύμων και έξυπνης διαχείρισης εγκαταστάσεων.

5.4 Περιορισμοί της Έρευνας

Παρά τα θετικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των συμπερασμάτων.

Αρχικά, η εφαρμογή της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε σε μία μόνο κτιριακή εγκατάσταση του ΑΔΜΗΕ. Επομένως, τα αποτελέσματα αντανακλούν τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης και δεν μπορούν να γενικευθούν αυτούσια στο σύνολο των ενεργειακών ή κτιριακών υποδομών.

Επιπλέον, το αναπτυγμένο Ψηφιακό Δίδυμο αποτελεί Στατικό Ψηφιακό Δίδυμο (Static Digital Twin), καθώς δεν υπήρχε διαθέσιμη διασύνδεση με αισθητήρες, συστήματα BMS ή άλλες πηγές δεδομένων πραγματικού χρόνου. Ως εκ τούτου, δεν ήταν δυνατή η αξιολόγηση λειτουργιών συνεχούς παρακολούθησης ή δυναμικής ενημέρωσης του μοντέλου.

Περιορισμός αποτελεί επίσης η διαθεσιμότητα των αρχικών δεδομένων. Όπως συμβαίνει συχνά σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, παρατηρήθηκαν ελλείψεις σε σχέδια,

αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών δεδομένων και περιορισμένη τεκμηρίωση ορισμένων στοιχείων H/M εξοπλισμού.

Επιπλέον, η αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου βασίστηκε κυρίως στις αντιλήψεις και εκτιμήσεις των συμμετεχόντων και όχι σε μετρήσιμους δείκτες λειτουργικής απόδοσης της εγκατάστασης ή σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας. Επομένως, η παρούσα έρευνα αξιολογεί κυρίως την αντιλαμβανόμενη χρησιμότητα και αποδοχή της προτεινόμενης προσέγγισης και όχι την πραγματική επιχειρησιακή της απόδοση σε συνθήκες λειτουργίας.

Τέλος, η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στην οργάνωση και αξιοποίηση τεχνικής πληροφορίας και δεν περιέλαβε οικονομική αξιολόγηση της εφαρμογής μέσω ανάλυσης κόστους – οφέλους, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής διερεύνησης.

5.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα και Εξέλιξη

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καταδεικνύουν ότι η ανάπτυξη ενός BIM-based Static Digital Twin μπορεί να αποτελέσει το πρώτο στάδιο ψηφιακής ωρίμανσης για υφιστάμενες εγκαταστάσεις κρίσιμων υποδομών. Με βάση τα συμπεράσματα της έρευνας, προτείνονται τα ακόλουθα πεδία μελλοντικής εξέλιξης:

1. Διασύνδεση με αισθητήρες και συστήματα IoT

Η ενσωμάτωση αισθητήρων θα επιτρέψει την αυτόματη συλλογή δεδομένων λειτουργίας, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις μετάβασης από ένα Στατικό σε ένα Δυναμικό Ψηφιακό Δίδυμο.

2. Ενσωμάτωση συστημάτων Building Management System (BMS)

Η σύνδεση με συστήματα BMS θα επιτρέψει την παρακολούθηση και διαχείριση παραμέτρων λειτουργίας των εγκαταστάσεων σε πραγματικό χρόνο.

3. Διασύνδεση με συστήματα Facility Management και CMMS

Η σύνδεση του μοντέλου με συστήματα διαχείρισης συντήρησης μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικότερα τις διαδικασίες προγραμματισμού, παρακολούθησης και τεκμηρίωσης τεχνικών παρεμβάσεων.

4. Ανάπτυξη εφαρμογών προγνωστικής συντήρησης

Η αξιοποίηση ιστορικών και λειτουργικών δεδομένων σε συνδυασμό με αλγορίθμους Τεχνητής Νοημοσύνης μπορεί να συμβάλει στην έγκαιρη ανίχνευση πιθανών αστοχιών και στη βελτιστοποίηση των στρατηγικών συντήρησης.

