



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ
ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΈΞΥΠΝΑ ΚΤΙΡΙΑ:
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ
ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ-
ΤΗΤΑΣ**

ΣΠΑΝΟΥΔΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΦΑΒΒΑΤΑ ΜΑΡΙΑ

**ΠΑΤΡΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026**

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2026

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων» της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου. Η πνευματική ιδιοκτησία της εργασίας ανήκει στον συγγραφέα της. Επιτρέπεται η ελεύθερη χρήση του περιεχομένου για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, με υποχρεωτική αναφορά στην πηγή. Απαγορεύεται η αναπαραγωγή, αναδημοσίευση ή εμπορική εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους της εργασίας χωρίς την έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Ο συγγραφέας διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία μελετά, αναλύει και τεκμηριώνει μια αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης για έξυπνα κτίρια. Το κεντρικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η ετερογένεια των συστημάτων πεδίου και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που συνυπάρχουν στις σύγχρονες κτιριακές εγκαταστάσεις, όπως τα BACnet, KNX, Modbus, MQTT και MP-Bus, και η αδυναμία αξιοποίησης των παραγόμενων δεδομένων από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου λόγω ασυνέπειας δομής και απουσίας κοινής σημασιολογικής αναφοράς.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, σχεδιάζεται μια τριεπίπεδη αρχιτεκτονική. Η πρώτη βαθμίδα αναλαμβάνει τη διασύνδεση με τα συστήματα πεδίου μέσω εξειδικευμένων συνιστωσών σύνδεσης ανά πρωτόκολλο. Η δεύτερη βαθμίδα εφαρμόζει συστηματική κανονικοποίηση αναλογικών τιμών, καταστάσεων, συναγερμών και συμβάντων, παράγοντας δομικά ομοιογενείς εγγραφές με κοινό σχήμα μονάδων, τύπων, κλιμάκωσης και ποιότητας, ανεξάρτητα από την τεχνολογική προέλευση των δεδομένων. Η τρίτη βαθμίδα υλοποιεί σημασιολογικό εμπλουτισμό μέσω αντιστοίχισης των κανονικοποιημένων σημείων σε οντότητες του Brick Schema, αποδίδοντας σε κάθε σημείο μέτρησης τύπο, χωρική τοποθεσία και λειτουργικές σχέσεις με εξοπλισμό και χώρους. Η αρχιτεκτονική εφαρμόζεται και αποτιμάται μέσω μελέτης περίπτωσης βασισμένης στο κτίριο γραφείων Project NEO στο Βερολίνο, με υποθετικό σενάριο εγκατάστασης και συνθετικά δεδομένα. Η αποτίμηση είναι αναλυτική και επιδεικτική και τεκμηριώνει ότι η αρχιτεκτονική καλύπτει δομικά και τους τέσσερις τύπους δεδομένων της εγκατάστασης, ότι η ενσωμάτωση κάθε πρωτοκόλλου περιορίζεται σε χωριστή συνιστώσα σύνδεσης χωρίς τροποποίηση του πυρήνα, και ότι η σημασιολογική αντιστοίχιση σε οντότητες Brick καθιστά τα δεδομένα προσπελάσιμα μέσω ερωτημάτων βάσει τύπων και σχέσεων. Η ανάλυση κάλυψης αναδεικνύει ότι το μεγαλύτερο μέρος της χαρτογράφησης εξαρτάται από συνεπείς συμβάσεις ονοματολογίας και τεκμηρίωσης της εγκατάστασης, στοιχείο που προσδιορίζει την ονοματολογία και την τεκμηρίωση ως βασική προϋπόθεση αποτελεσματικής εφαρμογής. Η εμπειρική επαλήθευση σε πραγματική εγκατάσταση παραμένει αντικείμενο μελλοντικής εργασίας. Η εργασία προσφέρει ένα τεκμηριωμένο και τεχνολογικά ανεξάρτητο πλαίσιο αναφοράς για πιο ώριμες και διαλειτουργικές αρχιτεκτονικές διαχείρισης δεδομένων σε έξυπνα κτίρια.

Λέξεις-Κλειδιά: έξυπνα κτίρια, κανονικοποίηση δεδομένων, σημασιολογική διαλειτουργικότητα, Brick Schema, κτιριακός αυτοματισμός, ενδιάμεσο επίπεδο, BACnet, KNX, Modbus

Abstract

This thesis studies, analyses, and documents a digital normalization middleware architecture for smart buildings. The central problem addressed is the heterogeneity of field systems and communication protocols that coexist in modern building installations, such as BACnet, KNX, Modbus, MQTT, and MP-Bus, and the inability of higher-level applications to effectively exploit the data they produce due to structural inconsistency and the absence of a common semantic reference.

To address this problem, a three-tier architecture is designed. The first tier handles connectivity with field systems through protocol-specific connector components. The second tier applies systematic normalization of analogue values, states, alarms, and events, producing structurally homogeneous records with a common schema for units, types, scaling, and data quality, regardless of the technological origin of the data. The third tier implements semantic enrichment by mapping normalized data points to Brick Schema entities, assigning each measurement point a type, spatial location, and functional relationships with equipment and spaces.

The architecture is applied and assessed through a case study based on the Project NEO office building in Berlin, using a hypothetical installation scenario and synthetic data. The assessment is analytical and demonstrative and documents that the architecture structurally covers all four data types of the installation, that the integration of each protocol is confined to a separate connector component without modification of the core, and that semantic mapping to Brick entities renders the data accessible through queries based on types and relationships. The coverage analysis shows that the larger part of the mapping depends on consistent installation nomenclature and documentation, which identifies nomenclature and documentation as a basic prerequisite for effective deployment. Empirical verification on a real installation remains a subject of future work. The thesis provides a documented, technology-independent reference framework for more mature and interoperable data management architectures in smart buildings.

Keywords: smart buildings, data normalization, semantic interoperability, Brick Schema, building automation, middleware, BACnet, KNX, Modbus

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω την Ξένια μου για την υπομονή και τη συμπαράσταση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Η στήριξή της ήταν για μένα πολύτιμη.

I. Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Λέξεις-Κλειδιά	3
Abstract.....	4
Keywords	4
Ευχαριστίες.....	5
I. Περιεχόμενα.....	6
II. Κατάλογος Εικόνων	8
III. Κατάλογος Πινάκων	9
IV. Απόδοση Αγγλικών Όρων.....	10
V. Εισαγωγή	13
i. Διατύπωση προβλήματος.....	13
ii. Οργάνωση εργασίας.....	15
1. Έξυπνα κτίρια, συστήματα διαχείρισης κτιρίων και δεδομένα λειτουργίας....	16
1.1. Τι είναι έξυπνο κτίριο και τι είναι σύστημα διαχείρισης κτιρίου	16
1.2. Επίπεδα αρχιτεκτονικής (σε κτιριακό αυτοματισμό) και ροές πληροφορίας ...	17
1.3. Υποσυστήματα κτιρίου και παραδείγματα λειτουργιών	19
1.3.1. Σύστημα HVAC	19
1.3.2. Σύστημα φωτισμού	20
1.3.3. Σύστημα ενεργειακής παρακολούθησης.....	20
1.3.4. Συστήματα ασφαλείας και πρόσβασης	21
1.4. Τιμές, καταστάσεις, συναγερμοί και συμβάντα ως είδη δεδομένων	21
1.4.1. Αναλογικές τιμές.....	22
1.4.2. Καταστάσεις.....	23
1.4.3. Συναγερμοί.....	23
1.4.4. Συμβάντα.....	24
1.5. Γιατί η ενοποίηση δεδομένων αποτελεί προϋπόθεση αξιοποίησης από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου	24
2. Συστήματα πεδίου και επικοινωνία σε κτιριακές υποδομές	25
2.1. Τι είναι σύστημα πεδίου και τι είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας	26

2.2. Ετερογένεια εγκαταστάσεων και ασυνέπειες στα δεδομένα	27
2.3. Απαιτήσεις επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων	28
2.4. Πρωτόκολλο επικοινωνίας BACnet.....	29
2.5. Πρωτόκολλο επικοινωνίας KNX	31
2.6. Πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus.....	32
2.7. Πρωτόκολλο επικοινωνίας MP-Bus	34
2.8. Πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT και διασύνδεση με υπηρεσίες IoT	37
2.9. Συνοπτική συγκριτική αποτίμηση πρωτοκόλλων ως προς την ενοποίηση δεδομένων	38
3. Ενδιάμεσο επίπεδο ενοποίησης και κανονικοποίησης	41
3.1. Η έννοια του ενδιάμεσου επιπέδου και ο ρόλος του στη συνολική αρχιτεκτονική	41
3.2. Έννοια κανονικοποίησης δεδομένων και ενιαία λογική αναπαράσταση	43
3.3. Κανονικοποίηση μονάδων, τύπων, κλιμάκωσης και ποιότητας δεδομένων	44
3.4. Κανονικοποίηση καταστάσεων, συναγερμών και συμβάντων	45
3.5. Μηχανισμοί ολοκλήρωσης συστημάτων και διάθεσης δεδομένων προς εφαρμογές	47
3.6. Αξιοπιστία και ποιότητα της κανονικοποιημένης πληροφορίας	49
4. Σημασιολογική διαλειτουργικότητα σε δεδομένα κτιρίων	50
4.1. Τι σημαίνει σημασιολογική διαλειτουργικότητα και γιατί δεν καλύπτεται μόνο με κανονικοποίηση.....	50
4.2. Ετικετοποίηση και κανόνες αντιστοίχισης σε τεχνικά δεδομένα	52
4.3. Project Haystack ως προσέγγιση σημασιολογικής ετικετοποίησης.....	53
4.4. Brick Schema ως σχήμα μοντελοποίησης εξοπλισμού, χώρων και σημείων ...	55
4.5. Διαδικασία χαρτογράφησης από κανονικοποιημένα δεδομένα σε σημασιολογικές οντότητες	57
4.6. Έλεγχος συνέπειας, συντήρηση και εξέλιξη σημασιολογικού μοντέλου	59
5. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης	60
5.1. Απαιτήσεις σχεδίασης και κριτήρια αξιολόγησης	60
5.2. Συστατικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής και ροή δεδομένων από το πεδίο προς τις εφαρμογές	62
5.3. Βαθμίδα I: Διασύνδεση συστημάτων πεδίου και ενσωμάτωση πολλών πρωτοκόλλων	65

5.4. Βαθμίδα II: Πυρήνας κανονικοποίησης και κανόνες μετασχηματισμού.....	67
5.5. Βαθμίδα III: Επίπεδο σημασιολογικού εμπλουτισμού	69
5.6. Διάθεση δεδομένων.....	71
5.7. Αποθήκευση και ιστορικότητα δεδομένων	73
5.8. Ασφάλεια και λειτουργική παρακολούθηση.....	74
6. Μελέτη περίπτωσης - Αποτελέσματα.....	76
6.1. Περιγραφή εγκατάστασης και διαθέσιμων τεχνικών στοιχείων	76
6.2. Χαρτογράφηση σημείων και ροών πληροφορίας	78
6.3. Εφαρμογή κανονικοποίησης σε επιλεγμένα δεδομένα	82
6.4. Εφαρμογή σημασιολογικής αντιστοίχισης με Brick Schema	87
6.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με βάση τα κριτήρια του Κεφαλαίου 5	89
6.5.1. Αποτίμηση της εφαρμογής.....	90
6.5.2. Ποσοτική ανάλυση κάλυψης	91
6.5.3. Απόδειξη εννοίας σε δείγμα σημείων	92
6.5.4. Συγκριτική αποτίμηση έναντι εναλλακτικών προσεγγίσεων	94
6.6. Περιορισμοί και δυνατότητα γενίκευσης.....	95
7. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	96
8. Δήλωση Χρήσης Τεχνητής Νοημοσύνης	98
9. Βιβλιογραφία	98

II. Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΟΔΙΚΗ ΡΟΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ.	19
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΤΙΡΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ.	19
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΕΙΔΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ: ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ, ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΝΤΑ.	22
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΕΠΙΤΥΧΟΥΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΙΑΙΑΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ.	27
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΣΤΡΑΦΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ BACNET.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ KNX.....	32
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΔΟΜΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ MODBUS.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΔΟΜΗ ΤΟΥ MP-BUS	36

ΕΙΚΟΝΑ 9: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ PUBLISH/SUBSCRIBE ΤΟΥ MQTT	38
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΤΟ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΩΣ ΣΤΡΩΜΑ ΑΠΟΣΥΖΕΥΞΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ	45
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΣΥΓΚΡΙΣΗ PROJECT HAystack ΚΑΙ BRICK SCHEMA.	56
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΑΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΕ ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ.	59
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	65
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΒΑΘΜΙΔΑ Ι - ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΒΑΘΜΙΔΑ ΙΙ ΚΑΙ ΒΑΘΜΙΔΑ ΙΙΙ - ΠΥΡΗΝΑΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ.....	69
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΒΑΘΜΙΔΑ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	72
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΤΑΥΤΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΑΝΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ: ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΕΝΑΝΤΙ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	82
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗΣ ΤΙΜΗΣ: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ CO ₂ , ΖΩΝΗ MB02, ΟΡΟΦΟΣ 1, ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ MODBUS RTU.....	83
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ: ΕΠΑΦΗ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ, ΖΩΝΗ MB01, ΟΡΟΦΟΣ 3, ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ KNX.....	84
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΥ: DDC ΕΛΕΓΚΤΗΣ, ΖΩΝΗ MB03, ΟΡΟΦΟΣ 2, ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ BACNET.	85
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ: ΖΩΝΗ MB04, ΟΡΟΦΟΣ 4, ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ MP-BUS ΜΕΣΩ GATEWAY.	86

III. Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ, ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΑΦΑΙΡΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ, ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ, ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΚΑΙ ΖΩΝΗ ΜΙΣΘΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΥΠΙΚΟ ΟΡΟΦΟ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΝΕΟ.....	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ, ΜΕ ΑΡΙΘΜΟ ΣΥΣΚΕΥΩΝ, ΠΟΣΟΣΤΟ, ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.	91

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΔΕΙΓΜΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ, ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΑΠΟΔΕΙΞΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ.	92
--	----

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟ ΠΡΟΣ ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΜΟΝΟ ΜΕ ΕΤΙΚΕΤΟΠΟΙΗΣΗ, ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ.....	94
--	----

IV. Απόδοση Αγγλικών Όρων

Όρος	Απόδοση / Επεξήγηση
AHU (Air Handling Unit)	Μονάδα επεξεργασίας αέρα. Κεντρικό μηχανολογικό στοιχείο συστήματος HVAC.
AHU_Controller	Τύπος οντότητας Brick Schema. Ελεγκτής μονάδας επεξεργασίας αέρα.
Air_Flow_Sensor	Τύπος οντότητας Brick Schema. Σημείο μέτρησης παροχής αέρα.
BACnet	Ανοικτό πρωτόκολλο επικοινωνίας για BMS, βασισμένο σε αντικειμενοστραφές μοντέλο δεδομένων.
BMS (Building Management System)	Σύστημα αυτοματισμού και εποπτείας τεχνικών εγκαταστάσεων κτιρίου.
Brick Schema	Ανοικτό οντολογικό σχήμα μοντελοποίησης κτιριακών υποδομών, εξοπλισμού, χώρων και σημείων μέτρησης.
CO2_Sensor	Τύπος οντότητας Brick Schema. Σημείο μέτρησης συγκέντρωσης CO ₂ .
DDC (Direct Digital Control)	Άμεσος ψηφιακός έλεγχος. Αρχιτεκτονική ελεγκτών που επεξεργάζονται σήματα πεδίου απευθείας.
DPT (KNX Data Point Type)	Τυποποιημένος τύπος δεδομένων του προτύπου KNX που ορίζει μορφή και σημασία κάθε σημείου επικοινωνίας.
ETS (Engineering Tool Software)	Επίσημο εργαλείο παραμετροποίησης εγκαταστάσεων KNX.
Gateway	Πύλη διασύνδεσης. Συσκευή που μεταφράζει δεδομένα μεταξύ διαφορετικών πρωτοκόλλων.
HVAC	Συστήματα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού (Heating, Ventilation, Air Conditioning).

IoT (Internet of Things)	Διαδίκτυο των Αντικειμένων. Δίκτυο φυσικών συσκευών που ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω διαδικτύου.
KNX	Ευρωπαϊκό πρότυπο για έλεγχο εγκαταστάσεων κτιρίων, βασισμένο σε αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική.
LEED BD+C Gold	Διεθνές σύστημα πιστοποίησης πράσινων κτιρίων (Leadership in Energy and Environmental Design), επίπεδο Gold για νέες κατασκευές.
Middleware	Ενδιάμεσο λογισμικό που διασυνδέει εφαρμογές και συστήματα, παρέχοντας κοινό επίπεδο επικοινωνίας και ερμηνείας.
Modbus	Πρωτόκολλο επικοινωνίας master/slave για βιομηχανικές εφαρμογές, με εκδόσεις RTU και TCP/IP.
MP-Bus	Πρωτόκολλο επικοινωνίας για περιφερειακές συσκευές HVAC (κυρίως Belimo), με αρχιτεκτονική master-slave.
MQTT	Ελαφρύ πρωτόκολλο δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe), κατάλληλο για IoT εφαρμογές.
Ontology (Οντολογία)	Τυποποιημένο μοντέλο που ορίζει τύπους οντοτήτων, σχέσεις και χαρακτηριστικά τους σε ένα σημασιολογικό πλαίσιο.
OWL (Web Ontology Language)	Γλώσσα οντολογικής μοντελοποίησης του W3C, επέκταση του RDF με πλουσιότερη εκφραστικότητα.
Payload	Το τμήμα ενός μηνύματος που περιέχει τα πραγματικά δεδομένα, σε αντίθεση με τα μεταδεδομένα ή την επικεφαλίδα του.
ppm (parts per million)	Μονάδα μέτρησης συγκέντρωσης. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση CO ₂ στον αέρα εσωτερικών χώρων.
Predictive Maintenance	Προβλεπτική ή προγνωστική συντήρηση. Στρατηγική συντήρησης βασισμένη στην πρόβλεψη πιθανής βλάβης μέσω ανάλυσης πραγματικών δεδομένων λειτουργίας.
Project Haystack	Ανοικτό πλαίσιο ετικετοποίησης (tagging) δεδομένων κτιριακών συστημάτων για τη διευκόλυνση της διαλειτουργικότητας.

publish-subscribe (pub/sub)	Μοντέλο επικοινωνίας όπου οι αποστολείς δημοσιεύουν μηνύματα σε θέματα (topics) και οι παραλήπτες εγγράφονται σε αυτά.
RDF (Resource Description Framework)	Τυποποιημένη γλώσσα του W3C για την αναπαράσταση οντολογικών σχέσεων, βάση του Brick Schema.
RTU (Remote Terminal Unit)	Απομακρυσμένη μονάδα τερματικού. Στο Modbus αναφέρεται στη σειριακή έκδοση του πρωτοκόλλου.
Semantic Interoperability	Σημασιολογική διαλειτουργικότητα. Η δυνατότητα διαφορετικών συστημάτων να ανταλλάσσουν και να ερμηνεύουν δεδομένα με κοινή σημασιολογική βάση.
Smart Buildings	Έξυπνα κτίρια. Κτίρια εξοπλισμένα με αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης και συλλογής δεδομένων.
VAV (Variable Air Volume)	Σύστημα ρύθμισης παροχής αέρα μεταβλητού όγκου σε ζώνες κλιματισμού.
W3C (World Wide Web Consortium)	Διεθνής οργανισμός τυποποίησης του Παγκόσμιου Ιστού, υπεύθυνος για την ανάπτυξη ανοικτών προτύπων όπως το RDF και το OWL.

V. Εισαγωγή

i. Διατύπωση προβλήματος

Τα σύγχρονα έξυπνα κτίρια χαρακτηρίζονται από αυξανόμενο βαθμό αυτοματισμού και από τη συνεχή συλλογή μεγάλου όγκου λειτουργικών δεδομένων από ποικίλα υποσυστήματα, όπως θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός, φωτισμός, ενεργειακή παρακολούθηση, καθώς και συστήματα ασφαλείας και ελέγχου πρόσβασης. Τα δεδομένα αυτά, που εκφράζονται ως αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμοί και συμβάντα, αποτυπώνουν σε πραγματικό χρόνο τη συμπεριφορά των τεχνικών εγκαταστάσεων και αποτελούν, καταρχήν, μια αξιόλογη βάση για εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, όπως η ενεργειακή ανάλυση, η βελτιστοποίηση στρατηγικών ελέγχου, η προγνωστική συντήρηση και η ολοκληρωμένη διαχείριση εγκαταστάσεων. Παρά τη διαθεσιμότητά τους, ωστόσο, η ουσιαστική αξιοποίηση των δεδομένων αυτών παραμένει στην πράξη περιορισμένη.

Η ρίζα του προβλήματος εντοπίζεται στην ετερογένεια των κτιριακών εγκαταστάσεων. Οι εγκαταστάσεις διαμορφώνονται προοδευτικά κατά τον κύκλο ζωής τους, μέσω διαδοχικών φάσεων υλοποίησης, επεκτάσεων και αναβαθμίσεων, με αποτέλεσμα η τεχνική υποδομή να αποτελεί σύνθεση υποσυστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών, τεχνολογικών γενεών και σχεδιαστικών προσεγγίσεων. Στο ίδιο κτίριο συνυπάρχουν διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως BACnet, KNX, Modbus, MP-Bus και MQTT, καθένα από τα οποία ενσωματώνει διακριτό μοντέλο δεδομένων, μηχανισμό διευθυνσιοδότησης και εσωτερική δομή αναπαράστασης. Η ίδια φυσική ποσότητα μπορεί να εκφράζεται με διαφορετικές μονάδες, κλιμάκωση ή ακρίβεια, ενώ λειτουργικές καταστάσεις και συναγερμοί αποδίδονται μέσω ετερογενών κωδικοποιήσεων και τοπικών ονοματολογιών.

Κρίσιμο σημείο είναι ότι η τεχνική συμβατότητα σε επίπεδο μετάδοσης δεν συνεπάγεται εννοιολογική συνέπεια. Δύο συστήματα μπορούν να επικοινωνούν επιτυχώς, χωρίς ωστόσο τα δεδομένα τους να είναι συγκρίσιμα ή κοινώς ερμηνεύσιμα. Η διαλειτουργικότητα που επιτυγχάνεται με τα υφιστάμενα πρωτόκολλα παραμένει, έτσι, σε μεγάλο βαθμό συντακτική ή λειτουργική, καθώς εστιάζει στη μεταφορά της πληροφορίας και όχι στη συστηματική ενοποίησή της σε ενιαίο λογικό και σημασιολογικό πλαίσιο. Ως αποτέλεσμα, οι εφαρμογές ανώτερου επιπέδου καλούνται να διαχειριστούν ασυνεπή και ελλιπώς τεκμηριωμένα δεδομένα, απαιτώντας εξειδικευμένη γνώση ανά υποσύστημα, πρόσθετη προσαρμοστική λογική και χειροκίνητη παραμετροποίηση.

Η εξάρτηση αυτή έχει άμεσες πρακτικές συνέπειες. Η ενοποίηση των δεδομένων επιτυγχάνεται σήμερα κυρίως μέσω λύσεων που εξαρτώνται από συγκεκριμένη πλατφόρμα ή κατασκευαστή, οι οποίες περιορίζουν την οριζόντια διαλειτουργικότητα, αυξάνουν την πολυπλοκότητα ανάπτυξης και συντήρησης και δυσχεραίνουν τη συνολική εποπτεία του κτιρίου. Λειτουργίες όπως η ενεργειακή ανάλυση, η προγνωστική συντήρηση και η βελτιστοποίηση λειτουργίας υλοποιούνται έτσι ως αποσπασματικές και μη γενικεύσιμες λύσεις, που δεν μπορούν να μεταφερθούν σε διαφορετική εγκατάσταση χωρίς σημαντική εκ νέου παραμετροποίηση. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ενοποίηση των δεδομένων δεν αποτελεί συμπληρωματική τεχνική επιλογή αλλά δομική προϋπόθεση για κάθε αξιόπιστη και φορητή αξιοποίηση της λειτουργικής πληροφορίας.

Ένα δεύτερο, εξίσου κρίσιμο επίπεδο του προβλήματος είναι ότι η κανονικοποίηση σε επίπεδο μορφής και δομής των δεδομένων δεν επαρκεί από μόνη της. Ακόμη και όταν οι τιμές αποκτήσουν ομοιόμορφες μονάδες, τύπους και κλιμάκωση, παραμένει ανοιχτό το ζήτημα της σημασιολογικής τους ερμηνείας, δηλαδή της σαφούς και κοινά αποδεκτής απόδοσης νοήματος σε κάθε μεταβλητή, στον εξοπλισμό που την παράγει και στον χώρο που εξυπηρετεί. Χωρίς αυτό το σημασιολογικό υπόβαθρο, η αυτόματη αξιοποίηση των δεδομένων από εφαρμογές, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, παραμένει ανέφικτη. Η ανάγκη κοινής σημασιολογικής αναφοράς και η αξιοποίηση καθιερωμένων σχημάτων μοντελοποίησης, όπως το Project Haystack και το Brick Schema, αναδεικνύεται έτσι ως αναπόσπαστο τμήμα του προβλήματος και όχι ως μεταγενέστερη προσθήκη.

Παρότι έχουν προταθεί προσεγγίσεις που επιχειρούν να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω μέσω ενδιάμεσων επιπέδων λογισμικού, πλατφορμών συλλογής δεδομένων ή πλαισίων σημασιολογικής μοντελοποίησης, οι περισσότερες είτε εστιάζουν αποκλειστικά στη διασύνδεση πρωτοκόλλων είτε αντιμετωπίζουν τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα αποσπασματικά. Συχνά απουσιάζει σαφής διάκριση μεταξύ της μορφολογικής ενοποίησης και του σημασιολογικού εμπλουτισμού, καθώς και μια συνολική αρχιτεκτονική αναφοράς που να περιγράφει με συστηματικό τρόπο τη ροή της πληροφορίας από το επίπεδο πεδίου έως τις εφαρμογές, μαζί με τα επιμέρους στάδια μετασχηματισμού. Το ερευνητικό κενό εντοπίζεται, επομένως, στην έλλειψη μιας τεκμηριωμένης, τεχνολογικά ανεξάρτητης και επαναχρησιμοποιήσιμης ενδιάμεσης αρχιτεκτονικής κανονικοποίησης, η οποία να ενοποιεί δεδομένα από ετερογενείς πηγές σε ενιαία λογική αναπαράσταση και ταυτόχρονα να υποστηρίζει συστηματικά τη μετάβαση προς τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα.

Με βάση τα παραπάνω, το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της εργασίας διατυπώνεται ως εξής: Πώς μπορεί να σχεδιαστεί και να τεκμηριωθεί μια ενδιάμεση αρχιτεκτονική κανονικοποίησης δεδομένων για έξυπνες κτηριακές εγκαταστάσεις, η οποία να ενοποιεί δεδομένα από ετερογενή συστήματα και πρωτόκολλα σε ενιαία λογική αναπαράσταση και να υποστηρίζει συστηματικά τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα προς εφαρμογές ανώτερου επιπέδου; Το ερώτημα δεν περιορίζεται στη διασύνδεση των επιμέρους τεχνολογιών, αλλά εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα μπορούν να μετασχηματιστούν, να οργανωθούν και να εμπλουτιστούν ώστε να καθίστανται αξιοποιήσιμα, επαναχρησιμοποιήσιμα και ανεξάρτητα από την τεχνολογική τους προέλευση.

Για την απάντηση του ερωτήματος αυτού, η εργασία θέτει τέσσερις συμπληρωματικούς στόχους. Πρώτον, την ανάλυση των επιπέδων αρχιτεκτονικής στον κτιριακό αυτοματισμό και της ροής πληροφορίας από το επίπεδο πεδίου προς τις εφαρμογές, ώστε να προσδιοριστούν τα σημεία όπου απαιτείται κανονικοποίηση, καθώς και τη συγκριτική μελέτη των βασικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας ως προς τα μοντέλα δεδομένων και τις δυνατότητες ενοποίησης που προσφέρουν. Δεύτερον, τον σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής αναφοράς για το ενδιάμεσο επίπεδο κανονικοποίησης, με σαφή περιγραφή των συστατικών στοιχείων, των ρόλων τους και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Τρίτον, τον ορισμό μιας μεθοδολογίας κανονικοποίησης που καλύπτει δομές, τύπους, μονάδες, κλιμάκωση, καταστάσεις, συναγερμούς και συμβάντα, σε συνδυασμό με μηχανισμό σημασιολογικής αντιστοίχισης μέσω χαρτογράφησης σε σχήματα όπως το Brick Schema, διατηρώντας ρητή τη διάκριση μεταξύ κανονικοποίησης και σημασιολογικού εμπλουτισμού. Τέταρτον, την εφαρμογή και αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης μέσω μελέτης περίπτωσης σε ρεαλιστικό σενάριο κτιρίου γραφείων, με αναφορά στο κτίριο NEO στο Βερολίνο, όπου τεκμηριώνεται η πλήρης ροή πληροφορίας και αποτιμώνται η πληρότητα της κανονικοποίησης, η επεκτασιμότητα της αρχιτεκτονικής και ο βαθμός στον οποίο η σημασιολογική αντιστοίχιση καθιστά τα δεδομένα αξιοποιήσιμα από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου.

ii. Οργάνωση εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια που ακολουθούν τη λογική εξέλιξη του αντικειμένου: από τη θεωρητική θεμελίωση και την ανάλυση του προβλήματος, μέσω του σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής, έως την εφαρμογή και αξιολόγησή της σε ρεαλιστικό σενάριο εγκατάστασης.

Τα Κεφάλαια 1 και 2 συγκροτούν το θεωρητικό υπόβαθρο. Το Κεφάλαιο 1 αναλύει την έννοια του έξυπνου κτιρίου, τα επίπεδα αρχιτεκτονικής του κτιριακού αυτοματισμού

και τους τέσσερις τύπους δεδομένων που παράγουν τα υποσυστήματα: αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμούς και συμβάντα. Το Κεφάλαιο 2 εξετάζει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε κτιριακές εγκαταστάσεις, δηλαδή BACnet, KNX, Modbus, MP-Bus και MQTT, αναδεικνύοντας τις διαφορές τους ως προς τη δομή και τη σημασία των δεδομένων που μεταδίδουν, και καταλήγοντας σε συγκριτική αποτίμηση από την οπτική της ενοποίησης.

Τα Κεφάλαια 3 και 4 αναπτύσσουν τη μεθοδολογική βάση. Το Κεφάλαιο 3 ορίζει την έννοια και τη λειτουργία του ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης, με έμφαση στους μηχανισμούς μετασχηματισμού για κάθε τύπο δεδομένων. Το Κεφάλαιο 4 διερευνά τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα, παρουσιάζοντας τις προσεγγίσεις Project Haystack και Brick Schema και τη διαδικασία χαρτογράφησης από κανονικοποιημένα δεδομένα σε σημασιολογικές οντότητες. Η σαφής διάκριση μεταξύ κανονικοποίησης και σημασιολογικού εμπλουτισμού, η οποία διατρέχει και τα δύο κεφάλαια, αποτελεί κεντρική θέση της εργασίας.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, περιγράφοντας τα τρία επίπεδά της, δηλαδή τη διασύνδεση πεδίου, τον πυρήνα κανονικοποίησης και τον σημασιολογικό εμπλουτισμό με τη διάθεση δεδομένων, καθώς και τις απαιτήσεις σχεδίασης που λειτουργούν ως κριτήρια αξιολόγησης.

Το Κεφάλαιο 6 ολοκληρώνει την εργασία: εφαρμόζει την αρχιτεκτονική στο σενάριο του κτιρίου NEO στο Βερολίνο, αξιολογεί τα αποτελέσματα με βάση τα κριτήρια του Κεφαλαίου 5, συζητά τους περιορισμούς και τη δυνατότητα γενίκευσης, και διατυπώνει τα κύρια συμπεράσματα και τις προτάσεις για μελλοντική εργασία.

1. Έξυπνα κτίρια, συστήματα διαχείρισης κτιρίων και δεδομένα λειτουργίας

1.1. Τι είναι έξυπνο κτίριο και τι είναι σύστημα διαχείρισης κτιρίου

Ο όρος «έξυπνο κτίριο» αναφέρεται σε ένα κτιριακό σύστημα στο οποίο οι τεχνικές εγκαταστάσεις υποστηρίζονται από ψηφιακές τεχνολογίες, αισθητήρες και μηχανισμούς αυτοματισμού, με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους βάσει δεδομένων. Σύμφωνα με τη σύγχρονη βιβλιογραφία, τα έξυπνα κτίρια χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων λειτουργίας ώστε να υποστηρίζονται στόχοι όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα, η λειτουργική ευελιξία, και η υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών διαχείρισης (Malkawi, et al., 2023).

Κεντρικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής ενός έξυπνου κτιρίου αποτελεί το Σύστημα Διαχείρισης Κτιρίου (Building Management System - BMS), το οποίο λειτουργεί ως ανώτερο επίπεδο εποπτείας και ελέγχου των τεχνικών εγκαταστάσεων. Το BMS συλλέγει δεδομένα από τα συστήματα πεδίου, επιτρέπει τον συντονισμένο έλεγχο λειτουργιών σε πραγματικό χρόνο και παρέχει διεπαφές για την παρακολούθηση της κατάστασης του κτιρίου. Τυπικά, τα BMS ενσωματώνουν υποσυστήματα όπως HVAC, φωτισμό, ενεργειακή διαχείριση, και συστήματα ασφαλείας, παρέχοντας βασικές δυνατότητες αυτοματισμού και κεντρικής εποπτείας (Domingues, Carreira, Vieira, & Kastner, 2016).

Ωστόσο, η ύπαρξη ενός BMS δεν συνεπάγεται αυτομάτως ότι ένα κτίριο είναι «έξυπνο». Όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία, η «ευφυΐα» ενός κτιρίου δεν προκύπτει μόνο από τον κεντρικό έλεγχο, αλλά από τη δυνατότητα ενοποίησης, συνδυασμού και επαναχρησιμοποίησης των δεδομένων που παράγονται από ετερογενή υποσυστήματα. Η μετάβαση από τον παραδοσιακό κτιριακό αυτοματισμό σε λειτουργίες ανώτερου επιπέδου που βασίζονται στα δεδομένα απαιτεί συνεπή διαχείριση των δεδομένων και σαφή αρχιτεκτονική ροής πληροφορίας (Hildén, et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, το έξυπνο κτίριο ορίζεται ως ένα σύστημα στο οποίο τα δεδομένα λειτουργίας αποτελούν πρωτεύον στοιχείο της αρχιτεκτονικής, επιτρέποντας τη διάθεσή τους σε εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, όπως την ανάλυση απόδοσης, την ενεργειακή βελτιστοποίηση, και την υποστήριξη λήψης αποφάσεων. Η σχέση μεταξύ συστημάτων πεδίου, BMS και εφαρμογών αναδεικνύει την ανάγκη ύπαρξης ενδιάμεσων μηχανισμών ενοποίησης και κανονικοποίησης δεδομένων, οι οποίοι καθίστανται κρίσιμοι για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού των έξυπνων κτιρίων (Malkawi, et al., 2023) (Hildén, et al., 2022).

1.2. Επίπεδα αρχιτεκτονικής (σε κτιριακό αυτοματισμό) και ροές πληροφορίας

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων κτιριακού αυτοματισμού οργανώνεται σε διακριτά λειτουργικά επίπεδα, τα οποία αντανakλούν τη διαστρωμάτωση μεταξύ φυσικών εγκαταστάσεων, τοπικού ελέγχου και κεντρικής εποπτείας. Η πολυεπίπεδη αυτή προσέγγιση επιτρέπει τη σαφή κατανόηση της ροής πληροφορίας από το επίπεδο μέτρησης έως τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου και αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων αρχιτεκτονικών έξυπνων κτιρίων (Hildén, et al., 2022).

Το κατώτερο επίπεδο είναι το επίπεδο πεδίου, στο οποίο περιλαμβάνονται αισθητήρες και ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα φυσικών μεγεθών, όπως θερμοκρασία, κατανάλωση ενέργειας ή κατάσταση εξοπλισμού, ενώ οι ενεργοποιητές υ-

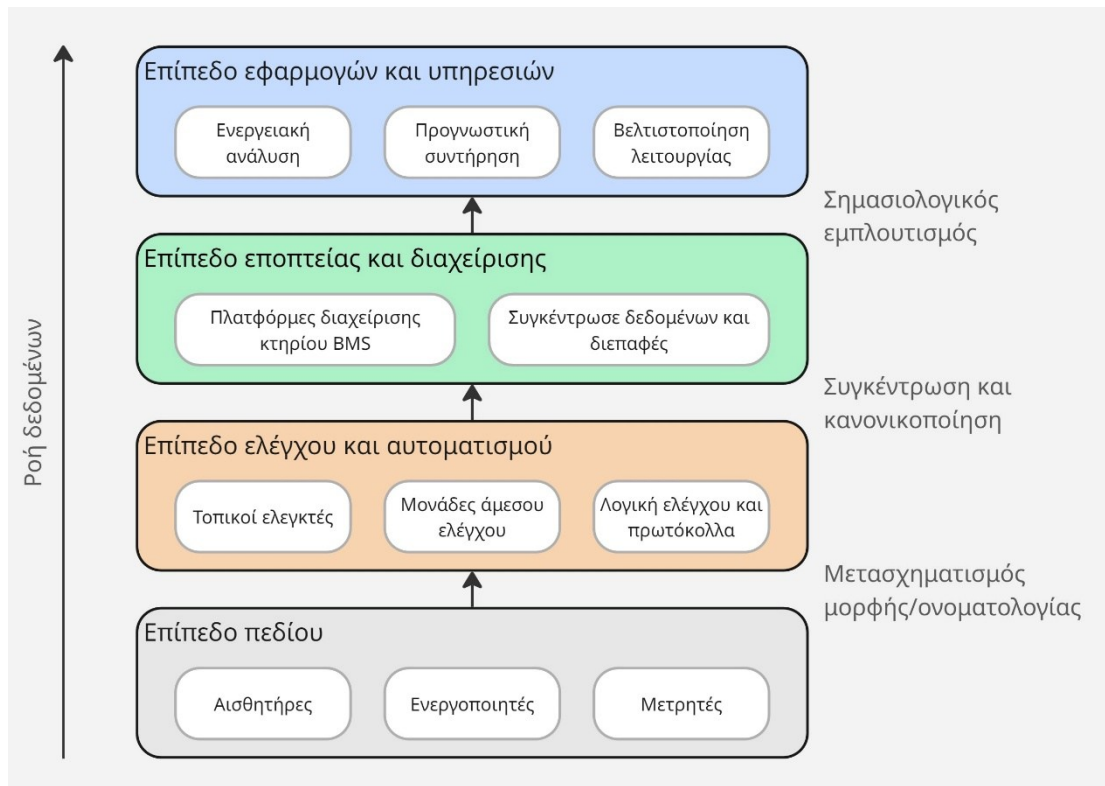
λοποιούν εντολές ελέγχου. Το επίπεδο αυτό αποτελεί την πηγή των πρωτογενών δεδομένων και συνδέεται άμεσα με τη φυσική λειτουργία του κτιρίου.

Το επόμενο επίπεδο είναι το επίπεδο ελέγχου ή επίπεδο αυτοματισμού, στο οποίο λειτουργούν τοπικοί ελεγκτές και μονάδες άμεσου ψηφιακού ελέγχου. Σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται η αρχική επεξεργασία των σημάτων, η εφαρμογή λογικών ελέγχου και η ανταλλαγή δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η ύπαρξη πολλαπλών πρωτοκόλλων και μοντέλων δεδομένων εντός του ίδιου κτιρίου αποτελεί χαρακτηριστικό της σύγχρονης ετερογένειας των εγκαταστάσεων (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Πάνω από το επίπεδο ελέγχου βρίσκεται το επίπεδο εποπτείας και διαχείρισης, στο οποίο συγκεντρώνονται δεδομένα από διαφορετικά υποσυστήματα και παρέχονται διεπαφές χρήστη για παρακολούθηση και ρύθμιση των παραγόντων αυτοματισμού. Στο επίπεδο αυτό λειτουργούν πλατφόρμες διαχείρισης κτιρίων και συστήματα συγκέντρωσης δεδομένων, τα οποία επιτρέπουν βασική ανάλυση και παραγωγή αναφορών (Alfalouji, et al., 2022).

Σύγχρονες προσεγγίσεις επεκτείνουν το μοντέλο αυτό με ένα επιπλέον επίπεδο εφαρμογών και υπηρεσιών, στο οποίο τα δεδομένα διατίθενται σε συστήματα ανάλυσης, ενεργειακής βελτιστοποίησης και πειραματισμού λειτουργίας. Σε αυτό το επίπεδο τα δεδομένα μετατρέπονται από απλές μετρήσεις σε εισροές για υπολογιστικά μοντέλα και αλγορίθμους βελτιστοποίησης (Malkawi, et al., 2023).

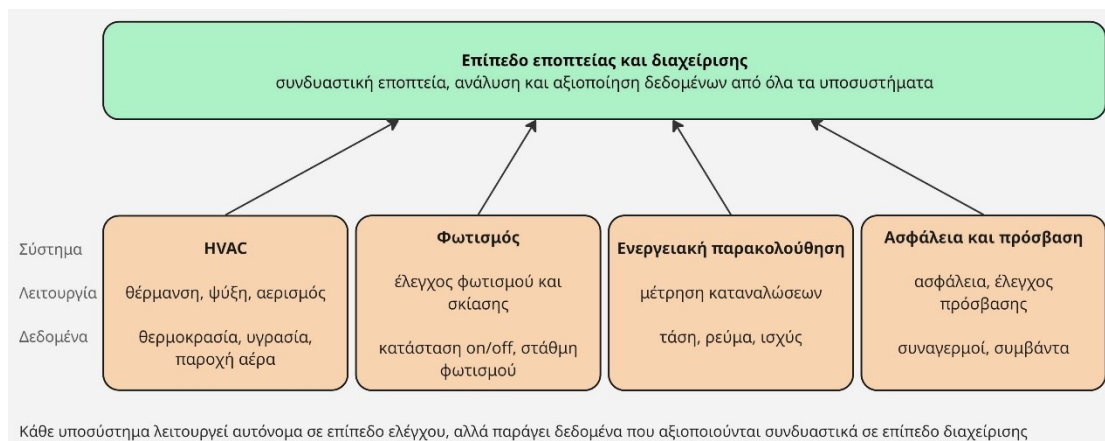
Η ροή πληροφορίας στα κτιριακά συστήματα είναι συνεπώς ανοδική και διαστρωματωμένη. Από τη μέτρηση στο επίπεδο πεδίου, στον τοπικό έλεγχο, στη συγκέντρωση και εποπτεία, και τελικά στην ανάλυση και αξιοποίηση. Σε κάθε μετάβαση μεταξύ επιπέδων πραγματοποιούνται μετασχηματισμοί μορφής, ονοματολογίας και δομής δεδομένων, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 1. Η κατανόηση αυτής της διαστρωμάτωσης αποτελεί προϋπόθεση για τον εντοπισμό των σημείων όπου απαιτείται ενοποίηση και κανονικοποίηση, όπως θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 1: Επίπεδα αρχιτεκτονικής κτιριακού αυτοματισμού και ανοδική ροή πληροφορίας.

1.3. Υποσυστήματα κτιρίου και παραδείγματα λειτουργιών

Ένα σύγχρονο έξυπνο κτίριο συγκροτείται από επιμέρους τεχνικά υποσυστήματα, τα οποία λειτουργούν αυτόνομα σε επίπεδο ελέγχου, αλλά παράγουν δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν συνδυαστικά σε επίπεδο διαχείρισης, όπως συνοψίζεται στην Εικόνα 2. Η δομή και η συμπεριφορά αυτών των υποσυστημάτων έχουν μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία των έξυπνων κτιρίων και των ενεργειακών συστημάτων (Dong, Cao, & Lee, 2005).



Εικόνα 2: Υποσυστήματα κτιρίου και διάθεση δεδομένων προς το επίπεδο διαχείρισης.

1.3.1. Σύστημα HVAC

Το σύστημα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού (HVAC) αποτελεί στα περισσότερα κτίρια το πλέον πολύπλοκο και ενεργειακά κυρίαρχο υποσύστημα, επηρεάζοντας

σημαντικά τόσο την κατανάλωση ενέργειας όσο και την άνεση των χρηστών. Περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής θερμότητας ή ψύξης, αντλίες, ανεμιστήρες, βαλβίδες, αισθητήρες, και ελεγκτές. Η λειτουργία του βασίζεται σε συνεχή ανάδραση από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ποιότητας αέρα, κλπ., ενώ τα δεδομένα που παράγονται είναι κυρίως αναλογικές τιμές, καταστάσεις λειτουργίας, και συναγερμοί (Afram & Janabi-Sharifi, 2014).