5. Εφαρμογή σε μεγαλύτερο αριθμό εγκαταστάσεων

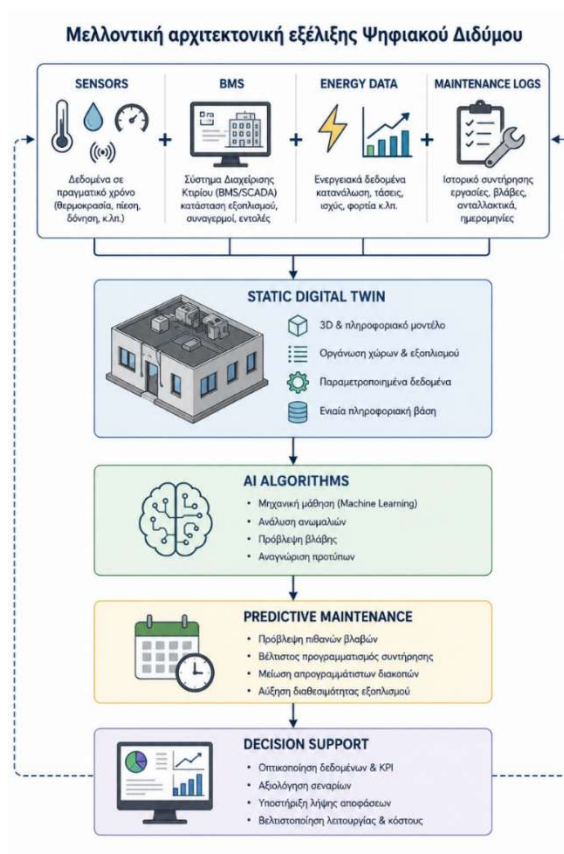
Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε περισσότερες εγκαταστάσεις του ΑΔΜΗΕ ή άλλων φορέων κρίσιμων υποδομών θα επιτρέψει την αξιολόγηση της επαναληψιμότητας και της γενικευσιμότητας των αποτελεσμάτων.

6. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου Dynamic Digital Twin

Τελικός στόχος αποτελεί η δημιουργία ενός πλήρως λειτουργικού Dynamic Digital Twin, το οποίο θα συνδυάζει γεωμετρική πληροφορία, τεχνικά χαρακτηριστικά, δεδομένα πραγματικού χρόνου και αλγορίθμους υποστήριξης λήψης αποφάσεων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό των κρίσιμων ενεργειακών υποδομών.

Πίνακας 5.5 Προτεινόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της έρευνας

Μελλοντική επέκταση	Στόχος
Διασύνδεση με αισθητήρες και συστήματα IoT	Παρακολούθηση λειτουργικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο
Ενσωμάτωση συστημάτων Building Management System (BMS)	Αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και έλεγχος εγκαταστάσεων
Διασύνδεση με συστήματα Facility Management και CMMS	Τεκμηρίωση, προγραμματισμός και παρακολούθηση εργασιών συντήρησης
Ανάπτυξη εφαρμογών προγνωστικής συντήρησης	Έγκαιρη ανίχνευση αστοχιών και βελτιστοποίηση στρατηγικών συντήρησης
Εφαρμογή σε μεγαλύτερο αριθμό εγκαταστάσεων	Αξιολόγηση επαναληψιμότητας και τυποποίησης
Ανάπτυξη ολοκληρωμένου Dynamic Digital Twin	Ενοποίηση γεωμετρικών, τεχνικών, real-time δεδομένων για λήψη αποφάσεων



Σχήμα 5.1 Μελλοντική αρχιτεκτονική εξέλιξης Ψηφιακού Διδύμου

Συνεπώς, η αξιοποίηση BIM και Στατικών Ψηφιακών Διδύμων μπορεί να αποτελέσει ουσιαστικό εργαλείο υποστήριξης της διαχείρισης και λειτουργίας τεχνικών εγκαταστάσεων, συμβάλλοντας στη συστηματικότερη διαχείριση τεχνικών δεδομένων, στη βελτίωση της τεκμηρίωσης των εγκαταστάσεων και στη δημιουργία των αναγκαίων προϋποθέσεων για τον ψηφιακό μετασχηματισμό κρίσιμων ενεργειακών υποδομών.