Στη βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι η βελτιστοποίηση HVAC μέσω δεδομένων απαιτεί συνεπή και δομημένη συλλογή μετρήσεων, γεγονός που καθιστά την ομοιόμορφη αναπαράσταση δεδομένων κρίσιμη για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης (Dong, Cao, & Lee, 2005).

1.3.2. Σύστημα φωτισμού

Σε αντίθεση με το HVAC, τα συστήματα φωτισμού χαρακτηρίζονται από απλούστερη λογική ελέγχου αλλά μεγαλύτερη διακριτότητα λειτουργίας. Οι βασικές μεταβλητές είναι κατά κανόνα δυαδικές (λειτουργία/μη λειτουργία) ή ποσοστιαίες (% λειτουργίας για φώτα/ μοτέρ, κλπ), ενώ η ενσωμάτωση αισθητήρων παρουσίας και φωτεινότητας εισάγει συμβάντα μικρής διάρκειας και μεταβαλλόμενες καταστάσεις χώρου. Η ενεργειακή διάσταση του φωτισμού καθίσταται σημαντική όταν η λειτουργία του προσαρμόζεται δυναμικά βάσει φυσικού φωτισμού και παρουσίας χρηστών, πρακτική που έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας χωρίς υποβάθμιση της άνεσης (Pandharipande & Caicedo, 2011).

Η ενσωμάτωση των δεδομένων φωτισμού σε ευρύτερα σχήματα διαχείρισης κτιρίου δεν αφορά μόνο την εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και την ορθότερη ερμηνεία της κατάστασης ενός χώρου, ιδίως όταν συνδυάζεται με πληροφορίες από άλλα υποσυστήματα.

1.3.3. Σύστημα ενεργειακής παρακολούθησης

Τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης λειτουργούν κυρίως ως μηχανισμοί καταγραφής και συσσώρευσης μετρήσεων. Παράγουν χρονοσειρές κατανάλωσης, ισχύος και συντελεστών απόδοσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για ανάλυση τάσεων και σύγκριση απόδοσης. Σε αντίθεση με τα συστήματα ελέγχου, εδώ η έμφαση μετατοπίζεται από τον άμεσο έλεγχο στη μακροχρόνια αξιολόγηση. Η ετερογένεια προκύπτει από τη χρήση διαφορετικών μετρητικών μονάδων, ρυθμών δειγματοληψίας και δομών καταγραφής.

Στη βιβλιογραφία αναγνωρίζεται ότι η αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση προϋποθέτει ενοποίηση δεδομένων από πολλαπλές πηγές και συστήματα, προκειμένου να

καταστεί δυνατή η εφαρμογή στρατηγικών βελτιστοποίησης και πρόγνωσης (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008).

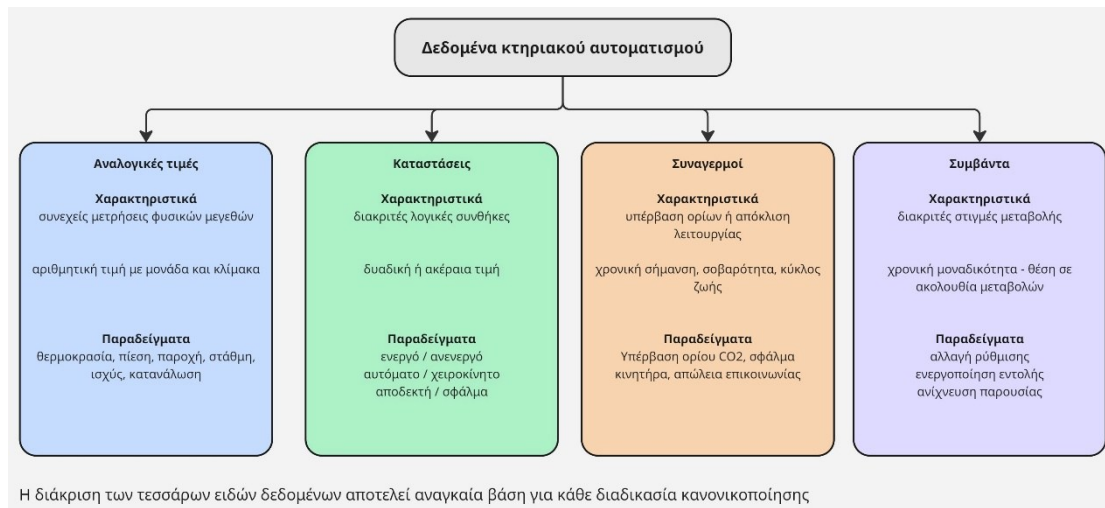
1.3.4. Συστήματα ασφαλείας και πρόσβασης

Τα συστήματα πυρανίχνευσης, συναγερμού, και ελέγχου πρόσβασης παράγουν κυρίως γεγονότα, συναγερμούς και δυαδικές καταστάσεις. Σε αντίθεση με τα ενεργειακά υποσυστήματα, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας και χρονικής ακριβείας. Τα δεδομένα τους συχνά διαχειρίζονται με διαφορετικά πρότυπα και αρχιτεκτονικές επικοινωνίας, ενισχύοντας την ετερογένεια σε επίπεδο κτιρίου (Massoud Amin & Wollenberg, 2005).

Παρά τη λειτουργική αυτονομία των επιμέρους υποσυστημάτων, η σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση κτιρίων βασίζεται στη διαλειτουργική αξιοποίηση των δεδομένων τους. Η αλληλεπίδραση μεταξύ HVAC, φωτισμού, ενεργειακής διαχείρισης και συστημάτων ασφαλείας συνθέτει ένα περιβάλλον ροής πληροφορίας στο οποίο συνυπάρχουν αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμοί και συμβάντα, και η ετερογένεια αυτή καθιστά αναγκαία την ύπαρξη δομημένων μηχανισμών ενοποίησης, προετοιμάζοντας το έδαφος για τη συστηματική ανάλυση των τύπων δεδομένων που ακολουθεί στην επόμενη ενότητα.

1.4. Τιμές, καταστάσεις, συναγερμοί και συμβάντα ως είδη δεδομένων

Η ετερογένεια των κτιριακών υποσυστημάτων δεν περιορίζεται στα πρωτόκολλα επικοινωνίας ή στις αρχιτεκτονικές διασύνδεσης, αλλά επεκτείνεται στη μορφή και στη σημασία των δεδομένων που παράγονται. Στη βιβλιογραφία των έξυπνων κτιρίων και της διαλειτουργικότητας έχει επισημανθεί ότι η δυσκολία ενοποίησης δεν προκύπτει μόνο από τεχνικές ασυμβατότητες, αλλά κυρίως από τη διαφορετική λογική κατηγοριοποίησης των δεδομένων (Balaji, et al., 2016). Παρά τις διαφοροποιήσεις, τα δεδομένα που συναντώνται σε ένα σύστημα κτιριακού αυτοματισμού μπορούν να διακριθούν σε βασικές κατηγορίες: αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμούς, και συμβάντα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. Η διάκριση αυτή αποτελεί αναγκαία βάση για οποιαδήποτε διαδικασία κανονικοποίησης.



Εικόνα 3: Τα τέσσερα είδη δεδομένων κτιριακού αυτοματισμού: αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμοί και συμβάντα.

1.4.1. Αναλογικές τιμές

Οι αναλογικές τιμές αντιστοιχούν σε συνεχείς μετρήσεις φυσικών μεγεθών που παράγονται από αισθητήρες και επιμέρους υποσυστήματα του κτιρίου. Πρόκειται για μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η παροχή, η στάθμη, η ισχύς ή η κατανάλωση ενέργειας, οι οποίες εκφράζονται αριθμητικά και συνοδεύονται από συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης και κλίμακα αναφοράς. Η ερμηνεία τους δεν περιορίζεται στην αριθμητική τιμή, αλλά συνδέεται άμεσα με τη φυσική διάσταση που αποτυπώνουν και με το σημείο του συστήματος στο οποίο αναφέρονται. Όπως έχει επισημανθεί στη βιβλιογραφία μοντελοποίησης κτιριακών συστημάτων, η αποσύνδεση της μέτρησης από τα σχετικά μεταδεδομένα, όπως η μονάδα ή το πλαίσιο αναφοράς, μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά τη μεταφορά της πληροφορίας μεταξύ επιπέδων αρχιτεκτονικής (Wetter, Zuo, Nouidui, & Pang, 2014).

Στην πράξη, οι τιμές αυτές τροφοδοτούν αλγορίθμους ελέγχου, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ενεργειακών δεικτών, και υποστηρίζουν διαδικασίες αξιολόγησης απόδοσης. Η ποιότητα και η συνέπειά τους επηρεάζουν άμεσα τόσο τη σταθερότητα των βρόχων ελέγχου όσο και την αξιοπιστία των αναφορών. Όταν τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικά πρωτόκολλα ή κατασκευαστές, εμφανίζονται διαφοροποιήσεις ως προς τις μονάδες, την κλιμάκωση, την ακρίβεια, ή τον ρυθμό δειγματοληψίας. Σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις συγκεντρώνονται χωρίς κοινή αναφορά σε αυτά τα στοιχεία, η σύγκριση τιμών γίνεται αβέβαιη, και οι παραγόμενοι δείκτες ενδέχεται να βασίζονται σε μη ισοδύναμα μεγέθη. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ανάλυση απόδοσης και η εποπτεία λειτουργίας στηρίζονται σε δεδομένα των οποίων η φυσική σημασία δεν αποδίδεται με απόλυτη συνέπεια μεταξύ των επιπέδων του συστήματος.

1.4.2. Καταστάσεις

Στη λειτουργία ενός κτιρίου, η συμπεριφορά των υποσυστημάτων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από διακριτές λογικές συνθήκες. Οι καταστάσεις επηρεάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ελεγκτών, επιτρέπουν ή αναστέλλουν ακολουθίες ενεργειών και ενεργοποιούν μηχανισμούς ασφαλείας. Η λειτουργική τους σημασία προηγείται της τεχνικής τους μορφής.

Σε αντίθεση με τις αναλογικές τιμές, δεν αποτυπώνουν φυσικό μέγεθος αλλά θέση μέσα σε ένα σύνολο επιτρεπόμενων λειτουργιών, όπως ενεργό ή ανενεργό, αυτόματο ή χειροκίνητο, κανονική λειτουργία ή σφάλμα. Η αναπαράστασή τους πραγματοποιείται συνήθως μέσω δυαδικών ή ακέραιων τιμών. Η σημασία, ωστόσο, δεν ενσωματώνεται ρητά στο ίδιο το δεδομένο, αλλά αποδίδεται από τη λογική του συστήματος που το παράγει.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η ασάφεια στην ερμηνεία τέτοιων καταστάσεων αποτελεί εμπόδιο στη διαλειτουργικότητα, καθώς η ίδια τεχνική τιμή μπορεί να αποκτά διαφορετικό λειτουργικό νόημα ανάλογα με το περιβάλλον εφαρμογής (Balaji, et al., 2016).

Όταν δεδομένα συγκεντρώνονται από πολλαπλά υποσυστήματα, η ομοιομορφία στη μορφή δεν εγγυάται ισοδυναμία στη σημασία. Σε επίπεδο συνολικής διαχείρισης, μια ένδειξη μπορεί να εμφανίζεται τυπικά ίδια, ενώ στην πράξη υποδηλώνει διαφορετική επιχειρησιακή συνθήκη, ανάλογα με την προέλευσή της.

1.4.3. Συναγερμοί

Η εμφάνιση συναγερμού σε ένα κτιριακό σύστημα υποδηλώνει ότι μια παράμετρος έχει υπερβεί προκαθορισμένα όρια, ή ότι η λειτουργία έχει αποκλίνει από την κανονική της κατάσταση. Το γεγονός αυτό δεν αποτυπώνεται ως απλή δυαδική ένδειξη, αλλά συνοδεύεται από χρονική πληροφορία, και συχνά από κατηγοριοποίηση σοβαρότητας ή προτεραιότητας. Σε αντίθεση με τις απλές καταστάσεις, οι συναγερμοί εντάσσονται σε ακολουθία ενεργειών που περιλαμβάνει καταγραφή, ενδεχόμενη επιβεβαίωση, και τελική αποκατάσταση.

Η λειτουργική τους σημασία συνδέεται με διαδικασίες διαχείρισης, ειδοποίησης και τεκμηρίωσης. Όταν τέτοιες εγγραφές συγκεντρώνονται από πολλαπλά υποσυστήματα, οι διαφορές στον τρόπο ορισμού και χειρισμού του κύκλου ζωής καθίστανται κρίσιμες. Όπως καταγράφεται σε μελέτες σύγχρονων πλατφορμών δεδομένων κτιρίων, η έλλειψη ομοιογενούς δομής για τη χρονική σήμανση και την επιβεβαίωση επηρεάζει τη συνεκτικότητα της εποπτείας και τη δυνατότητα ανάλυσης συμβάντων σε ενοποιημένο περιβάλλον (Hildén, et al., 2022).

Σε επίπεδο συνολικής διαχείρισης, το ίδιο λειτουργικό γεγονός ενδέχεται να εμφανίζεται με διαφορετική μορφή ή στάδιο εξέλιξης, ανάλογα με το σύστημα προέλευσης. Μια ένδειξη μπορεί να καταγράφεται ως ενεργός συναγερμός σε ένα περιβάλλον, και ως απλή ειδοποίηση σφάλματος σε άλλο, ακολουθώντας διαφορετική διαδικασία αποκατάστασης. Η διαφοροποίηση αυτή περιορίζει τη δυνατότητα αξιόπιστης συσχέτισης και αξιολόγησης των δεδομένων όταν αυτά εντάσσονται σε κοινό πλαίσιο εποπτείας.

1.4.4. Συμβάντα

Η λειτουργία ενός κτιρίου δεν εξελίσσεται μόνο μέσω συνεχών μετρήσεων ή σταθερών καταστάσεων, αλλά και μέσω διακριτών στιγμών μεταβολής. Σε αυτές τις περιπτώσεις καταγράφονται συμβάντα, δηλαδή εγγραφές που αποτυπώνουν ενέργειες ή αλλαγές, όπως η τροποποίηση μιας ρύθμισης, η ενεργοποίηση εντολής, ή η ανίχνευση παρουσίας. Τα συμβάντα δεν εκφράζουν φυσικό μέγεθος ούτε περιγράφουν διαρκή κατάσταση, αλλά χαρακτηρίζονται από τη χρονική τους μοναδικότητα.

Η σημασία τους προκύπτει από τη θέση τους μέσα στην ακολουθία λειτουργικών μεταβάσεων. Στην πράξη, επηρεάζουν τη συμπεριφορά των υποσυστημάτων και λειτουργούν ως σημεία μετάβασης εντός της συνολικής επιχειρησιακής λογικής. Σε αρχιτεκτονικές που βασίζονται σε ανάλυση και βελτιστοποίηση, η συσχέτιση συμβάντων με μετρήσεις και καταστάσεις επιτρέπει την κατανόηση αιτιώδους σχέσης και απόδοσης (Malkawi, et al., 2023).

Όταν όμως η χρονική σήμανση, η ταυτότητα προέλευσης, ή η κατηγοριοποίηση τύπου ενέργειας διαφοροποιούνται μεταξύ επιμέρους συστημάτων, η ανασύνθεση των αλληλουχιών καθίσταται ασταθής. Η δυνατότητα κατανόησης σχέσεων μεταξύ γεγονότων περιορίζεται τότε από τις τεχνολογικές ιδιαιτερότητες της πηγής καταγραφής.

1.5. Γιατί η ενοποίηση δεδομένων αποτελεί προϋπόθεση αξιοποίησης από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου

Οι εφαρμογές ανώτερου επιπέδου σε έξυπνα κτίρια, όπως η ενεργειακή ανάλυση, η βελτιστοποίηση στρατηγικών ελέγχου, η προγνωστική συντήρηση, και τα συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης εγκαταστάσεων, βασίζονται σε δεδομένα που θεωρούνται συγκρίσιμα και σημασιολογικά συνεπή. Η λειτουργία τους δεν περιορίζεται στη συλλογή τιμών, αλλά προϋποθέτει ότι τα δεδομένα μπορούν να ερμηνευθούν με ομοιόμορφο τρόπο, ανεξάρτητα από το σύστημα προέλευσης και η απλή διασύνδεση ετερογενών πρωτοκόλλων δεν αρκεί για την επίτευξη αυτής της συνέπειας.

Όταν οι μετρήσεις, οι καταστάσεις και τα συμβάντα διατηρούν τις επιμέρους τεχνολογικές τους ιδιαιτερότητες, η ανώτερη επεξεργασία απαιτεί ειδική γνώση για κάθε υποσύστημα με αποτέλεσμα την αυξημένη πολυπλοκότητα λογισμικού, και την περιορι-

σμένη επαναχρησιμοποίηση εφαρμογών σε διαφορετικά έργα. Η ανάγκη για κοινό σημασιολογικό υπόβαθρο έχει αναδειχθεί στη βιβλιογραφία μεταδεδομένων κτιρίων, όπου η απουσία ενιαίας αναφοράς θεωρείται βασικός περιορισμός για την αυτοματοποιημένη αξιοποίηση δεδομένων (Balaji, et al., 2016).

Η ανάλυση απόδοσης, και η διασταύρωση δεδομένων προϋποθέτουν επίσης κοινή χρονική αναφορά, και συνεπή κατηγοριοποίηση. Σε περιβάλλοντα όπου η δομή των δεδομένων διαφοροποιείται ανάλογα με τον κατασκευαστή ή το πρωτόκολλο, η σύγκριση μεταξύ εγκαταστάσεων, ή ακόμη και μεταξύ υποσυστημάτων του ίδιου κτιρίου καθίσταται ασταθής. Η αποτελεσματική ανάλυση και βελτιστοποίηση απαιτούν ομοιογενές επίπεδο αναπαράστασης πριν από την εφαρμογή αλγορίθμων επεξεργασίας (Malkawi, et al., 2023).

Η σημασιολογική διαλειτουργικότητα έχει προταθεί ως κρίσιμος παράγοντας για την κλιμάκωση λύσεων σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις, ακριβώς επειδή μειώνει την εξάρτηση από διαφορετικές και επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών με γενικευμένη λογική (Dawson-Haggerty, Jiang, Tolle, Ortiz, & Culler, 2010). Παρόμοια, τα διεθνή πρότυπα για συστήματα αυτοματισμού κτιρίων υπογραμμίζουν τη σημασία σαφούς ορισμού δομών δεδομένων και λειτουργικών εννοιών για τη διασφάλιση διαλειτουργικότητας (International Organization for Standardization, 2005).

Υπό αυτές τις συνθήκες, η ενοποίηση δεδομένων δεν αντιμετωπίζεται ως συμπληρωματική τεχνική επιλογή αλλά ως δομική προϋπόθεση. Η δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών που λειτουργούν με συνέπεια, συγκρισιμότητα, και φορητότητα εξαρτάται από την ύπαρξη κοινού επιπέδου αναφοράς, στο οποίο οι πληροφορίες έχουν ήδη αποδεσμευθεί από τις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας παραγωγής τους.

2. Συστήματα πεδίου και επικοινωνία σε κτιριακές υποδομές

Η τεχνική υποδομή ενός σύγχρονου κτιρίου συγκροτείται από επιμέρους συστήματα πεδίου που αναλαμβάνουν εξειδικευμένες λειτουργίες, όπως έλεγχο κλιματισμού, διαχείριση φωτισμού, πυρανίχνευση, έλεγχο πρόσβασης και παρακολούθηση ενεργειακών μεγεθών. Τα συστήματα αυτά παράγουν δεδομένα που περιγράφουν μετρήσεις, καταστάσεις, συναγερμούς, και συμβάντα, τα οποία αποτελούν τη βάση για την εποπτεία και τον λειτουργικό έλεγχο. Η ανταλλαγή της πληροφορίας πραγματοποιείται μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας που καθορίζουν τη δομή, την κωδικοποίηση και τους μηχανισμούς πρόσβασης στα δεδομένα, όπως ορίζεται στα πρότυπα συστημάτων αυτοματισμού κτιρίων (International Organization for Standardization, 2005).

Η επικοινωνία σε κτιριακές εγκαταστάσεις, πέρα από τη φυσική διασύνδεση συσκευών, περιλαμβάνει τον τρόπο με τον οποίο ορίζονται αντικείμενα, ιδιότητες και σχέσεις μεταξύ των δεδομένων, επηρεάζοντας άμεσα τη δυνατότητα ερμηνείας σε επίπεδο εφαρμογών. Η σημασιολογική διάσταση της ανταλλαγής πληροφορίας έχει αναδειχθεί ως κρίσιμος παράγοντας για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συστημάτων (Balaji, et al., 2016).

Σε πραγματικές εγκαταστάσεις, διαφορετικά συστήματα με διακριτές τεχνολογικές αφετηρίες συνυπάρχουν στο ίδιο κτίριο. Η ετερογένεια αυτή αφορά τόσο το επίπεδο μετάδοσης όσο και τη δομή και σημασία των δεδομένων. Η επικοινωνιακή συμβατότητα δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη και εννοιολογική συνέπεια, γεγονός που επηρεάζει τη δυνατότητα συγκέντρωσης και αξιοποίησης πληροφορίας σε ανώτερα επίπεδα αρχιτεκτονικής.

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών των συστημάτων πεδίου και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας αποτελεί συνεπώς απαραίτητο υπόβαθρο για τη θεμελίωση αρχιτεκτονικής κανονικοποίησης δεδομένων, η οποία αποσκοπεί στη γεφύρωση των διαφοροποιήσεων που προκύπτουν από την τεχνολογική πολυμορφία των εγκαταστάσεων.

2.1. Τι είναι σύστημα πεδίου και τι είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας

Τα συστήματα πεδίου συνιστούν το κατώτερο λειτουργικό επίπεδο των κτιριακών αυτοματισμών και περιλαμβάνουν αισθητήρες, ενεργοποιητές και τοπικούς ελεγκτές που αλληλοεπιδρούν άμεσα με τις φυσικές διεργασίες του κτιρίου. Στο επίπεδο αυτό παράγονται τα πρωτογενή δεδομένα λειτουργίας, όπως αναλογικές μετρήσεις, λογικές καταστάσεις, συναγερμοί, και συμβάντα, τα οποία αποτυπώνουν σε πραγματικό χρόνο τη συμπεριφορά των τεχνικών εγκαταστάσεων. Η αξία των δεδομένων αυτών έγκειται στη στιγμιαία απεικόνιση της λειτουργικής κατάστασης και στη χρήση τους ως βάση για έλεγχο, εποπτεία και αξιολόγηση απόδοσης σε ανώτερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής κτιριακού αυτοματισμού (International Organization for Standardization, 2005).

Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών πεδίου και των συστημάτων εποπτείας υλοποιείται μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

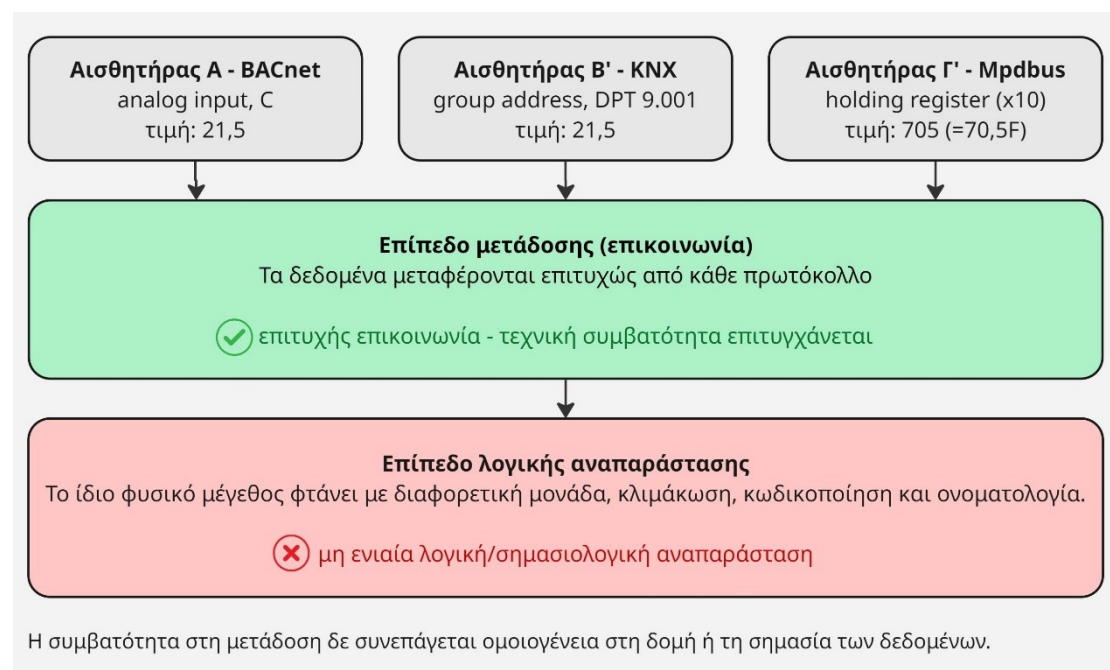
Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας ορίζει το σύνολο των κανόνων που διέπουν τη δομή, την κωδικοποίηση, τη διευθυνσιοδότηση, και τη μετάδοση των δεδομένων, καθώς και τους μηχανισμούς ανάγνωσης και εγγραφής πληροφορίας. Μέσω αυτών των κανόνων διασφαλίζεται ότι οι συμμετέχουσες οντότητες μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα με τεχνική συνέπεια, ακόμη και όταν προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές ή τεχνολογικές πλατφόρμες. Στις κτιριακές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ευρέως πρωτόκολλα όπως τα BACnet, KNX, Modbus και MQTT, τα οποία ενσωματώνουν διαφο-

ρετικά μοντέλα αναπαράστασης δεδομένων και διαφορετικές αρχιτεκτονικές επικοινωνίας (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Η διάκριση μεταξύ συστήματος πεδίου και πρωτοκόλλου επικοινωνίας είναι εννοιολογικά κρίσιμη. Το σύστημα πεδίου αναφέρεται στις φυσικές και λογικές οντότητες που παράγουν, επεξεργάζονται ή εκτελούν δεδομένα. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας αφορά το μέσο και τους κανόνες μέσω των οποίων τα δεδομένα αυτά καθίστανται προσβάσιμα σε άλλα επίπεδα της αρχιτεκτονικής.

Σε ένα πραγματικό κτίριο, η συνύπαρξη πολλαπλών συστημάτων πεδίου, συχνά βασισμένων σε διαφορετικά πρωτόκολλα και εσωτερικές δομές δεδομένων, δημιουργεί ένα σύνθετο περιβάλλον ανταλλαγής πληροφορίας. Η τεχνική συμβατότητα μετάδοσης δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη ομοιογένεια ως προς τη δομή ή τη σημασία των δεδομένων, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 4. Το γεγονός αυτό επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα ενοποίησης και αξιοποίησης της πληροφορίας σε επίπεδο εφαρμογών (Malkawi, et al., 2023).

Η κατανόηση των δύο εννοιών αποτελεί συνεπώς απαραίτητη θεωρητική βάση για την ανάλυση της ετερογένειας των εγκαταστάσεων και των ασυνεπειών που αυτή εισάγει στα δεδομένα, ζήτημα που εξετάζεται στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 4: Διάκριση μεταξύ επιτυχούς επικοινωνίας και ενιαίας λογικής αναπαράστασης.

2.2. Ετερογένεια εγκαταστάσεων και ασυνέπειες στα δεδομένα

Η σύνθεση υποσυστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών, τεχνολογικών γενεών και σχεδιαστικών προσεγγίσεων, που περιγράφηκε στην εισαγωγή ως δομικό χαρακτηριστικό των εγκαταστάσεων, εκδηλώνεται σε τρία διακριτά επίπεδα ασυνέπειας στα ίδια τα δεδομένα.

Η ετερογένεια αυτή εκτείνεται πέρα από το φυσικό επίπεδο επικοινωνίας. Περιλαμβάνει διαφορετικά πρωτόκολλα, διαφορετικούς μηχανισμούς διευθυνσιοδότησης και διακριτές εσωτερικές δομές δεδομένων.

Σε επίπεδο αναπαράστασης της πληροφορίας, τα συστήματα μπορεί να βασίζονται είτε σε αντικειμενοστραφή μοντέλα με ορισμένες ιδιότητες και σχέσεις, είτε σε απλή αντιστοίχιση καταχωρητών χωρίς εγγενή σημασιολογική περιγραφή. Η ίδια φυσική ποσότητα είναι δυνατόν να εκφράζεται με διαφορετικές μονάδες, διαφορετική κλιμάκωση, ή διαφορετική ακρίβεια. Αντίστοιχα, λειτουργικές καταστάσεις και συναγερμοί αποδίδονται μέσω ετερογενών κωδικοποιήσεων, επηρεάζοντας τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης. Έχει τεκμηριωθεί ότι η απουσία κοινής δομής και ορολογίας περιορίζει την αυτοματοποιημένη αξιοποίηση δεδομένων σε ενοποιημένες πλατφόρμες κτιριακών συστημάτων (Balaji, et al., 2016).

Οι ασυνέπειες που προκύπτουν αφορούν τόσο τη μορφή όσο και το λειτουργικό πλαίσιο της πληροφορίας. Αριθμητικά συγκρίσιμες τιμές ενδέχεται να αναφέρονται σε διαφορετικά σημεία μέτρησης ή να ενσωματώνουν διαφορετικές παραδοχές λειτουργίας. Η συγκεντρωτική ανάλυση απαιτεί, συνεπώς, πρόσθετη προσαρμοστική λογική ανά υποσύστημα, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα και περιορίζοντας τη φορητότητα των εφαρμογών.

Σε περιβάλλον τεχνολογικής πολυμορφίας, η επικοινωνιακή διασύνδεση δεν εξαλείφει τις διαφοροποιήσεις στο επίπεδο των δεδομένων. Η ετερογένεια εγκαταστάσεων αποτελεί δομικό χαρακτηριστικό των πραγματικών κτιριακών υποδομών και συνδέεται άμεσα με την εμφάνιση ασυνεπειών που απαιτούν συστηματική αρχιτεκτονική αντιμετώπιση.

2.3. Απαιτήσεις επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων

Η ανταλλαγή δεδομένων σε κτιριακές υποδομές αποτελεί βασική λειτουργική απαίτηση της αρχιτεκτονικής. Τα συστήματα πεδίου, τα επίπεδα εποπτείας, και οι εφαρμογές ανάλυσης εξαρτώνται από συνεχή ροή πληροφορίας, η οποία πρέπει να είναι διαθέσιμη, χρονικά συνεπής και τεχνικά αξιόπιστη. Η επικοινωνία καθορίζει άμεσα τη δυνατότητα ελέγχου, καταγραφής και αξιολόγησης της λειτουργίας.

Σε επίπεδο μετάδοσης, οι υποδομές οφείλουν να διασφαλίζουν επαρκή ρυθμό επικοινωνίας, προβλέψιμη καθυστέρηση, και ανθεκτικότητα σε σφάλματα. Εφαρμογές αυτοματισμού που βασίζονται σε κλειστούς βρόχους ελέγχου προϋποθέτουν σταθερό χρονικό συγχρονισμό και συνεπή ενημέρωση μεταβλητών, ενώ οι αποκλίσεις στη χρονική σήμανση, ή απώλεια δεδομένων επηρεάζουν τη σταθερότητα του ελέγχου και την α-

ξιοπιστία της εποπτείας, όπως καταγράφεται στα πρότυπα συστημάτων αυτοματισμού κτιρίων (International Organization for Standardization, 2005).

Η αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων προϋποθέτει συνεπή δομή και σαφή ορισμό των μεταβλητών που μεταδίδονται. Οι μετρήσεις πρέπει να συνοδεύονται από σαφή ορισμό μονάδων και κλίμακας, και οι καταστάσεις, οι συναγερμοί και τα συμβάντα πρέπει να εντάσσονται σε σχήμα που επιτρέπει ερμηνεία χωρίς εξάρτηση από το πρωτόκολλο προέλευσης. Η απουσία κοινής δομής περιορίζει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης αξιοποίησης και συσχέτισης της πληροφορίας σε ενοποιημένα περιβάλλοντα, όπως έχει τεκμηριωθεί σε μελέτες σημασιολογικής μοντελοποίησης κτιρίων (Balaji, et al., 2016).

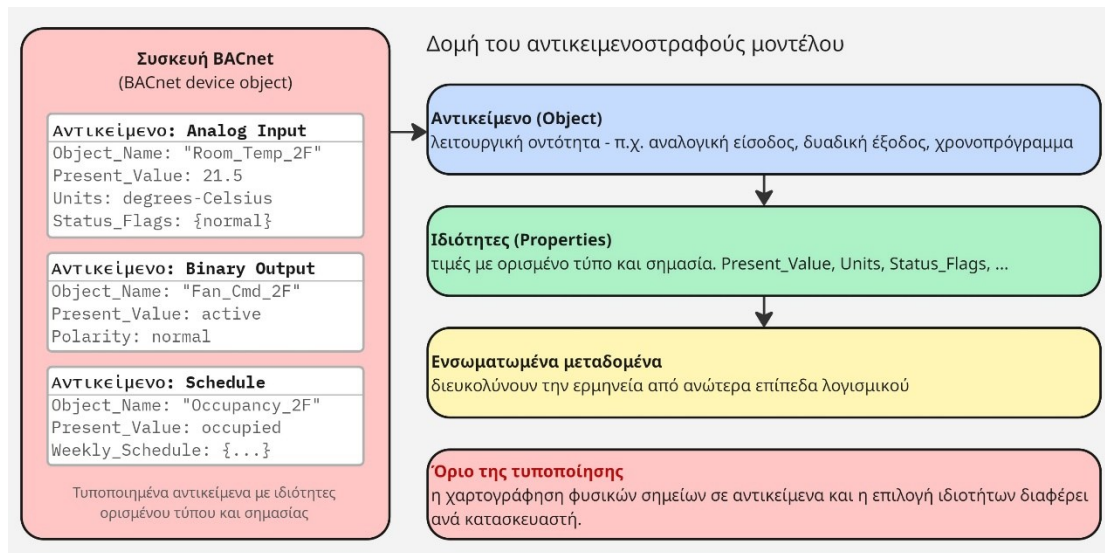
Οι σύγχρονες κτιριακές εγκαταστάσεις ενσωματώνουν επίσης απαιτήσεις κλιμάκωσης και διασύνδεσης με εξωτερικές υπηρεσίες αποθήκευσης και ανάλυσης δεδομένων, και έτσι η επικοινωνία πρέπει να υποστηρίζει μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης και ασφαλούς μετάδοσης, ιδίως όταν η πληροφορία διακινείται εκτός του τοπικού δικτύου. Η διαλειτουργικότητα και η ασφαλής ενσωμάτωση δεδομένων αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για την αξιοποίηση προηγμένων αναλυτικών λειτουργιών (Malkawi, et al., 2023), (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Οι απαιτήσεις επικοινωνίας σε κτιριακές υποδομές αφορούν συνεπώς τόσο τη φυσική και χρονική αξιοπιστία της μετάδοσης όσο και τη δομική και σημασιολογική συνέπεια της πληροφορίας. Το πλαίσιο αυτό καθορίζει τα κριτήρια με τα οποία εξετάζονται τα επιμέρους πρωτόκολλα επικοινωνίας στις επόμενες ενότητες.

2.4. Πρωτόκολλο επικοινωνίας BACnet

Το BACnet αποτελεί διεθνώς καθιερωμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας για συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου κτιρίων και έχει αναπτυχθεί με σκοπό τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών. Τυποποιήθηκε αρχικά από την ASHRAE ως ANSI ASHRAE Standard 135 και έχει υιοθετηθεί ως διεθνές πρότυπο ISO 16484-5, γεγονός που του προσδίδει ευρεία αποδοχή σε εφαρμογές HVAC, διαχείρισης ενέργειας και εποπτείας τεχνικών εγκαταστάσεων (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2024) (International Organization for Standardization, 2022).

Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, το BACnet βασίζεται σε αντικειμενοστραφές μοντέλο δεδομένων, όπου οι πληροφορίες οργανώνονται σε αντικείμενα, τα οποία περιλαμβάνουν ιδιότητες με σαφώς ορισμένο τύπο και σημασία, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Αντικειμενοστραφές μοντέλο δεδομένων του BACnet.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την περιγραφή λειτουργικών οντοτήτων όπως αναλογικές εισοδοί, δυαδικές εξοδοί, ή χρονοπρογράμματα, ενσωματώνοντας μεταδεδομένα που διευκολύνουν την ερμηνεία τους από ανώτερα επίπεδα λογισμικού. Η ύπαρξη τυποποιημένων αντικειμένων συμβάλλει στη δομική συνέπεια της πληροφορίας, χωρίς να εξαλείφει πλήρως διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με επιλογές υλοποίησης ανά κατασκευαστή.

Το πρωτόκολλο υποστηρίζει διαφορετικά μέσα μετάδοσης και επίπεδα δικτύωσης, συμπεριλαμβανομένων υποδομών IP, στοιχείο που επιτρέπει την ενσωμάτωσή του σε σύγχρονες αρχιτεκτονικές κτιριακών δικτύων, επιπρόσθετα, παρέχει μηχανισμούς ανακάλυψης συσκευών, ανάγνωσης και εγγραφής ιδιοτήτων, καθώς και υπηρεσίες διαχείρισης συναγερμών και καταγραφής συμβάντων. Οι λειτουργίες αυτές επιτρέπουν την ανάπτυξη συστημάτων εποπτείας που έχουν πρόσβαση σε δομημένη πληροφορία χωρίς άμεση εξάρτηση από εσωτερικές λεπτομέρειες υλοποίησης.

Παρά την τυποποίηση του αντικειμενοστραφούς μοντέλου, η πρακτική εφαρμογή του BACnet σε ετερογενείς εγκαταστάσεις αποκαλύπτει διαφοροποιήσεις ως προς την επιλογή ιδιοτήτων, τη χρήση προαιρετικών υπηρεσιών, και τη χαρτογράφηση φυσικών σημείων σε αντικείμενα. Οι αποκλίσεις αυτές επηρεάζουν τη συγκρισιμότητα και απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία όταν τα δεδομένα συγκεντρώνονται σε ενιαίο περιβάλλον. Μελέτες που εξετάζουν τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα σε κτιριακά συστήματα έχουν επισημάνει ότι η ύπαρξη τυποποιημένου πρωτοκόλλου δεν εξασφαλίζει από μόνη της ενιαία σημασιολογική ερμηνεία (Balaji, et al., 2016), (Domingues, Carreira, Vieira, & Kastner, 2016).

Το BACnet παρέχει δομημένο πλαίσιο ανταλλαγής δεδομένων, το οποίο διευκολύνει τη συγκέντρωση πληροφορίας σε επίπεδο κτιρίου. Ωστόσο, η αξιοποίηση των δεδομέ-

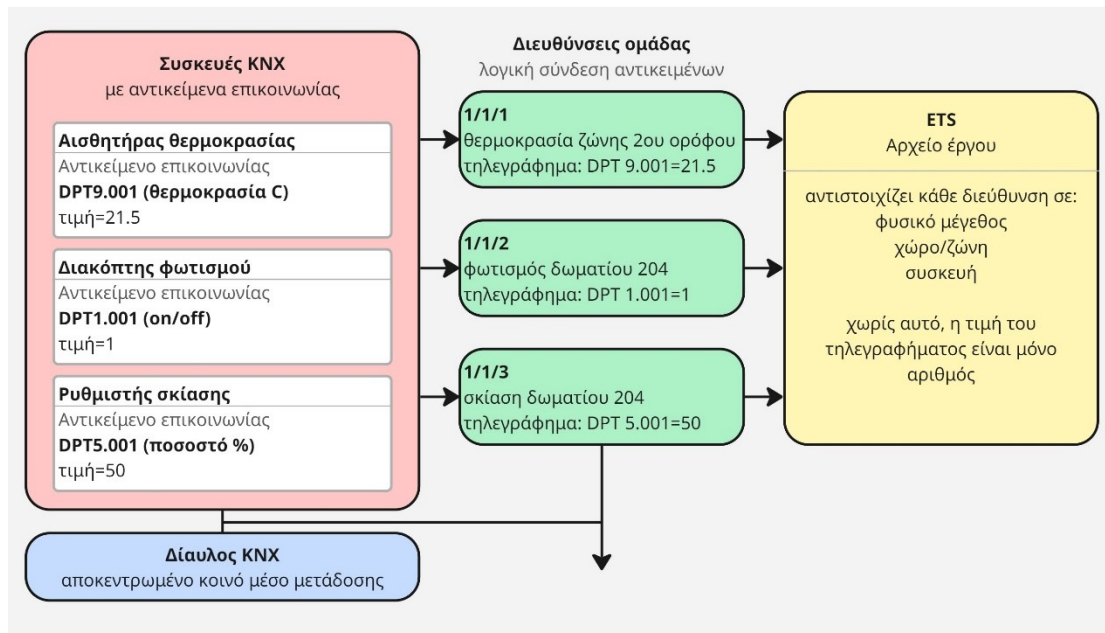
νων σε εφαρμογές ανάλυσης και ενοποίησης προϋποθέτει συνεπή χαρτογράφηση των αντικειμένων και των ιδιοτήτων τους, ιδίως όταν η εγκατάσταση περιλαμβάνει συσκευές διαφορετικών γενεών ή διαφορετικής παραμετροποίησης.

2.5. Πρωτόκολλο επικοινωνίας KNX

Το KNX αποτελεί ευρωπαϊκό πρότυπο για τον έλεγχο κτιριακών εγκαταστάσεων και έχει αναπτυχθεί με έμφαση στην αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική και στη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών. Η τεχνολογία τυποποιείται σε διεθνές επίπεδο μέσω της σειράς προτύπων ISO 14543 και χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές φωτισμού, σκίασης, ελέγχου HVAC μικρής και μεσαίας κλίμακας, καθώς και σε συστήματα διαχείρισης χώρων (International Organization for Standardization, 2006). Σε αντίθεση με πρωτόκολλα που βασίζονται σε έντονα αντικειμενοστραφή μοντέλα, το KNX οργανώνει την επικοινωνία γύρω από ομάδες διευθύνσεων και δομές δεδομένων καθορισμένου μήκους, το οποίο επηρεάζει τον τρόπο αναπαράστασης και ερμηνείας της πληροφορίας σε ανώτερα επίπεδα.

Σε αρχιτεκτονικό επίπεδο, το KNX στηρίζεται σε αποκεντρωμένη λογική, όπου κάθε συσκευή ενσωματώνει τη δική της λειτουργική νοημοσύνη, και ανταλλάσσει πακέτα δεδομένων στο δίκτυο χωρίς κεντρικό ελεγκτή ως απαραίτητη οντότητα. Η πληροφορία μεταδίδεται μέσω group addresses, οι οποίες λειτουργούν ως λογικά κανάλια επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρων και ενεργοποιητών. Η δομή αυτή διευκολύνει την υλοποίηση απλών και αξιόπιστων λειτουργιών ελέγχου, ιδίως σε εφαρμογές φωτισμού και σκίασης, όπου οι μεταβλητές είναι κατά κύριο λόγο δυαδικές ή ποσοστιαίες.

Ωστόσο, η αναπαράσταση δεδομένων στο KNX βασίζεται σε προκαθορισμένους τύπους δεδομένων σταθερού μεγέθους, οι οποίοι δεν συνοδεύονται από εκτεταμένα μεταδεδομένα ως προς τη σημασιολογική τους ταυτότητα. Η ίδια αριθμητική τιμή μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικό φυσικό μέγεθος, εφόσον η σημασία της καθορίζεται εξωτερικά από τη διαμόρφωση του έργου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Το χαρακτηριστικό αυτό ενισχύει την ανάγκη τεκμηριωμένης χαρτογράφησης όταν τα δεδομένα πρόκειται να συγκεντρωθούν σε ενοποιημένο περιβάλλον, καθώς η τεχνική μετάδοση δεν ενσωματώνει ρητή περιγραφή του λειτουργικού πλαισίου (Balaji, et al., 2016).



Εικόνα 6: Αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική του KNX

Σε εγκαταστάσεις όπου το KNX συνυπάρχει με άλλα πρωτόκολλα, η ετερογένεια εντοπίζεται κυρίως στη διαφορετική φιλοσοφία μοντελοποίησης. Ενώ σε αντικειμενοστραφή περιβάλλοντα, όπως έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα για το BACnet, τα σημεία συνοδεύονται από ιδιότητες και τυποποιημένα αντικείμενα, στο KNX η λογική δομή προκύπτει από τη διαμόρφωση των group addresses και από το αρχείο παραμετροποίησης του έργου. Κατά συνέπεια, η μετάβαση σε ενιαίο επίπεδο αναπαράστασης απαιτεί ανακατασκευή της λογικής οργάνωσης των δεδομένων με τρόπο που να αποδεσμεύεται από τη συγκεκριμένη τοπολογία του έργου.