6 Βιβλιογραφία

Bakogiannis, E., Papadaki, K., Kyriakidis, C., & Potsiou, C. (2020). How to adopt BIM in the building construction sector across Greece? *Applied Sciences*, 10(4), 1–20.

Daniotti, B., Pavan, A., Bolognesi, C., Mirarchi, C., & Signorini, M. (2022). Digital transformation in the construction sector: From BIM to Digital Twin. *Digital Transformation – Towards New Frontiers and Business Opportunities*. London: IntechOpen.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

ISO 19650-1. (2018). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO 19650-2. (2018). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets*. Geneva: International Organization for Standardization.

Liu, W., et al. (2024). A systematic review of Digital Twin technology in buildings. *Automation in Construction*, 162, 105456.

Matos, B. C., Cruz, C. O., & Branco, F. A. (2024). Building information modeling in construction projects: The case of the Portuguese code of public contracts. *Journal of Public Procurement*, 24(1), 45–63.

Min Deng, Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to Digital Twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *ITcon*, 26, 58–83.

Piras, G., Agostinelli, S., & Muzi, F. (2024). Digital Twin framework for built environment: A review of key enablers. *Buildings*, 14(1), 112.

Revolti, A., et al. (2024). From Building Information Modeling to Construction Digital Twin: A conceptual framework. *Buildings*, 14(2), 318.

Smith, D. K., & Tardif, M. (2009). *Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375.

Tomczak, A., van Berlo, L., Krijnen, T., Borrmann, A., & Bolpagni, M. (2022). A review of methods to specify information requirements in digital construction projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101, 092024.

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Στο F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (σσ. 85–113). Springer.

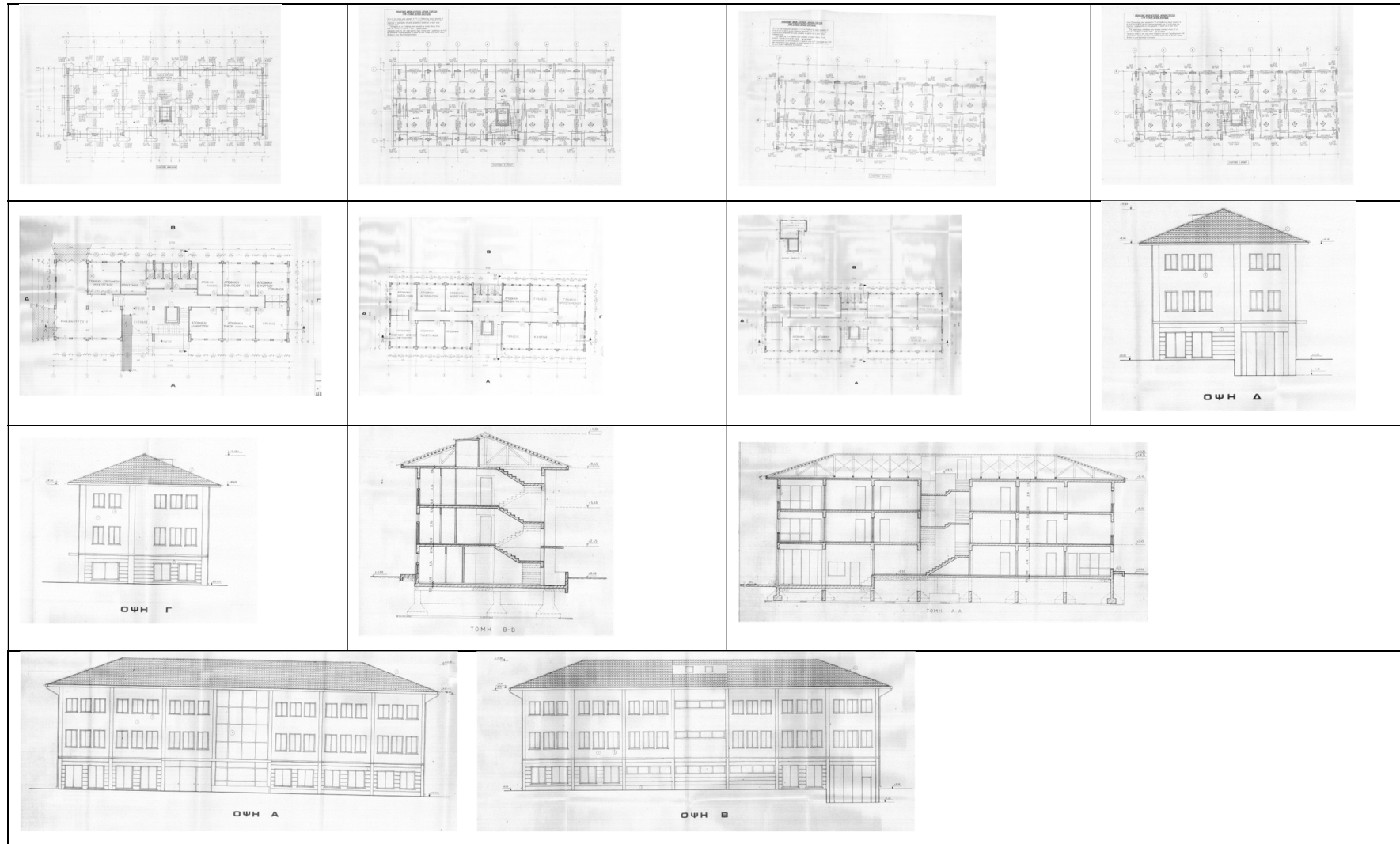
European Commission. (2021). *Supporting Digitalisation of the Construction Sector and SMEs*. Brussels: European Union.