Από πλευράς ενοποίησης δεδομένων, το KNX προσφέρει σταθερή και αξιόπιστη επικοινωνία σε επίπεδο πεδίου, αλλά δεν παρέχει εγγενή μηχανισμό σημασιολογικής περιγραφής. Η αξιοποίηση των δεδομένων του σε εφαρμογές ανώτερου επιπέδου προϋποθέτει εξωτερικό ορισμό μεταδεδομένων, αντιστοίχιση φυσικών μεγεθών και κανονικοποίηση μονάδων και κλιμάκωσης. Υπό το πρίσμα της αρχιτεκτονικής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, το KNX αναδεικνύει με σαφήνεια τη διάκριση μεταξύ επιτυχούς επικοινωνίας και δομικής ενοποίησης, επιβεβαιώνοντας ότι η διαλειτουργικότητα σε επίπεδο μετάδοσης δεν ταυτίζεται με την ενιαία λογική αναπαράσταση της πληροφορίας.

2.6. Πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus

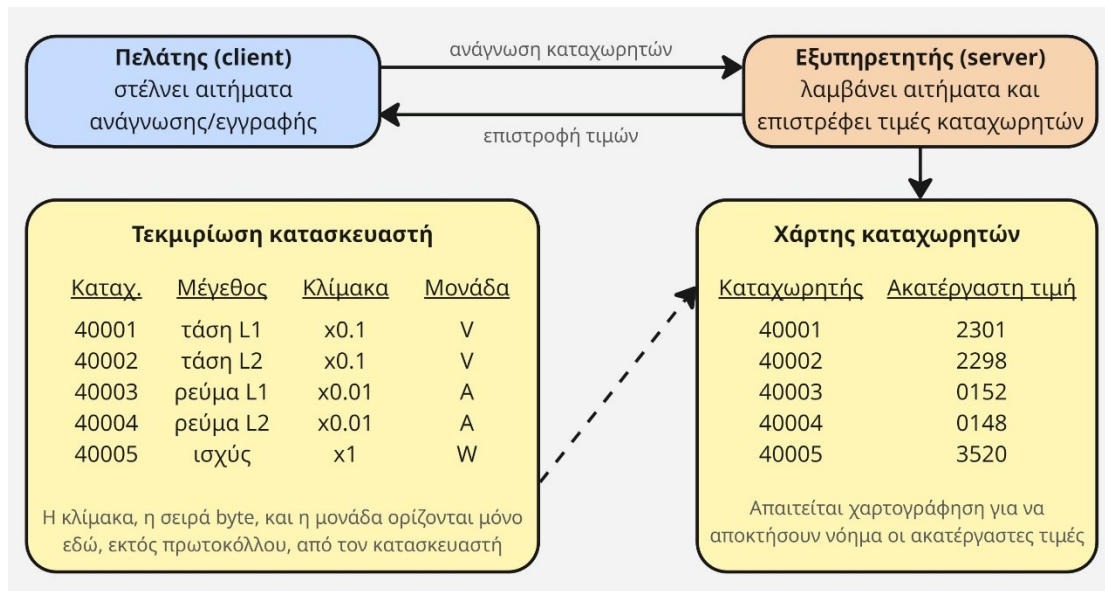
Το Modbus αποτελεί ένα από τα παλαιότερα και ευρύτερα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα βιομηχανικής επικοινωνίας και έχει υιοθετηθεί εκτενώς και σε κτιριακές εγκαταστάσεις, ιδίως για τη διασύνδεση μετρητών ενέργειας, μετατροπέων συχνότητας, μονάδων παραγωγής θερμότητας και ψύξης, καθώς και επιμέρους εξοπλισμού HVAC. Η

αρχική του μορφή βασίστηκε σε σειριακή επικοινωνία RTU, ενώ μεταγενέστερα επεκτάθηκε σε περιβάλλον TCP/IP, γεγονός που επέτρεψε την ενσωμάτωσή του σε σύγχρονες δικτυακές υποδομές. Σε αντίθεση με πιο σύνθετα πρωτόκολλα κτιριακού αυτοματισμού, το Modbus σχεδιάστηκε με γνώμονα την απλότητα και τη σαφή αντιστοιχισή καταχωρητών μνήμης, στοιχείο που καθορίζει και τη λογική αναπαράστασης των δεδομένων του (Modbus Organization, Inc., 2012).

Η βασική αρχή λειτουργίας του Modbus στηρίζεται σε μοντέλο πελάτη και εξυπηρετητή, όπου ο πελάτης αποστέλλει αιτήματα ανάγνωσης ή εγγραφής και ο εξυπηρετητής απαντά με τα περιεχόμενα συγκεκριμένων καταχωρητών. Τα δεδομένα οργανώνονται σε διακριτές περιοχές, όπως *coils*, *discrete inputs*, *input registers*, και *holding registers*¹, χωρίς όμως να ενσωματώνεται εγγενής περιγραφή της φυσικής σημασίας ή της μονάδας μέτρησης κάθε καταχώρησης. Η πληροφορία αποκτά νόημα μόνο μέσω της τεκμηρίωσης του κατασκευαστή, γεγονός που μεταθέτει τη σημασιολογική ερμηνεία εκτός του πρωτοκόλλου.

Σε κτιριακές εφαρμογές, το Modbus χρησιμοποιείται συχνά ως διεπαφή με συσκευές που δεν διαθέτουν αντικειμενοστραφή μοντέλα δεδομένων. Για παράδειγμα, ένας μετρητής ενέργειας μπορεί να παρέχει τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος σε διαδοχικούς καταχωρητές, όπου η κλίμακα, η μορφή και η μετατροπή σε φυσική μονάδα εξαρτώνται από παραμέτρους που ορίζονται στην τεχνική τεκμηρίωση. Η απουσία τυποποιημένης περιγραφής μεταδεδομένων σημαίνει ότι δύο συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών μπορεί να χρησιμοποιούν παρόμοια δομή καταχωρητών, αλλά να διαφέρουν σε κλιμάκωση, σειρά byte ή κωδικοποίηση, δημιουργώντας πρόσθετες απαιτήσεις ελέγχου συνέπειας κατά την ενοποίηση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.

¹ Οι όροι *coils*, *discrete inputs*, *input registers* και *holding registers* αποτελούν επίσημες ονομασίες των τεσσάρων περιοχών δεδομένων όπως ορίζονται στην προδιαγραφή Modbus (Modbus Application Protocol Specification V1.1b3). Αντιστοιχούν σε: μονόψηφες τιμές ανάγνωσης/εγγραφής (*coils*), μονόψηφες τιμές μόνο ανάγνωσης (*discrete inputs*), 16-bit τιμές μόνο ανάγνωσης (*input registers*) και 16-bit τιμές ανάγνωσης/εγγραφής (*holding registers*). Διατηρούνται στην αγγλική ως κυρίως ονόματα της προδιαγραφής, χωρίς αντίστοιχο καθιερωμένο ελληνικό όρο.



Εικόνα 7: Δομή δεδομένων στο Modbus

Από άποψη διαλειτουργικότητας, το Modbus εξασφαλίζει τεχνική συμβατότητα σε επίπεδο μετάδοσης, αλλά δεν επιδιώκει ενιαίο μοντέλο οντοτήτων ή ιδιοτήτων, όπως συμβαίνει σε πρωτόκολλα σχεδιασμένα ειδικά για κτιριακό αυτοματισμό. Η διαφοροποίηση αυτή έχει άμεση επίπτωση στην αρχιτεκτονική κανονικοποίησης, καθώς η μετάβαση από καταχωρητές χαμηλού επιπέδου σε λογικές οντότητες, όπως αισθητήρες, μετρητές ή λειτουργικές καταστάσεις, απαιτεί ρητή χαρτογράφηση και μετασχηματισμό, όπως επισημαίνεται και στη βιβλιογραφία περί διαλειτουργικότητας σε ετερογενή IoT περιβάλλοντα (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το πρωτόκολλο Modbus αναδεικνύει με ιδιαίτερη σαφήνεια τη διάκριση μεταξύ συντακτικής και λογικής ενοποίησης. Ενώ η πρόσβαση σε δεδομένα είναι απλή και προβλέψιμη, η απουσία ενσωματωμένης σημασιολογικής δομής καθιστά αναγκαία την εισαγωγή ενδιάμεσου επιπέδου που θα μετατρέπει τις ακατέργαστες τιμές καταχωρητών σε κανονικοποιημένες μεταβλητές με ορισμένες μονάδες, τύπους και λειτουργικό πλαίσιο. Χωρίς αυτόν τον μετασχηματισμό, η άμεση αξιοποίηση των δεδομένων από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου παραμένει περιορισμένη και εξαρτημένη από ειδική γνώση κάθε συσκευής.

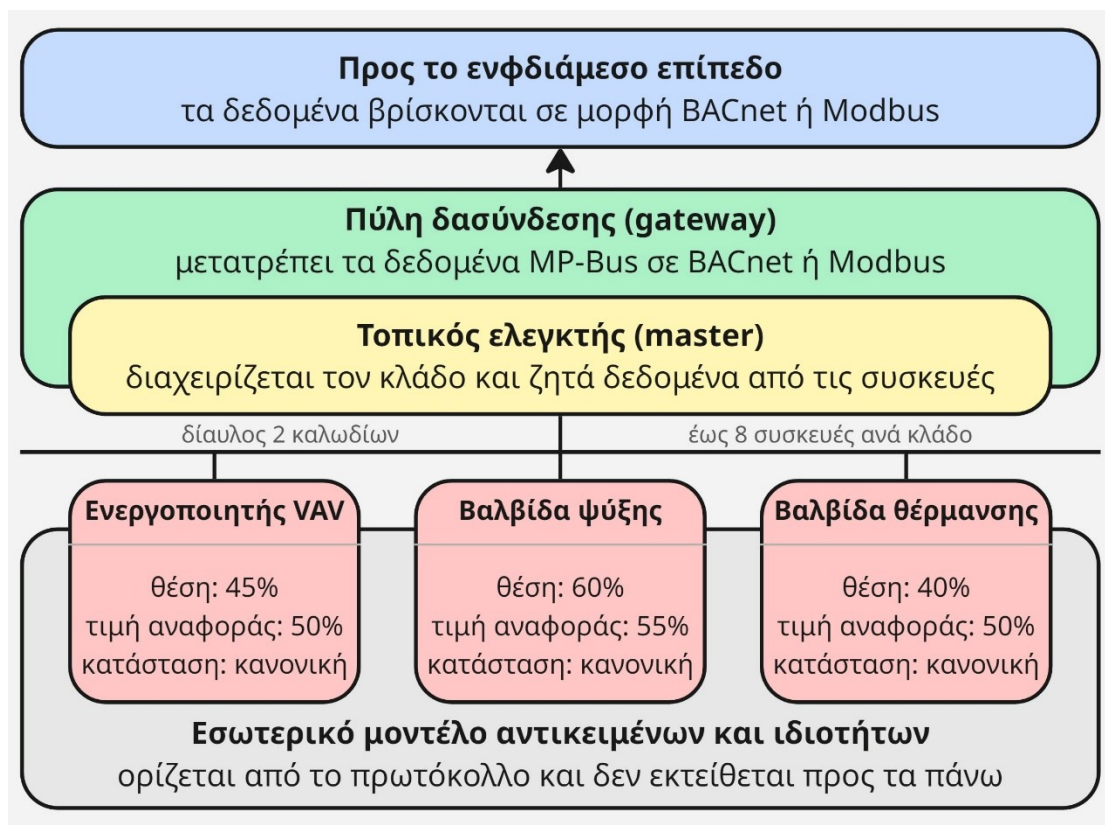
2.7. Πρωτόκολλο επικοινωνίας MP-Bus

Το MP-Bus αποτελεί ιδιόκτητο πρωτόκολλο επικοινωνίας που αναπτύχθηκε από την Belimo και χρησιμοποιείται κυρίως για τη διασύνδεση ενεργοποιητών βαλβίδων και αεραγωγών με τοπικούς ελεγκτές σε συστήματα HVAC. Η εφαρμογή του εντοπίζεται κυρίως σε ρυθμιστές παροχής αέρα VAV (Variable Air Volume), ενεργοποιητές βαλβίδων ψύξης και θέρμανσης, και αισθητήρες δρόσου, όπου η ανάγκη για αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής πολυπλοκότητας μεταξύ ελεγκτή και ενεργοποιητή σε κοντινή

απόσταση καθιστά το πρωτόκολλο πρακτικά αποδοτικό. Παρά τον ιδιόκτητο χαρακτήρα του, το MP-Bus έχει υιοθετηθεί ευρέως σε ευρωπαϊκές κτιριακές εγκαταστάσεις λόγω της εκτεταμένης παρουσίας της Belimo στον τομέα των ενεργοποιητών HVAC. Η βασική αρχή λειτουργίας του MP-Bus στηρίζεται σε τοπολογία δύο καλωδίων, μέσω των οποίων μεταδίδονται τόσο η τροφοδοσία ισχύος όσο και τα σήματα επικοινωνίας. Η αρχιτεκτονική είναι master-slave², με τον τοπικό ελεγκτή να λειτουργεί ως master και τις συσκευές πεδίου να λειτουργούν ως slaves. Κάθε κλάδος υποστηρίζει έως οκτώ συσκευές, γεγονός που καθορίζει τη φυσική οργάνωση της εγκατάστασης και απαιτεί συνήθως έναν κλάδο ανά ζώνη ελέγχου. Η επικοινωνία περιλαμβάνει ανάγνωση θέσης, ρύθμιση τιμής αναφοράς, κατάσταση λειτουργίας και διαγνωστικές πληροφορίες της συσκευής, παρέχοντας έτσι πλουσιότερο σύνολο πληροφορίας σε σχέση με απλές αναλογικές διεπαφές.

Σε επίπεδο αναπαράστασης δεδομένων, το MP-Bus ορίζει εσωτερικά αντικείμενα και ιδιότητες για τις συσκευές που υποστηρίζει, αλλά το μοντέλο αυτό παραμένει εσωτερικό στο πρωτόκολλο και δεν εκτίθεται άμεσα σε ανώτερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής. Η πρόσβαση σε δεδομένα MP-Bus από συστήματα εποπτείας πραγματοποιείται συνήθως μέσω πύλης διασύνδεσης (gateway) που μετατρέπει τα δεδομένα του πρωτοκόλλου σε BACnet ή Modbus, μεταθέτοντας τη λογική αντιστοίχισης στη διαμόρφωση του gateway. Η έμμεση αυτή διασύνδεση σημαίνει ότι η πληροφορία που φτάνει στο ενδιαμέσο επίπεδο δεν φέρει απαραίτητα τη δομή του MP-Bus, αλλά τη δομή του πρωτοκόλλου μετατροπής που χρησιμοποιεί το gateway, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8.

² Παρότι υπάρχουν ελληνικές αποδόσεις των όρων master και slave, όπως «κύριος» και «εξαρτόμενος» η αγγλική ορολογία είναι τόσο κυρίαρχη σε κάθε πτυχή της τεχνολογίας ώστε χρησιμοποιείται αυτούσια και στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 8: Δομή του MP-Bus

Από την άποψη της ενοποίησης δεδομένων, το MP-Bus παρουσιάζει ιδιαιτερότητες που το διακρίνουν από τα πρωτόκολλα που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Ο ιδιόκτητος χαρακτήρας του περιορίζει τη δυνατότητα ανάπτυξης ανεξάρτητων συνιστωσών σύνδεσης από τρίτους, καθώς η τεχνική τεκμηρίωση του πρωτοκόλλου δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμη, ενώ η εξάρτηση από gateway εισάγει μια επιπλέον βαθμίδα μετατροπής που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την κανονικοποίηση. Επιπλέον, οι πληροφορίες διάγνωσης που παρέχει το πρωτόκολλο, όπως ώρες λειτουργίας, αριθμός κύκλων λειτουργίας και ενδείξεις ασφαλείας, αποτελούν δεδομένα υψηλής αξίας για εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης, αλλά η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται από τις δυνατότητες του gateway και από την παραμετροποίησή του.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το MP-Bus αναδεικνύει μια κατηγορία πρωτοκόλλων που χαρακτηρίζεται από εξειδικευμένο λειτουργικό πεδίο εφαρμογής και έμμεση ενσωμάτωση στην αρχιτεκτονική μέσω gateway. Η ύπαρξή του στην εγκατάσταση της μελέτης περίπτωσης υπογραμμίζει ότι η ετερογένεια των πρωτοκόλλων δεν περιορίζεται στα ευρέως τυποποιημένα πρωτόκολλα, αλλά επεκτείνεται σε εξειδικευμένα πρωτόκολλα πεδίου που απαιτούν ιδιαίτερη αντιμετώπιση κατά τον σχεδιασμό των συνιστωσών σύνδεσης του ενδιαμέσου επιπέδου.

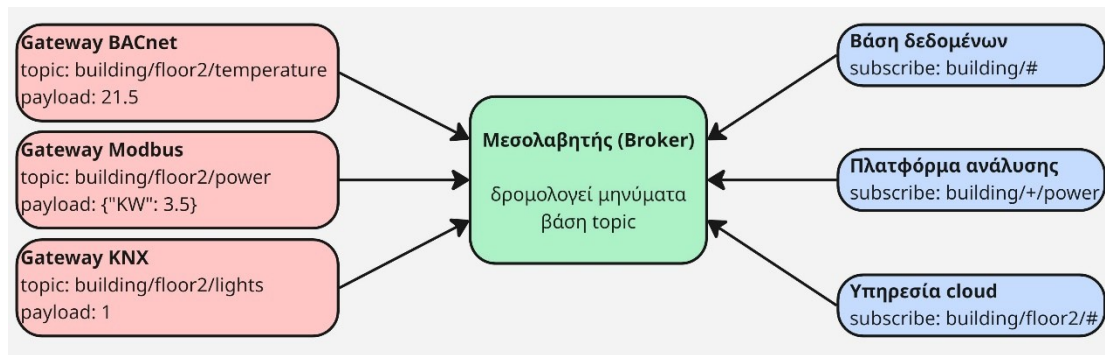
2.8. Πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT και διασύνδεση με υπηρεσίες IoT

Το MQTT αποτελεί ελαφρύ πρωτόκολλο επικοινωνίας βασισμένο στο πρότυπο publish-subscribe (pub/sub), το οποίο έχει σχεδιαστεί για περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους και ασταθείς συνδέσεις, και έχει υιοθετηθεί ευρέως σε αρχιτεκτονικές IoT. Σε αντίθεση με τα πρωτόκολλα πεδίου που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, το MQTT δεν στοχεύει στην άμεση διασύνδεση αισθητήρων και ενεργοποιητών σε επίπεδο αυτοματισμού, αλλά λειτουργεί ως μηχανισμός μεταφοράς μηνυμάτων μεταξύ «εκδοτών» και «συνδρομητών» μέσω ενός κεντρικού μεσολαβητή. Η σχεδιαστική αυτή επιλογή το καθιστά κατάλληλο για τη διασύνδεση κτιριακών συστημάτων με ανώτερα επίπεδα αποθήκευσης, ανάλυσης, και υπηρεσιών νέφους.

Η βασική αρχή λειτουργίας του MQTT έγκειται στη δημοσίευση μηνυμάτων σε θεματικά κανάλια, τα οποία οργανώνονται ιεραρχικά μέσω θεμάτων. Οι πελάτες που έχουν εγγραφεί σε συγκεκριμένα θέματα λαμβάνουν τα αντίστοιχα μηνύματα χωρίς να απαιτείται άμεση γνώση της ταυτότητας του εκδότη. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την αποσύζευξη μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών δεδομένων, στοιχείο που διευκολύνει την κλιμάκωση και την ευελιξία της αρχιτεκτονικής, ιδίως όταν τα δεδομένα προορίζονται για πολλαπλές εφαρμογές ανάλυσης ή αποθήκευσης (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Σε επίπεδο αναπαράστασης πληροφορίας, το MQTT δεν ορίζει συγκεκριμένο μοντέλο δεδομένων ούτε επιβάλλει δομή στο περιεχόμενο των μηνυμάτων. Το payload³ μπορεί να περιέχει απλή αριθμητική τιμή, δομημένο κείμενο ή μορφή JSON, ανάλογα με την υλοποίηση. Η απουσία ενσωματωμένου σχήματος μεταδεδομένων σημαίνει ότι η σημασία κάθε μηνύματος προκύπτει από τη σύμβαση ονοματολογίας των topics και από το περιεχόμενο που ορίζει η εφαρμογή. Η ευελιξία αυτή προσφέρει τεχνολογική ουδετερότητα, αλλά ταυτόχρονα μεταθέτει την ευθύνη κανονικοποίησης και σημασιολογικής οργάνωσης στο επίπεδο εφαρμογής, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.

³ Το τμήμα ενός μηνύματος που περιέχει τα πραγματικά δεδομένα, σε αντίθεση με τα μεταδεδομένα ή την επικεφαλίδα του.



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική publish/subscribe του MQTT

Σε κτιριακές υποδομές, το MQTT χρησιμοποιείται συχνά ως ενδιάμεσος μηχανισμός μεταφοράς δεδομένων από gateways που συλλέγουν πληροφορία μέσω BACnet, KNX ή Modbus και τη δημοσιεύουν σε ανώτερο επίπεδο για περαιτέρω επεξεργασία. Στις περιπτώσεις αυτές, το MQTT δεν αντικαθιστά τα πρωτόκολλα πεδίου, αλλά λειτουργεί ως αγωγός ενοποιημένης διανομής πληροφορίας προς συστήματα αποθήκευσης, πλατφόρμες ανάλυσης ή υπηρεσίες απομακρυσμένης εποπτείας. Η αποτελεσματικότητα της προσέγγισης εξαρτάται από το κατά πόσον τα δεδομένα που δημοσιεύονται έχουν ήδη υποστεί δομική κανονικοποίηση και σαφή ορισμό μονάδων και τύπων.

Η υιοθέτηση MQTT σε αρχιτεκτονικές έξυπνων κτιρίων συνδέεται άμεσα με την απαίτηση κλιμάκωσης και διασύνδεσης με εξωτερικές υπηρεσίες, καθώς, σε περιβάλλοντα όπου επιδιώκεται συλλογή μεγάλου όγκου χρονοσειρών και εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης ή πρόγνωσης, το pub/sub μοντέλο επιτρέπει την αποδοτική διανομή δεδομένων σε πολλαπλούς καταναλωτές, χωρίς επιβάρυνση των συστημάτων πεδίου. Η ύπαρξη ελαφρού πρωτοκόλλου μεταφοράς διευκολύνει την ενσωμάτωση ετερογενών πηγών σε ενιαίο περιβάλλον ανάλυσης, υπό την προϋπόθεση ότι έχει προηγηθεί κατάλληλη οργάνωση και ενοποίηση της πληροφορίας (Malkawi, et al., 2023).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το MQTT αναδεικνύει τον διαχωρισμό μεταξύ επιπέδου επικοινωνίας και επιπέδου λογικής αναπαράστασης. Η δυνατότητα ευέλικτης και κλιμακούμενης μετάδοσης μηνυμάτων δεν συνεπάγεται ενιαία ερμηνεία των δεδομένων. Επομένως, η αξιοποίησή του σε αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιάμεσου επιπέδου προϋποθέτει ότι τα δεδομένα που διακινούνται έχουν ήδη μετασχηματιστεί σε κανονικοποιημένη μορφή, ώστε το pub/sub σχήμα να λειτουργεί ως μηχανισμός διάθεσης πληροφορίας και όχι ως υποκατάστατο της ενοποίησης.

2.9. Συνοπτική συγκριτική αποτίμηση πρωτοκόλλων ως προς την ενοποίηση δεδομένων

Η ανάλυση των πρωτοκόλλων BACnet, KNX, Modbus, MQTT και MP-Bus στις προηγούμενες ενότητες ανέδειξε ότι, παρότι όλα χρησιμοποιούνται ευρέως σε κτιριακές υ-

ποδομές, διαφοροποιούνται ουσιαστικά ως προς το μοντέλο δεδομένων, το επίπεδο αφαιρετικότητας, και τον βαθμό ενσωμάτωσης σημασιολογικής πληροφορίας. Η συγκριτική τους αποτίμηση αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διότι η αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης οφείλει να λειτουργεί ανεξάρτητα από τις επιμέρους φιλοσοφίες σχεδίασης.

Το BACnet παρέχει αντικειμενοστραφές μοντέλο με τυποποιημένα αντικείμενα και ιδιότητες, γεγονός που διευκολύνει τη δομική οργάνωση της πληροφορίας σε επίπεδο συσκευής. Η ύπαρξη καθορισμένων τύπων αντικειμένων, όπως αναλογικές εισοδοί ή δυαδικές έξοδοι, εισάγει στοιχειώδη ομοιογένεια, ωστόσο η πρακτική εφαρμογή επιτρέπει επιλογές και παραμετροποιήσεις που οδηγούν σε διαφοροποιήσεις μεταξύ κατασκευαστών. Συνεπώς, αν και το BACnet προσφέρει ανώτερο επίπεδο αφαιρετικότητας σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα πεδίου, δεν εξαλείφει την ανάγκη εξωτερικής κανονικοποίησης όταν τα δεδομένα συγκεντρώνονται σε ενοποιημένο περιβάλλον, όπως έχει επισημανθεί στη βιβλιογραφία σημασιολογικής μοντελοποίησης κτιρίων (Balaji, et al., 2016).

Το KNX, αντιθέτως, βασίζεται σε αποκεντρωμένη λογική και σε διευθύνσεις ομάδας, όπου η σημασία της πληροφορίας προκύπτει κυρίως από τη διαμόρφωση του έργου, και όχι από ενσωματωμένα μεταδεδομένα. Οι τύποι δεδομένων είναι προκαθορισμένοι ως προς το μέγεθος, αλλά η φυσική ερμηνεία τους δεν συνοδεύεται από ρητή περιγραφή εντός του πακέτου δεδομένων. Η ενοποίηση δεδομένων KNX σε ανώτερο επίπεδο απαιτεί, επομένως, ανακατασκευή της λογικής οργάνωσης και ρητή αντιστοίχιση σε οντότητες και μονάδες μέτρησης, ιδίως όταν συνυπάρχει με πρωτόκολλα διαφορετικής φιλοσοφίας.

Το Modbus παρουσιάζει ακόμη χαμηλότερο επίπεδο αφαιρετικότητας, καθώς οργανώνει την πληροφορία σε καταχωρητές χωρίς ενσωματωμένη περιγραφή τύπου ή σημασίας. Η απλότητα του πρωτοκόλλου διευκολύνει την υλοποίηση και τη διασύνδεση ετερογενούς εξοπλισμού, αλλά μεταθέτει πλήρως τη σημασιολογική ερμηνεία στην τεχνική τεκμηρίωση του κατασκευαστή (Domingues, Carreira, Vieira, & Kastner, 2016). Από την άποψη της ενοποίησης, τα δεδομένα Modbus αποτελούν ακατέργαστες τιμές που απαιτούν ρητό μετασχηματισμό, καθορισμό μονάδων, κλιμάκωσης και αντιστοίχιση σε λογικές μεταβλητές πριν καταστούν συγκρίσιμα σε επίπεδο κτιρίου.

Το MQTT διαφοροποιείται ουσιαστικά από τα προηγούμενα, καθώς δεν ορίζει μοντέλο δεδομένων αλλά μηχανισμό μεταφοράς μηνυμάτων. Η ευελιξία του pub/sub σχήματος το καθιστά κατάλληλο για διανομή πληροφορίας σε αρχιτεκτονικές IoT, ωστόσο δεν εισάγει εγγενή κανονικοποίηση ούτε σημασιολογική δομή. Η ομοιογένεια εξαρτάται

αποκλειστικά από τις συμβάσεις ονοματολογίας και τη δομή του payload που επιλέγεται από την εφαρμογή (Malkawi, et al., 2023).

Η συγκριτική εξέταση καταδεικνύει ότι τα πρωτόκολλα μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες ως προς τη συμβολή τους στην ενοποίηση δεδομένων.

Πρώτον, πρωτόκολλα με αντικειμενοστραφή δομή, τα οποία παρέχουν στοιχειώδη λογική οργάνωση αλλά επιτρέπουν ετερογένεια υλοποίησης.

Δεύτερον, πρωτόκολλα βασισμένα σε απλή αντιστοίχιση τιμών ή καταχωρητών, όπου η σημασιολογική διάσταση απουσιάζει από τον μηχανισμό επικοινωνίας.

Τρίτον, πρωτόκολλα μεταφοράς μηνυμάτων που εστιάζουν στην αποσύζευξη παραγωγών και καταναλωτών δεδομένων, χωρίς να επιβάλλουν σχήμα αναπαράστασης. Τέταρτον, ιδιόκτητα πρωτόκολλα εξειδικευμένου πεδίου εφαρμογής, όπως το MP-Bus, τα οποία ενσωματώνονται στην αρχιτεκτονική έμμεσα μέσω gateway και παρουσιάζουν περιορισμένη δυνατότητα ανεξάρτητης ανάπτυξης συνιστωσών σύνδεσης λόγω του ιδιόκτητου χαρακτήρα τους.

Πίνακας 1: Συγκριτική αποτίμηση των πρωτοκόλλων ως προς το μοντέλο δεδομένων, το επίπεδο αφαιρετικότητας, τον τρόπο ορισμού της σημασίας και τις απαιτήσεις ενοποίησης.

Πρωτόκολλο	Μοντέλο δεδομένων	Τι απαιτεί η ενοποίηση
BACnet	αντικειμενοστραφές, τυποποιημένα αντικείμενα και ιδιότητες	εξομάλυνση διαφορών υλοποίησης ανά κατασκευαστή
KNX	group addresses, προκαθορισμένοι τύποι (DPT)	ανακατασκευή λογικής δομής, αντιστοίχιση σε οντότητες και μονάδες
Modbus	καταχωρητές, χωρίς τύπο ή σημασία	μετασχηματισμός τιμών, μονάδες, κλιμάκωση, αντιστοίχιση σε λογικές μεταβλητές
MQTT	χωρίς μοντέλο, μηχανισμός μεταφοράς (pub/sub)	κανονικοποίηση και σημασιολογία πλήρως στο επίπεδο εφαρμογής

Πρωτό- κόλλο	Μοντέλο δεδομένων	Τι απαιτεί η ενοποίηση
MP-Bus	ιδιόκτητο, εσωτερικό μοντέλο μη εκτεθειμένο	επιπλέον βαθμίδα μετατροπής, εξάρτηση από ιδιόκτητη τεκμηρίωση

Στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, καμία από αυτές τις κατηγορίες δεν επαρκεί από μόνη της για την επίτευξη ενιαίας λογικής και σημασιολογικής αναπαράστασης σε επίπεδο κτιρίου. Η επικοινωνιακή διαλειτουργικότητα, ακόμη και όταν επιτυγχάνεται σε επίπεδο μετάδοσης ή αντικειμένων, δεν εξασφαλίζει συγκρισιμότητα, επαναχρησιμοποίηση, και ανεξαρτησία από τεχνολογικές ιδιαιτερότητες. Απαιτείται, επομένως, ένα διακριτό αρχιτεκτονικό στρώμα που να αναλαμβάνει συστηματικά αυτή την ενοποίηση.

3. Ενδιάμεσο επίπεδο ενοποίησης και κανονικοποίησης

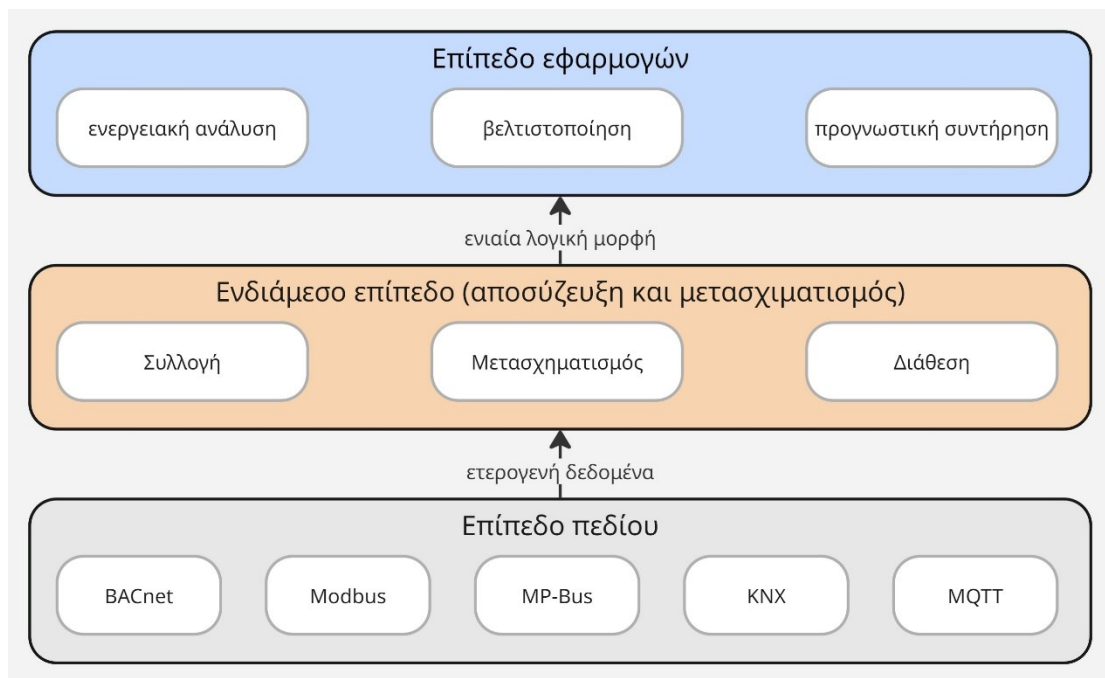
3.1. Η έννοια του ενδιάμεσου επιπέδου και ο ρόλος του στη συνολική αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική των έξυπνων κτιρίων χαρακτηρίζεται από διαστρωμάτωση επιπέδων και από έντονη ετερογένεια σε επίπεδο συστημάτων πεδίου, πρωτοκόλλων επικοινωνίας, και μοντέλων δεδομένων. Όπως αναδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2, κανένα από τα εξεταζόμενα πρωτόκολλα δεν εξασφαλίζει από μόνο του ενιαία λογική και σημασιολογική αναπαράσταση σε επίπεδο κτιρίου. Η επικοινωνιακή διαλειτουργικότητα, ακόμη και όταν επιτυγχάνεται σε επίπεδο μετάδοσης, δεν επαρκεί για την αξιοποίηση της πληροφορίας από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου. Η διαπίστωση αυτή θεμελιώνει την ανάγκη ορισμού ενός διακριτού ενδιάμεσου επιπέδου ως αρχιτεκτονικής οντότητας.

Στη βιβλιογραφία, ο όρος *middleware* αναφέρεται γενικά σε λογισμικό που τοποθετείται μεταξύ ετερογενών συστημάτων και παρέχει κοινό επίπεδο επικοινωνίας και ερμηνείας, αποδεσμεύοντας τις εφαρμογές από τις τεχνικές ιδιαιτερότητες των υποκείμενων υποδομών (Malkawi, et al., 2023). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το ενδιάμεσο επίπεδο ορίζεται πιο εξειδικευμένα ως ένα αρχιτεκτονικό στρώμα που συλλέγει δεδομένα από ετερογενείς πηγές, τα μετασχηματίζει σε ενιαία λογική μορφή και τα διαθέτει προς ανώτερες εφαρμογές ανεξάρτητα από την τεχνολογική τους προέλευση. Το ενδιάμεσο επίπεδο διαμορφώνει ένα κοινό πλαίσιο αναπαράστασης, μέσω του οποίου η πληροφορία αποκτά συνεπή μορφή και νόημα ανεξάρτητα από το σύστημα που την

παράγει. Η διακίνηση μηνυμάτων μεταξύ επιπέδων αποτελεί συνεπώς δευτερεύουσα λειτουργία σε σχέση με τον κεντρικό ρόλο του μετασχηματισμού της δομής της πληροφορίας.

Αρχιτεκτονικά, το ενδιάμεσο επίπεδο λειτουργεί ως στρώμα αποσύζευξης μεταξύ του επιπέδου πεδίου και του επιπέδου εφαρμογών. Τα συστήματα πεδίου συνεχίζουν να λειτουργούν σύμφωνα με τη δική τους λογική χωρίς να απαιτείται τροποποίηση της εσωτερικής τους δομής, ενώ οι εφαρμογές ανώτερου επιπέδου αλληλεπιδρούν με ένα ομοιογενές σύνολο δεδομένων χωρίς να απαιτείται γνώση των επιμέρους τεχνολογιών. Η αποσύζευξη αυτή μειώνει την πολυπλοκότητα ανάπτυξης και συντήρησης, περιορίζει τις άμεσες εξαρτήσεις μεταξύ ετερογενών υποσυστημάτων και επιτρέπει την ανεξάρτητη εξέλιξη κάθε επιπέδου (Alfalouji, et al., 2022). Παράλληλα, η ύπαρξη σαφώς ορισμένου σημείου μετασχηματισμού διευκολύνει τον έλεγχο ποιότητας και την τεκμηρίωση των μεταβλητών. Επιπλέον, ενισχύει την επεκτασιμότητα της εγκατάστασης, καθώς νέα συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν χωρίς να απαιτείται ανασχεδιασμός των εφαρμογών που καταναλώνουν τα δεδομένα (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Το ενδιάμεσο επίπεδο ως στρώμα αποσύζευξης μεταξύ του επιπέδου πεδίου και του επιπέδου εφαρμογών

Οι τιμές, οι καταστάσεις, οι συναγερμοί και τα συμβάντα που προέρχονται από διαφορετικά υποσυστήματα μετατρέπονται εντός του ενδιάμεσου επιπέδου σε ένα κοινό σχήμα αναφοράς, αποκαθιστώντας τη συγκρισιμότητα και τη δυνατότητα συνδυαστικής ανάλυσης. Η διαδικασία αυτή δεν αφορά μόνο τη μορφολογική μετατροπή, αλλά και τη διασφάλιση ότι τα δεδομένα αποκτούν συνεπή σημασία ανεξάρτητα από το πε-

ριβάλλον προέλευσής τους, αποτελώντας έτσι απαραίτητη προϋπόθεση για τη μετάβαση στη σημασιολογική διαλειτουργικότητα που εξετάζεται στις επόμενες ενότητες.

3.2. Έννοια κανονικοποίησης δεδομένων και ενιαία λογική αναπαράσταση

Η λειτουργία του ενδιάμεσου επιπέδου προϋποθέτει έναν σαφώς ορισμένο μηχανισμό μετασχηματισμού της εισερχόμενης πληροφορίας. Ο μηχανισμός αυτός είναι η κανονικοποίηση δεδομένων, η οποία αποτελεί τη διαδικασία μέσω της οποίας δεδομένα διαφορετικής προέλευσης, δομής και κωδικοποίησης αποδίδονται σε ένα κοινό λογικό σχήμα, με συνεπή χαρακτηριστικά και σαφώς ορισμένες ιδιότητες. Η κανονικοποίηση δεν αντιμετωπίζει απλώς τεχνικές ασυμβατότητες μεταξύ πρωτοκόλλων, αλλά εισάγει δομική ομοιογένεια σε επίπεδο λογικής οργάνωσης της πληροφορίας, ανεξάρτητα από το υποκείμενο σύστημα που τη παράγει (Balaji, et al., 2016).

Στο πλαίσιο των κτιριακών υποδομών, η ανάγκη για κανονικοποίηση προκύπτει άμεσα από τις ετερογένειες που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η ίδια φυσική ποσότητα μπορεί να εκφράζεται με διαφορετικές μονάδες, διαφορετική κλιμάκωση ή διαφορετικό τύπο δεδομένων, ανάλογα με τον κατασκευαστή ή το πρωτόκολλο. Οι λειτουργικές καταστάσεις αποδίδονται μέσω ετερογενών κωδικοποιήσεων, ενώ τα συμβάντα και οι συναγερμοί ακολουθούν διαφορετικούς κύκλους ζωής και δομές χρονικής σήμανσης. Υπό αυτές τις συνθήκες, η άμεση συγκέντρωση και επεξεργασία δεδομένων χωρίς προηγούμενο μετασχηματισμό οδηγεί αναπόφευκτα σε ασυνέπειες που υπονομεύουν την αξιοπιστία των αναλύσεων και την ορθότητα των αποφάσεων που βασίζονται σε αυτές (Malkawi, et al., 2023).

Η ενιαία λογική αναπαράσταση που προκύπτει από την κανονικοποίηση συνιστά ένα κοινό σχήμα αναφοράς, στο οποίο κάθε μεταβλητή συνοδεύεται από σαφώς ορισμένα χαρακτηριστικά: τον τύπο της πληροφορίας, τη μονάδα μέτρησης, την κλιμάκωση και την ένδειξη ποιότητας. Το σχήμα αυτό δεν εξαρτάται από τις επιλογές υλοποίησης των επιμέρους συστημάτων, και επιτρέπει τη συγκρισιμότητα δεδομένων διαφορετικής προέλευσης χωρίς πρόσθετη προσαρμοστική λογική σε επίπεδο εφαρμογής. Η σταθερότητα αυτή αποτελεί κρίσιμο χαρακτηριστικό, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων συστημάτων στην αρχιτεκτονική χωρίς να επηρεάζεται η συνολική δομή των δεδομένων που διατίθενται προς τις εφαρμογές (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Είναι ωστόσο σημαντικό να διακρίνεται η κανονικοποίηση από τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα. Η κανονικοποίηση διασφαλίζει δομική και τυπολογική συνέπεια, αλλά δεν αποδίδει ρητά νόημα στις μεταβλητές, δεν ορίζει τις σχέσεις μεταξύ τους και

δεν τοποθετεί τα δεδομένα σε λειτουργικό ή χωρικό πλαίσιο. Η μετάβαση από δομικά συνεπή δεδομένα σε σημασιολογικά εμπλουτισμένες οντότητες αποτελεί διακριτό επόμενο βήμα, το οποίο εξετάζεται στο Κεφάλαιο 4. Η κανονικοποίηση αποτελεί, συνεπώς, αναγκαία αλλά όχι επαρκή συνθήκη για την επίτευξη πλήρους διαλειτουργικότητας, και η σαφής διάκρισή της από την επόμενη φάση εμπλουτισμού αποτελεί θεμελιώδη αρχή της αρχιτεκτονικής που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.

3.3. Κανονικοποίηση μονάδων, τύπων, κλιμάκωσης και ποιότητας δεδομένων

Η κανονικοποίηση σε επίπεδο λογικής αναπαράστασης εξειδικεύεται μέσω της διαχείρισης βασικών χαρακτηριστικών των δεδομένων, τα οποία καθορίζουν τη φυσική τους ερμηνεία και τη δομική τους συνέπεια. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται οι μονάδες μέτρησης, οι τύποι δεδομένων, η κλιμάκωση και η ποιότητα, τα οποία συγκροτούν το ελάχιστο σύνολο ιδιοτήτων που απαιτούνται για την ομοιογενή αναπαράσταση της πληροφορίας.

Η κανονικοποίηση μονάδων αποσκοπεί στην ενοποίηση της έκφρασης φυσικών μεγεθών, ώστε τιμές που αναφέρονται στην ίδια ποσότητα να αποδίδονται με κοινό σύστημα μονάδων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη μετατροπή τιμών σε προκαθορισμένη μονάδα αναφοράς, καθώς και τη ρητή δήλωση της μονάδας ως χαρακτηριστικό της μεταβλητής. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι η αριθμητική τιμή συνδέεται άμεσα με τη φυσική της διάσταση και παραμένει συνεπής σε όλα τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής (Malkawi, et al., 2023).

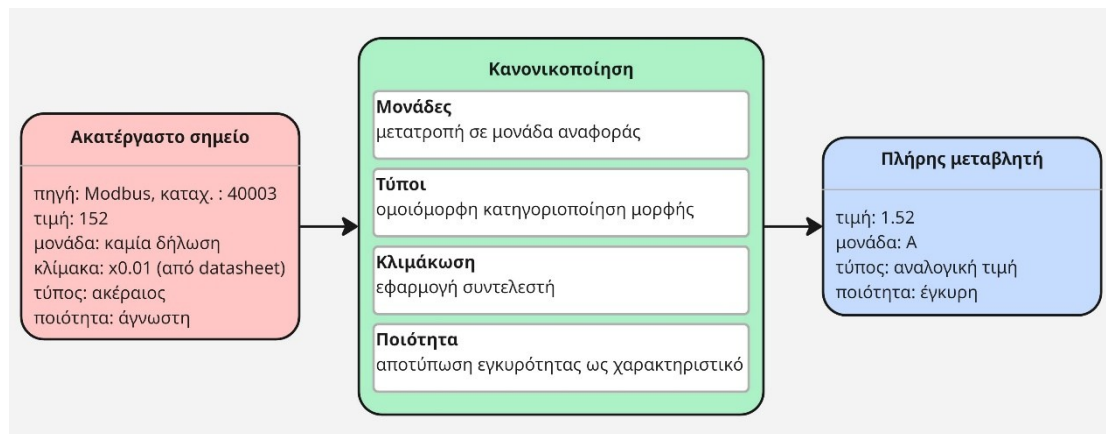
Η κανονικοποίηση τύπων δεδομένων αφορά τη συνεπή κατηγοριοποίηση της πληροφορίας ως προς τη μορφή της. Οι αριθμητικές τιμές, οι λογικές καταστάσεις και οι διακριτές εγγραφές αποδίδονται με σαφώς καθορισμένους τύπους, οι οποίοι εφαρμόζονται ομοιόμορφα ανεξάρτητα από την προέλευση των δεδομένων. Η τυποποίηση αυτή εξαλείφει ασάφειες που σχετίζονται με εναλλακτικές αναπαραστάσεις και επιτρέπει τη χρήση κοινών μηχανισμών επεξεργασίας (Blechmann, et al., 2023).