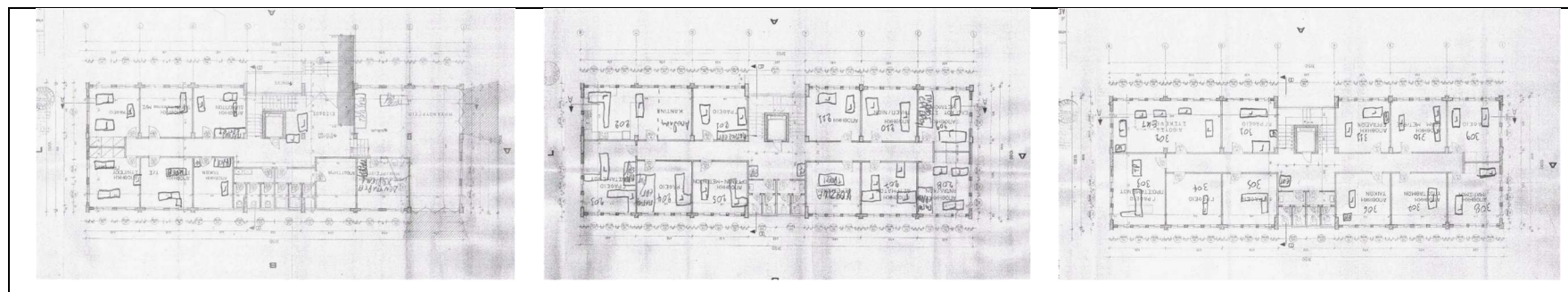
PM² Alliance. (2023). *PM² Project Management Methodology Guide – Open Edition*. Brussels: European Commission.

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252.

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

7 Παράρτημα Ι – Πολεοδομικά Σχέδια / Σκαριφήματα αυτοψίας





Σχήμα 7.1 Πολεοδομικά σχέδια / σκαριφήματα αυτοψίας για χρήση χώρων κτιρίου διοίκησης Περιφερειακού Τομέα Πελοποννήσου. Πηγή: Αρχείο Υπηρεσίας ΔΑΓΥ – ΑΔΜΗΕ.

8 Παράρτημα II – Παραδοτέα μοντελοποίησης