Η κλιμάκωση των δεδομένων αφορά τη μετατροπή των τιμών σε ενιαία αριθμητική αναφορά, όταν αυτές προκύπτουν μέσω συντελεστών ή εσωτερικών μετατροπών. Η κανονικοποίηση διασφαλίζει ότι οι τιμές εκφράζονται σε συνεπή κλίμακα και ότι οι κανόνες μετασχηματισμού είναι σαφώς ορισμένοι, ώστε να διατηρείται η αντιστοιχία μεταξύ αριθμητικής τιμής και φυσικού μεγέθους.

Η ποιότητα των δεδομένων ενσωματώνεται ως χαρακτηριστικό της μεταβλητής, το οποίο αποτυπώνει την κατάσταση εγκυρότητας της τιμής κατά τη στιγμή της καταγραφής ή μεταφοράς. Η αποτύπωση αυτή επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ έγκυρων, ελλιπών

ή μη διαθέσιμων δεδομένων, χωρίς να εισάγεται ερμηνευτική ή λειτουργική αξιολόγηση στο παρόν επίπεδο.

Η συνδυαστική κανονικοποίηση των παραπάνω χαρακτηριστικών συγκροτεί ένα συνεκτικό πλαίσιο δομικής ομοιογένειας, στο οποίο κάθε δεδομένο συνοδεύεται από σαφώς ορισμένες ιδιότητες που επιτρέπουν την ορθή αναπαράσταση και επεξεργασία του. Το πλαίσιο αυτό λειτουργεί ως βάση για τις επόμενες διαδικασίες κανονικοποίησης και για την περαιτέρω οργάνωση της πληροφορίας σε ενιαίο λογικό επίπεδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Ανατομία της κανονικοποίησης ενός σημείου

3.4. Κανονικοποίηση καταστάσεων, συναγερμών και συμβάντων

Η κανονικοποίηση των αναλογικών τιμών, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, αντιμετωπίζει κυρίως τη δομική ασυνέπεια που προκύπτει από διαφορετικές μονάδες, κλιμάκωση και τύπους δεδομένων. Ωστόσο, ένα σημαντικό τμήμα της πληροφορίας που παράγεται από τα κτιριακά υποσυστήματα δεν εκφράζεται μέσω συνεχών μετρήσεων, αλλά μέσω διακριτών λογικών συνθηκών, εγγραφών με χρονική και αιτιολογική σημασία, και ακολουθιών γεγονότων. Οι κατηγορίες αυτές, δηλαδή οι καταστάσεις, οι συναγερμοί και τα συμβάντα, παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις κανονικοποίησης που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με τους ίδιους κανόνες που εφαρμόζονται στις αναλογικές τιμές, και η παράλειψή τους από το ενδιαμέσο επίπεδο θα αποτελούσε ουσιαστικό κενό στη δομική ομοιογένεια που αυτό επιδιώκει.

Η κανονικοποίηση των καταστάσεων εστιάζει στη δημιουργία ενός ενιαίου λεξιλογίου λειτουργικών συνθηκών, μέσω του οποίου οι διακριτές αναπαραστάσεις των επιμέρους υποσυστημάτων αντιστοιχίζονται σε καθορισμένο σύνολο τιμών με σαφώς ορισμένη σημασία. Όπως αναδείχθηκε στην ανάλυση των ειδών δεδομένων στο Κεφάλαιο 1, η ίδια λειτουργική συνθήκη, όπως η κατάσταση αυτόματης ή χειροκίνητης λειτουργίας ενός ελεγκτή, αποδίδεται σε διαφορετικά πρωτόκολλα και συστήματα μέσω ετερογε-

νών κωδικοποιήσεων, δυαδικών τιμών, ακέραιων αριθμών ή αλφαριθμητικών συμβολοσειρών, χωρίς να εγγυάται τη λειτουργική ερμηνεία τους σε ενοποιημένο περιβάλλον (Balaji, et al., 2016). Η κανονικοποίηση αντιμετωπίζει αυτή την ασάφεια ορίζοντας ρητά τις επιτρεπόμενες τιμές μιας κατάστασης, τη σημασία κάθε τιμής και τους κανόνες αντιστοίχισης από τις εσωτερικές κωδικοποιήσεις των πηγών. Η διαδικασία αυτή δεν αποσκοπεί στην ερμηνεία ή αξιολόγηση της κατάστασης σε λειτουργικό επίπεδο, αλλά αποκλειστικά στη διασφάλιση ότι η ίδια λογική συνθήκη αποδίδεται με τον ίδιο τρόπο ανεξάρτητα από την τεχνολογική πηγή προέλευσης.

Για τους συναγερμούς, η κανονικοποίηση διευρύνεται ώστε να καλύπτει όχι μόνο τη στιγμιαία τιμή, αλλά και τον κύκλο ζωής της εγγραφής, ο οποίος περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως η χρονική στιγμή εμφάνισης, η κατηγορία σοβαρότητας, η κατάσταση επιβεβαίωσης και η χρονική στιγμή αποκατάστασης. Η σημασία αυτής της διάστασης αναδεικνύεται από το γεγονός ότι διαφορετικά υποσυστήματα ακολουθούν ανομοιογενείς πρακτικές διαχείρισης του κύκλου ζωής των συναγερμών, με αποτέλεσμα το ίδιο λειτουργικό γεγονός να εμφανίζεται σε άλλο στάδιο εξέλιξης ανάλογα με την πηγή (Hildén, et al., 2022). Στο πλαίσιο της κανονικοποίησης, ορίζεται ένα κοινό σχήμα αναπαράστασης συναγερμού που ενσωματώνει σαφώς τα πεδία του κύκλου ζωής και τις επιτρεπόμενες μεταβάσεις μεταξύ σταδίων, ώστε οι εγγραφές που προέρχονται από διαφορετικά πρωτόκολλα να εντάσσονται σε κοινό λογικό πλαίσιο χωρίς απώλεια της χρονικής ή αιτιολογικής τους πληροφορίας. Επιπλέον, η κανονικοποίηση της κατηγοριοποίησης σοβαρότητας επιτρέπει τη συνεπή αντιμετώπιση συναγερμών διαφορετικής προέλευσης, ακόμη και όταν τα αρχικά συστήματα χρησιμοποιούν ανόμοιες κλίμακες προτεραιότητας.

Η κανονικοποίηση των συμβάντων παρουσιάζει εξίσου κρίσιμες απαιτήσεις, αν και διαφορετικής φύσης σε σχέση με τους συναγερμούς. Τα συμβάντα, όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1, αποτυπώνουν διακριτές στιγμές μεταβολής της λειτουργικής κατάστασης ενός συστήματος και χαρακτηρίζονται από τη χρονική τους μοναδικότητα και από την αιτιολογική τους συνέχεια με άλλα γεγονότα. Η κανονικοποίηση εστιάζει εδώ στη διασφάλιση ομοιογενούς χρονικής σήμανσης, στην ορθή αποτύπωση της ταυτότητας της πηγής του συμβάντος και στη συνεπή κατηγοριοποίηση του τύπου ενέργειας που αυτό αντιπροσωπεύει, όπως τροποποίηση παραμέτρου, ενεργοποίηση εντολής ή ανίχνευση μεταβολής. Χωρίς αυτή την ομοιογένεια, η ανασύνθεση ακολουθιών γεγονότων από πολλαπλά υποσυστήματα παραμένει προβληματική, καθώς διαφορετικοί μηχανισμοί χρονικής σήμανσης εισάγουν αποκλίσεις που καθιστούν τη συσχέτιση γεγονότων αναξιόπιστη (Malkawi, et al., 2023).

Η συνδυαστική κανονικοποίηση καταστάσεων, συναγερμών και συμβάντων, παράλληλα με εκείνη των αναλογικών τιμών, ολοκληρώνει το πλαίσιο δομικής ομοιογένειας που διασφαλίζει το ενδιάμεσο επίπεδο. Η πληρότητα αυτή αποτελεί αρχιτεκτονική απαίτηση, καθώς οι εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, όπως η ανάλυση απόδοσης, η προγνωστική συντήρηση και η βελτιστοποίηση ενεργειακής διαχείρισης, απαιτούν πρόσβαση σε όλους τους τύπους πληροφορίας με ισοδύναμο επίπεδο δομικής συνέπειας (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025). Ένα ενδιάμεσο επίπεδο που κανονικοποιεί μόνο τις αναλογικές τιμές, αφήνοντας ανεπεξέργαστες τις καταστάσεις, τους συναγερμούς και τα συμβάντα, δεν επιτυγχάνει την αποσύζευξη που αποτελεί τη θεμελιώδη αρχιτεκτονική λειτουργία του, και δεν δύναται να εξυπηρετήσει τη συστηματική μετάβαση προς τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 4.

3.5. Μηχανισμοί ολοκλήρωσης συστημάτων και διάθεσης δεδομένων προς εφαρμογές

Η κανονικοποίηση των δεδομένων, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, αποτελεί αναγκαία αλλά όχι αυτοτελή λειτουργία του ενδιάμεσου επιπέδου. Η παραγωγή ενός δομικά ομοιογενούς συνόλου δεδομένων αποκτά πρακτική αξία μόνο εφόσον συνοδεύεται από μηχανισμούς που διασφαλίζουν την οργανωμένη συλλογή της πληροφορίας από ετερογενείς πηγές, τη διαχείριση της ροής της εντός του ενδιάμεσου επιπέδου, και τη διάθεσή της προς τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου με τρόπο που να υποστηρίζει διαφορετικές απαιτήσεις πρόσβασης και κατανάλωσης. Η διάσταση αυτή της αρχιτεκτονικής αφορά την ολοκλήρωση των συστημάτων πεδίου ως πηγών πληροφορίας και τη διαμόρφωση ενός σαφώς ορισμένου επιπέδου διάθεσης δεδομένων, το οποίο λειτουργεί ως κοινό σημείο αναφοράς για όλες τις εφαρμογές που καταναλώνουν την κανονικοποιημένη πληροφορία.

Η ολοκλήρωση των συστημάτων πεδίου προϋποθέτει ότι το ενδιάμεσο επίπεδο διαθέτει τους κατάλληλους μηχανισμούς σύνδεσης με κάθε πρωτόκολλο επικοινωνίας που απαντάται στην εγκατάσταση. Όπως αναδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2, τα πρωτόκολλα BACnet, KNX, Modbus, MQTT και MP-Bus διαφοροποιούνται ουσιωδώς ως προς τον τρόπο πρόσβασης στα δεδομένα, τους μηχανισμούς εύρεσης συσκευών, και τα μοντέλα αναπαράστασης πληροφορίας. Η αντιμετώπιση αυτής της ετερογένειας από αρχιτεκτονική σκοπιά επιτυγχάνεται μέσω εξειδικευμένων συνιστωσών σύνδεσης, οι οποίες αναλαμβάνουν την επικοινωνία με κάθε πρωτόκολλο σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές του και μετατρέπουν τα δεδομένα που λαμβάνουν σε κοινή εσωτερική αναπαράσταση πριν από την εφαρμογή των κανόνων κανονικοποίησης.

Ακολουθώντας την προσέγγιση των (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025), η λογική κανονικοποίησης παραμένει ανεξάρτητη από τις τεχνικές λεπτομέρειες κάθε πρωτοκόλλου, και η προσθήκη νέων πηγών δεδομένων δεν απαιτεί ανασχεδιασμό του πυρήνα μετασχηματισμού, αλλά μόνο την ανάπτυξη νέας συνιστώσας σύνδεσης, γεγονός που ενισχύει την επεκτασιμότητα της συνολικής αρχιτεκτονικής. Στην περίπτωση του MP-Bus η συνιστώσα σύνδεσης αλληλοεπιδρά με gateway που αναλαμβάνει τη μετατροπή του πρωτοκόλλου, και η παραμετροποίησή της εξαρτάται από τις δυνατότητες έκθεσης δεδομένων που παρέχει το gateway.

Η συλλογή δεδομένων από τα συστήματα πεδίου μπορεί να πραγματοποιείται είτε μέσω περιοδικής δειγματοληψίας, είτε μέσω μηχανισμών ειδοποίησης που ενεργοποιούνται κατά τη μεταβολή της τιμής ή της κατάστασης. Η επιλογή μεταξύ των δύο προσεγγίσεων εξαρτάται από τη φύση της μεταβλητής και από τις απαιτήσεις των εφαρμογών που θα καταναλώσουν την πληροφορία, καθώς οι αναλογικές τιμές συνεχούς μεταβολής εξυπηρετούνται συχνά καλύτερα από περιοδική δειγματοληψία, ενώ τα συμβάντα και οι συναγερμοί απαιτούν ασύγχρονη καταγραφή κατά τη στιγμή εμφάνισής τους προκειμένου να διατηρηθεί η χρονική τους ακρίβεια. Η διαχείριση αυτής της διαφοροποίησης εντός του ενδιάμεσου επιπέδου διασφαλίζει ότι η κανονικοποιημένη πληροφορία αντανακλά με συνέπεια τη λειτουργική κατάσταση του κτιρίου, ανεξάρτητα από τον μηχανισμό με τον οποίο αυτή αρχικά συλλέχθηκε (Hildén, et al., 2022). Η διάθεση των κανονικοποιημένων δεδομένων προς τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου απαιτεί τον ορισμό σαφών διεπαφών πρόσβασης, οι οποίες να υποστηρίζουν διαφορετικά μοντέλα κατανάλωσης πληροφορίας. Εφαρμογές ανάλυσης που επεξεργάζονται ιστορικές χρονοσειρές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις πρόσβασης σε σχέση με εφαρμογές πραγματικού χρόνου που παρακολουθούν την τρέχουσα κατάσταση του κτιρίου, ενώ συστήματα βελτιστοποίησης που συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλά υποσυστήματα χρειάζονται τη δυνατότητα ταυτόχρονης πρόσβασης σε μεταβλητές διαφορετικού τύπου και προέλευσης. Η αρχιτεκτονική του ενδιάμεσου επιπέδου οφείλει να υποστηρίζει αυτή την ποικιλομορφία χωρίς να εισάγει εξαρτήσεις μεταξύ των εφαρμογών που καταναλώνουν τα δεδομένα, αρχή που συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία αποσύζευξης που αποτελεί κεντρικό αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό του επιπέδου (Alfalouji, et al., 2022).

Η αποτελεσματικότητα οποιουδήποτε μηχανισμού διάθεσης εξαρτάται, ωστόσο, από το κατά πόσον τα δεδομένα που διατίθενται έχουν ήδη υποστεί πλήρη κανονικοποίηση, καθώς η δομική ομοιογένεια αποτελεί προϋπόθεση για την αξιόπιστη λειτουργία του (Malkawi, et al., 2023). Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί διάθεσης αναλύονται σε επίπεδο

σχεδιαστικών αποφάσεων στο Κεφάλαιο 5. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει ότι οι μηχανισμοί ολοκλήρωσης και διάθεσης δεν αποτελούν ανεξάρτητες τεχνικές επιλογές, αλλά συνιστούν αναπόσπαστα στοιχεία της συνολικής αρχιτεκτονικής λογικής του ενδιαμέσου επιπέδου, και η σχεδιάσή τους πρέπει να τελεί σε πλήρη συνέπεια με τις αρχές κανονικοποίησης που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

3.6. Αξιοπιστία και ποιότητα της κανονικοποιημένης πληροφορίας

Η αρχιτεκτονική λειτουργία του ενδιαμέσου επιπέδου κανονικοποίησης δεν εξαντλείται στη δομική μετατροπή και διάθεση της πληροφορίας. Καθώς το επίπεδο αυτό τοποθετείται ως κεντρικό σημείο διέλευσης όλης της πληροφορίας που κινείται από τα συστήματα πεδίου προς τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, αναλαμβάνει ταυτόχρονα ρόλο που αφορά την αξιοπιστία και την ποιότητα της πληροφορίας που διαθέτει. Η παράλειψη αυτής της διάστασης από τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό θα υπονόμει την εμπιστοσύνη στα κανονικοποιημένα δεδομένα και θα περιόριζε την πρακτική αξιοποίησή τους από εφαρμογές που βασίζονται στη συνέπεια και την ακεραιότητα της πληροφορίας.

Η αξιοπιστία του ενδιαμέσου επιπέδου συνδέεται άμεσα με την ικανότητά του να διαχειρίζεται συνθήκες μερικής ή πλήρους αδυναμίας επικοινωνίας με τα συστήματα πεδίου, χωρίς να διαδίδει σφάλματα ή παραπλανητικές τιμές προς τις εφαρμογές. Η απώλεια επικοινωνίας με μια πηγή δεδομένων δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως μηδενική ή σταθερή τιμή, αλλά να αντιμετωπίζεται ως κατάσταση μη διαθεσιμότητας που αποτυπώνεται ρητά μέσω του δείκτη ποιότητας που ορίστηκε στο πλαίσιο της κανονικοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, οι εφαρμογές ανώτερου επιπέδου λαμβάνουν πάντοτε σαφή ένδειξη για την κατάσταση εγκυρότητας κάθε μεταβλητής, γεγονός που επιτρέπει την ορθολογική διαχείριση ελλিপών δεδομένων χωρίς να παραβιάζεται η δομική συνέπεια του κανονικοποιημένου συνόλου (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025). Επιπλέον, η αρχιτεκτονική πρέπει να περιλαμβάνει μηχανισμούς ανίχνευσης και αντιμετώπισης τιμών εκτός αναμενόμενου εύρους, καθώς και δεδομένων που παρουσιάζουν ασυνέπεια ως προς τη χρονική ακολουθία ή την αναμενόμενη δομή, ώστε να αποτρέπεται η ανεπίγνωστη διάδοση σφαλμάτων προς ανώτερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής.

Η αξιοπιστία και η ποιότητα της κανονικοποιημένης πληροφορίας, όπως αναπτύχθηκαν στην παρούσα ενότητα, αφορούν την ορθότητα και την εγκυρότητα των δεδομένων που παράγει το ενδιαμέσο επίπεδο. Διακριτές από αυτές είναι η προστασία της ροής πληροφορίας και η παρακολούθηση της ίδιας της λειτουργίας του επιπέδου, οι οποίες δεν αφορούν την ποιότητα του κάθε δεδομένου αλλά την ασφάλεια και την επιχειρη-

σιακή ευρωστία της υποδομής, και για τον λόγο αυτό εξετάζονται ως αρχιτεκτονικές λειτουργίες του συνολικού σχεδιασμού στην ενότητα 5.8.

Η αξιοπιστία και η ποιότητα αντιμετωπίζονται ως αναπόσπαστο τμήμα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, και όχι ως περιφερειακή λειτουργία που προστίθεται εκ των υστέρων. Η ενσωμάτωσή τους εξαρχής στη λογική του επιπέδου διασφαλίζει ότι η κανονικοποιημένη πληροφορία που διατίθεται προς τις εφαρμογές χαρακτηρίζεται τόσο από δομική ομοιογένεια, όσο και από επαληθευμένη εγκυρότητα και προστατευμένη ακεραιότητα, αποτελώντας έτσι αξιόπιστη βάση για τη σημασιολογική επεξεργασία και αξιοποίηση που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4. Σημασιολογική διαλειτουργικότητα σε δεδομένα κτιρίων

4.1. Τι σημαίνει σημασιολογική διαλειτουργικότητα και γιατί δεν καλύπτεται μόνο με κανονικοποίηση

Η κανονικοποίηση δεδομένων, όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3, εξασφαλίζει δομική και τυπολογική ομοιογένεια στο επίπεδο της λογικής αναπαράστασης της πληροφορίας. Μέσω της κανονικοποίησης, οι τιμές, οι καταστάσεις, οι συναγερμοί και τα συμβάντα που προέρχονται από ετερογενή συστήματα πεδίου αποδίδονται σε κοινό σχήμα αναφοράς, με συνεπείς μονάδες, τύπους και δείκτες ποιότητας. Ωστόσο, η δομική αυτή συνέπεια, αν και αναγκαία, δεν επαρκεί για να καταστήσει τα δεδομένα αξιοποιήσιμα από εφαρμογές που απαιτούν κατανόηση του νοήματος και όχι μόνο της μορφής της πληροφορίας. Η μετάβαση από δομικά συνεπή δεδομένα σε δεδομένα με ρητό και κοινά αποδεκτό νόημα αποτελεί το κεντρικό αντικείμενο της σημασιολογικής διαλειτουργικότητας, η οποία συνιστά διακριτό και αναγκαίο επόμενο βήμα στην αρχιτεκτονική που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Ο όρος σημασιολογική διαλειτουργικότητα αναφέρεται στη δυνατότητα διαφορετικών συστημάτων να ανταλλάσσουν πληροφορία με τρόπο που επιτρέπει την αυτόματη και αξιόπιστη ερμηνεία του νοήματός της, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση ή εξειδικευμένη γνώση του συστήματος προέλευσης. Στο πλαίσιο των κτιριακών υποδομών, αυτό σημαίνει ότι μια μεταβλητή δεν αναγνωρίζεται μόνο ως αριθμητική τιμή συγκεκριμένου τύπου και μονάδας, αλλά ως οντότητα με σαφώς ορισμένο λειτουργικό ρόλο, χωρική τοποθεσία και σχέση με άλλες οντότητες του κτιρίου, όπως εξοπλισμό, χώρους και συστήματα. Η διάκριση αυτή έχει τεκμηριωθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία μεταδεδομένων κτιρίων, όπου η απουσία κοινής σημασιολογικής αναφοράς αναγνωρίζεται ως ο κυριότερος περιορισμός για την αυτοματοποιημένη αξιοποίηση δεδομένων σε ενοποιημένες πλατφόρμες (Balaji, et al., 2016).

Η διαφορά μεταξύ κανονικοποίησης και σημασιολογικής διαλειτουργικότητας γίνεται αντιληπτή με σαφήνεια μέσω ενός χαρακτηριστικού παραδείγματος. Δύο αισθητήρες θερμοκρασίας που βρίσκονται σε διαφορετικούς χώρους ενός κτιρίου και συνδέονται μέσω διαφορετικών πρωτοκόλλων μπορούν να κανονικοποιηθούν πλήρως, ώστε και οι δύο να αποδίδουν τιμές σε βαθμούς Κελσίου με κοινό τύπο δεδομένων και κοινό δείκτη ποιότητας. Ωστόσο, η κανονικοποίηση δεν αποκαλύπτει ποιος αισθητήρας βρίσκεται στον χώρο υποδοχής και ποιος στο μηχανοστάσιο, ούτε ορίζει τη σχέση κάθε αισθητήρα με τον ελεγκτή HVAC που εξυπηρετεί ή με τον όροφο στον οποίο ανήκει. Η πληροφορία αυτή, που αφορά το λειτουργικό και χωρικό πλαίσιο των δεδομένων, αποτελεί το κεντρικό αντικείμενο της σημασιολογικής μοντελοποίησης και δεν μπορεί να προκύψει αυτόματα από τη δομική κανονικοποίηση, ανεξάρτητα από την πληρότητά της (Balaji, et al., 2016).

Η σημασία αυτής της διάκρισης αναδεικνύεται ιδιαίτερα όταν εξετάζονται οι απαιτήσεις εφαρμογών ανώτερου επιπέδου. Η ενεργειακή βελτιστοποίηση, η προγνωστική συντήρηση, και η αυτόματη ανάλυση απόδοσης δεν απαιτούν απλώς πρόσβαση σε δομικά συνεπή δεδομένα, αλλά προϋποθέτουν ότι τα δεδομένα αυτά μπορούν να συσχετιστούν αυτόματα με τις οντότητες του κτιρίου στις οποίες αναφέρονται, χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη παραμετροποίηση για κάθε νέα εγκατάσταση. Η απουσία αυτής της δυνατότητας οδηγεί στην ανάπτυξη εφαρμογών που εξαρτώνται από αδόμητη γνώση της τοπολογίας κάθε κτιρίου, περιορίζοντας δραστικά τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και κλιμάκωσης των λύσεων (Dawson-Haggerty, Jiang, Tolle, Ortiz, & Culler, 2010).

Η σημασιολογική διαλειτουργικότητα επιτυγχάνεται μέσω της αποτύπωσης των δεδομένων σε κοινά αποδεκτά μοντέλα που ορίζουν τύπους οντοτήτων, σχέσεις μεταξύ τους και χαρακτηριστικά που τις περιγράφουν. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν ως κοινό πλαίσιο ερμηνείας, επιτρέποντας σε διαφορετικές εφαρμογές να κατανοούν τα δεδομένα με ισοδύναμο τρόπο ανεξάρτητα από την τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή τους. Στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, η σημασιολογική διαλειτουργικότητα εδράζεται στα κανονικοποιημένα δεδομένα που παράγει το ενδιάμεσο επίπεδο και συνιστά το επόμενο επίπεδο εμπλουτισμού, κατά το οποίο η δομικά συνεπής πληροφορία αντιστοιχίζεται σε σημασιολογικές οντότητες μέσω καθιερωμένων μοντέλων, όπως αυτά που εξετάζονται στις επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου.

4.2. Ετικετοποίηση και κανόνες αντιστοίχισης σε τεχνικά δεδομένα

Η μετάβαση από κανονικοποιημένα δεδομένα σε σημασιολογικά εμπλουτισμένες οντότητες προϋποθέτει έναν ενδιάμεσο μηχανισμό που να αποδίδει νόημα στις μεταβλητές χωρίς να απαιτεί την πλήρη ανακατασκευή της τοπολογίας του κτιρίου από την αρχή. Ο μηχανισμός αυτός είναι η ετικετοποίηση, δηλαδή η απόδοση δομημένων περιγραφικών χαρακτηριστικών σε κάθε μεταβλητή ή σημείο μέτρησης, μέσω των οποίων αποτυπώνεται το λειτουργικό, χωρικό και τεχνικό πλαίσιο στο οποίο αυτή εντάσσεται. Η ετικετοποίηση δεν αντικαθιστά τη σημασιολογική μοντελοποίηση, αλλά αποτελεί απαραίτητο προπαρασκευαστικό βήμα που συνδέει την κανονικοποιημένη δομή των δεδομένων με το εννοιολογικό πλαίσιο που ορίζουν τα σημασιολογικά μοντέλα.

Στο πλαίσιο των κτιριακών υποδομών, η ετικετοποίηση αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της πολυπλοκότητας και της ετερογένειας των σημείων μέτρησης που παράγουν τα επιμέρους υποσυστήματα. Ένα μεμονωμένο σημείο μέτρησης, όπως η μέτρηση θερμοκρασίας από έναν αισθητήρα, χρειάζεται να περιγραφεί ως προς τον τύπο της φυσικής ποσότητας που μετρά, τη θέση του στο κτίριο, τον εξοπλισμό με τον οποίο συνδέεται, και τον λειτουργικό ρόλο που επιτελεί εντός του υποσυστήματος στο οποίο ανήκει. Η ετικετοποίηση αποδίδει αυτές τις πληροφορίες ως δομημένα χαρακτηριστικά που συνοδεύουν το σημείο μέτρησης, επιτρέποντας την αυτόματη κατηγοριοποίησή του και τη συσχέτισή του με άλλα σημεία που μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά, ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο ή το σύστημα που τα παράγει (Balaji, et al., 2016).

Η αποτελεσματικότητα της ετικετοποίησης εξαρτάται από την ύπαρξη σαφώς ορισμένων κανόνων αντιστοίχισης, οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα χαρακτηριστικά των κανονικοποιημένων δεδομένων μεταφράζονται σε ετικέτες. Οι κανόνες αυτοί λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ της τεχνικής αναπαράστασης της πληροφορίας, όπως αυτή προκύπτει από τα συστήματα πεδίου και τη διαδικασία κανονικοποίησης, και του εννοιολογικού λεξιλογίου που χρησιμοποιεί το σημασιολογικό μοντέλο. Στην πράξη, οι κανόνες αντιστοίχισης εκφράζονται ως δηλώσεις που συνδέουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των δεδομένων, όπως η ονομασία του σημείου, ο τύπος της μεταβλητής, η μονάδα μέτρησης, ή η θέση στην ιεραρχία του συστήματος, με συγκεκριμένες ετικέτες ή τύπους οντοτήτων που ορίζονται από το σημασιολογικό μοντέλο (Malkawi, et al., 2023).

Η διαμόρφωση των κανόνων αντιστοίχισης αποτελεί από μόνη της μια διαδικασία που απαιτεί τεχνική γνώση τόσο των συστημάτων πεδίου όσο και του σημασιολογικού μοντέλου που χρησιμοποιείται. Σε εγκαταστάσεις με μεγάλο αριθμό σημείων μέτρησης,

η χειροκίνητη ετικετοποίηση καθίσταται ανέφικτη, και η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων ή ημιαυτοματοποιημένων μηχανισμών αντιστοίχισης αποτελεί πρακτική αναγκαιότητα. Οι μηχανισμοί αυτοί αξιοποιούν μοτίβα στην ονοματολογία των σημείων, στη δομή της ιεραρχίας των συστημάτων και στις ιδιότητες των κανονικοποιημένων δεδομένων για να εφαρμόζουν αυτόματα τους κανόνες αντιστοίχισης, με δυνατότητα ανθρώπινης επαλήθευσης και διόρθωσης σε περιπτώσεις αμφισημίας. Η ανάγκη για τέτοιους μηχανισμούς έχει αναδειχθεί σε μελέτες που εξετάζουν την κλιμάκωση σημασιολογικής μοντελοποίησης σε πραγματικές κτιριακές εγκαταστάσεις, όπου το κόστος χειροκίνητης ετικετοποίησης αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την ευρεία υιοθέτηση (Balaji, et al., 2016).

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι κανόνες αντιστοίχισης δεν αποτελούν στατικές δηλώσεις, αλλά στοιχεία που απαιτούν συντήρηση και επικαιροποίηση καθώς εξελίσσεται η εγκατάσταση. Η προσθήκη νέου εξοπλισμού, η αναδιαμόρφωση υποσυστημάτων ή η αλλαγή ονοματολογίας σημείων μπορεί να καταστήσει ορισμένους κανόνες ανεπαρκείς ή εσφαλμένους, με συνέπεια την εισαγωγή ασυνεπειών στην ετικετοποίηση που μεταδίδονται προς το σημασιολογικό μοντέλο. Η αντιμετώπιση αυτής της δυναμικής διάστασης αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του σχεδιασμού του μηχανισμού ετικετοποίησης και συνδέεται άμεσα με τα ζητήματα συντήρησης και εξέλιξης του σημασιολογικού μοντέλου που εξετάζονται σε επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου. Στο πλαίσιο της συνολικής αρχιτεκτονικής, η ετικετοποίηση και οι κανόνες αντιστοίχισης λειτουργούν ως το ενδιάμεσο στρώμα που καθιστά εφικτή τη μετάβαση από την κανονικοποιημένη αναπαράσταση στη σημασιολογική μοντελοποίηση, και η ποιότητά τους καθορίζει άμεσα την πληρότητα και την αξιοπιστία του σημασιολογικού εμπλουτισμού που ακολουθεί.

4.3. Project Haystack ως προσέγγιση σημασιολογικής ετικετοποίησης

Μεταξύ των καθιερωμένων προσεγγίσεων σημασιολογικής μοντελοποίησης για κτιριακές υποδομές, το Project Haystack αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες πρακτικές λύσεις, με έμφαση στην ετικετοποίηση δεδομένων μέσω ενός ανοικτού και επεκτάσιμου λεξιλογίου. Η προσέγγιση αναπτύχθηκε με στόχο την αντιμετώπιση του πρακτικού προβλήματος που αντιμετωπίζουν διαχειριστές κτιρίων και προγραμματιστές εφαρμογών, οι οποίοι καλούνται να αξιοποιήσουν δεδομένα από ετερογενή συστήματα χωρίς κοινή περιγραφή της σημασίας τους. Το Haystack δεν αποτελεί τυπική οντολογία με αυστηρή λογική δομή, αλλά ένα πρακτικό σχήμα ετικετοποίησης που επιτρέπει την

περιγραφή μεταβλητών, εξοπλισμού και χώρων μέσω συνδυασμών ετικετών με καθορισμένη σημασία.

Ο πυρήνας της προσέγγισης Haystack στηρίζεται στην έννοια των tags, δηλαδή ετικετών που αποδίδονται σε κάθε οντότητα και αποτυπώνουν χαρακτηριστικά όπως ο τύπος της μεταβλητής, η φυσική ποσότητα που αναπαριστά, η λειτουργία που επιτελεί και η σχέση της με άλλες οντότητες του κτιρίου. Οι ετικέτες οργανώνονται σε ιεραρχικές κατηγορίες και μπορούν να συνδυαστούν ώστε να αποδίδουν σύνθετες περιγραφές, όπως για παράδειγμα ο χαρακτηρισμός μιας μεταβλητής ως αισθητήρα θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής συγκεκριμένης μονάδας αερισμού. Η ευελιξία αυτή επιτρέπει την προσαρμογή του σχήματος σε διαφορετικές τοπολογίες εγκαταστάσεων χωρίς να απαιτείται τροποποίηση του βασικού λεξιλογίου, ενώ η ανοικτή φύση του επιτρέπει την επέκτασή του με ετικέτες που αντικατοπτρίζουν ιδιαιτερότητες συγκεκριμένων έργων ή τομέων εφαρμογής.

Από αρχιτεκτονική άποψη, η ενσωμάτωση του Haystack στο ενδιάμεσο επίπεδο κανονικοποίησης πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας αντιστοίχισης που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, κατά την οποία οι κανονικοποιημένες μεταβλητές εμπλουτίζονται με το κατάλληλο σύνολο ετικετών. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τις δομικά συνεπείς αλλά σημασιολογικά ουδέτερες εγγραφές του κανονικοποιημένου επιπέδου σε περιγραφικές οντότητες που μπορούν να αναγνωριστούν και να αξιοποιηθούν αυτόματα από εφαρμογές που υποστηρίζουν το σχήμα Haystack. Η συμβατότητα με το σχήμα αυτό αποτελεί σημαντικό πρακτικό πλεονέκτημα, καθώς αυξάνει τη φορητότητα των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών και εφαρμογών που το υιοθετούν ως κοινό πλαίσιο αναφοράς (Malkawi, et al., 2023).

Ωστόσο, η προσέγγιση Haystack παρουσιάζει και περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Η απουσία αυστηρής λογικής δομής σημαίνει ότι δεν παρέχεται εγγενής μηχανισμός ελέγχου συνέπειας των ετικετών ή αυτόματης συναγωγής νέων σχέσεων από υπάρχουσες, δυνατότητες που προσφέρουν πιο τυπικές οντολογικές προσεγγίσεις. Επιπλέον, η ευελιξία στον συνδυασμό ετικετών μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέπειες μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων, εάν δεν τηρούνται αυστηρά οι κανόνες αντιστοίχισης που έχουν καθοριστεί για το συγκεκριμένο έργο. Οι περιορισμοί αυτοί επισημαίνονται στη βιβλιογραφία σημασιολογικής μοντελοποίησης κτιρίων, όπου η επιλογή μεταξύ ετικετοποιητικών και οντολογικών προσεγγίσεων αναδεικνύεται ως ουσιαστικό αρχιτεκτονικό ζήτημα με επιπτώσεις στη δυνατότητα αυτοματοποιημένης αξιοποίησης των δεδομένων (Balaji, et al., 2016).

Στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, το Project Haystack αξιολογείται ως κατάλληλη προσέγγιση για την επίτευξη πρακτικής σημασιολογικής διαλειτουργικότητας σε εγκαταστάσεις όπου η προτεραιότητα είναι η ταχεία ετικετοποίηση μεγάλου αριθμού μεταβλητών και η συμβατότητα με ευρέως υιοθετημένες πλατφόρμες. Η αναγνώριση των περιορισμών του οδηγεί στη συμπληρωματική εξέταση του Brick Schema, το οποίο προσφέρει αυστηρότερη οντολογική δομή και εκτενέστερες δυνατότητες μοντελοποίησης σχέσεων μεταξύ οντοτήτων, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

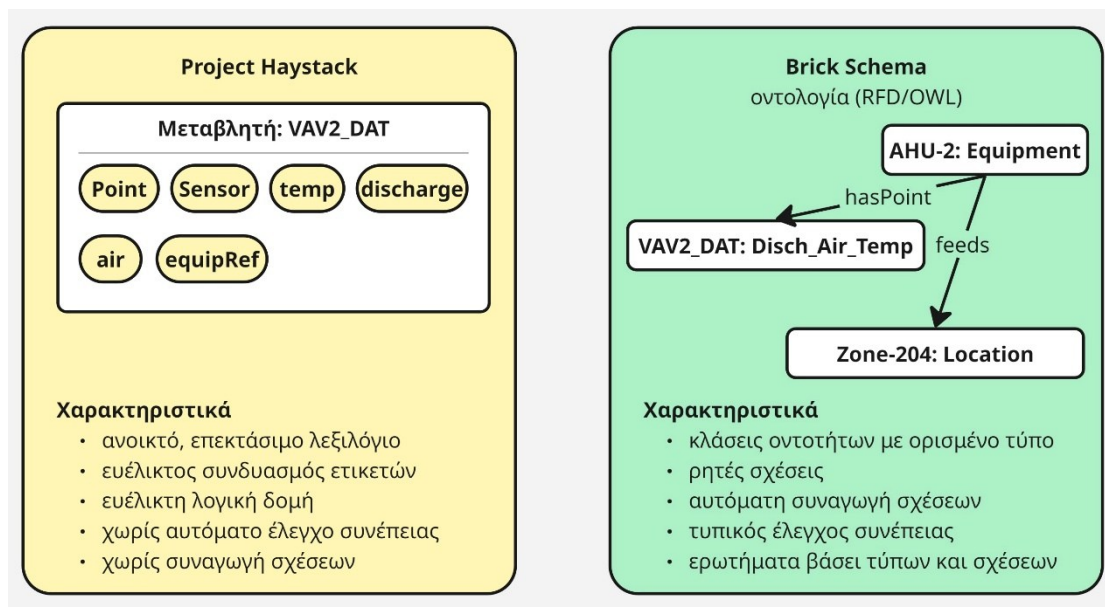
4.4. Brick Schema ως σχήμα μοντελοποίησης εξοπλισμού, χώρων και σημείων

Το Brick Schema αποτελεί ανοικτό σχήμα μοντελοποίησης κτιριακών υποδομών που αναπτύχθηκε με στόχο να καλύψει τους περιορισμούς των ετικετοποιητικών προσεγγίσεων, παρέχοντας τυπική οντολογική δομή για την περιγραφή εξοπλισμού, χώρων και σημείων μέτρησης, καθώς και των σχέσεων μεταξύ τους. Σε αντίθεση με το Project Haystack, το Brick Schema οργανώνεται ως τυπική οντολογία διατυπωμένη στις γλώσσες RDF και OWL, μέσω των οποίων ορίζονται με ακρίβεια κλάσεις οντοτήτων, ιδιότητες και σχέσεις, ενώ παράλληλα καθίσταται εφικτή η εφαρμογή συλλογιστικής για την αυτόματη ανάδειξη σχέσεων που δεν έχουν δηλωθεί ρητά, καθώς και ο τυπικός έλεγχος συνέπειας του μοντέλου (Balaji, et al., 2016). Η προσέγγιση αυτή καθιστά το Brick Schema ιδιαίτερα κατάλληλο για αρχιτεκτονικές που απαιτούν βαθύτερη σημασιολογική ενοποίηση και δυνατότητα αυτόματης επεξεργασίας των σχέσεων μεταξύ οντοτήτων του κτιρίου.

Ο πυρήνας του Brick Schema οργανώνεται γύρω από τρεις θεμελιώδεις κατηγορίες οντοτήτων. Η πρώτη αφορά τον εξοπλισμό, δηλαδή τις φυσικές συσκευές και μηχανολογικά στοιχεία που συνθέτουν τα υποσυστήματα του κτιρίου, όπως ψύκτες, αντλίες, ελεγκτές και μονάδες αερισμού. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τους χώρους, δηλαδή τις φυσικές ή λογικές χωρικές ενότητες του κτιρίου, από επιμέρους δωμάτια και ζώνες έως ορόφους και το κτίριο στο σύνολό του. Η τρίτη κατηγορία αφορά τα σημεία μέτρησης, τα οποία αντιστοιχούν στις μετρούμενες ή ελεγχόμενες μεταβλητές που παράγουν τα συστήματα πεδίου και τα οποία συνδέονται ρητά με τον εξοπλισμό ή τον χώρο στον οποίο αναφέρονται. Η ρητή μοντελοποίηση των σχέσεων μεταξύ αυτών των τριών κατηγοριών αποτελεί το κεντρικό αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό που διακρίνει το Brick Schema από απλούστερες προσεγγίσεις ετικετοποίησης, καθώς επιτρέπει σε μια εφαρμογή να συναγάγει αυτόματα, για παράδειγμα, ποια σημεία μέτρησης αντιστοιχούν σε

συγκεκριμένο εξοπλισμό, ποιος εξοπλισμός εξυπηρετεί συγκεκριμένο χώρο, και ποιες ζώνες ελέγχου επηρεάζονται από δεδομένη μονάδα **HVAC**.

Η ενσωμάτωση του Brick Schema στην αρχιτεκτονική του ενδιαμέσου επιπέδου κανονικοποίησης πραγματοποιείται σε δύο διακριτά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, τα κανονικοποιημένα σημεία μέτρησης αντιστοιχίζονται σε τύπους οντοτήτων Brick μέσω των κανόνων ετικετοποίησης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αποκτώντας έτσι τυπική σημασιολογική ταυτότητα εντός του μοντέλου. Στο δεύτερο στάδιο, ορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων, συνδέοντας τα σημεία μέτρησης με τον εξοπλισμό που τα παράγει και τους χώρους που εξυπηρετούν, με βάση την τοπολογία της εγκατάστασης και τη λειτουργική λογική των υποσυστημάτων. Η ολοκλήρωση αυτών των δύο σταδίων παράγει ένα πλήρες σημασιολογικό μοντέλο του κτιρίου, στο οποίο κάθε μεταβλητή εντάσσεται σε σαφώς ορισμένο λειτουργικό και χωρικό πλαίσιο, επιτρέποντας την αυτόματη αξιοποίησή της από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου χωρίς εξειδικευμένη γνώση της τοπολογίας κάθε επιμέρους εγκατάστασης (Malkawi, et al., 2023). Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων απεικονίζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Σύγκριση Project Haystack και Brick Schema.

Η τυπική οντολογική δομή του Brick Schema προσφέρει επιπλέον δυνατότητες που δεν είναι εφικτές με ετικετοποιητικές προσεγγίσεις. Η αυτόματη συναγωγή σχέσεων επιτρέπει σε εφαρμογές να εντοπίζουν έμμεσες συνδέσεις μεταξύ οντοτήτων που δεν έχουν δηλωθεί ρητά, αλλά προκύπτουν από τη λογική του μοντέλου. Ο τυπικός έλεγχος συνέπειας επιτρέπει τον εντοπισμό αντιφάσεων ή ελλείψεων στο μοντέλο πριν από την αξιοποίησή του από εφαρμογές, μειώνοντας τον κίνδυνο εσφαλμένων συσχετισμών. Παράλληλα, η συμβατότητα με τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού επιτρέπει τη διασύνδεση του μοντέλου κτιρίου με εξωτερικές βάσεις γνώσης και τυποποιημένους

ορισμούς φυσικών ποσοτήτων, ενισχύοντας περαιτέρω τη διαλειτουργικότητα σε επίπεδο νοήματος (Balaji, et al., 2016).

Στο πλαίσιο της συνολικής αρχιτεκτονικής που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, το Brick Schema αξιολογείται ως η πλέον ώριμη και ολοκληρωμένη προσέγγιση για την επίτευξη βαθιάς σημασιολογικής διαλειτουργικότητας, ιδίως σε εγκαταστάσεις όπου απαιτείται αυτόματη επεξεργασία σύνθετων σχέσεων μεταξύ εξοπλισμού, χώρων και σημείων μέτρησης. Με βάση τη σύγκριση των δύο προσεγγίσεων, η παρούσα εργασία επιλέγει το Brick Schema ως το σημασιολογικό σχήμα της αρχιτεκτονικής, καθώς το σενάριο της μελέτης περίπτωσης απαιτεί τη ρητή μοντελοποίηση σχέσεων μεταξύ εξοπλισμού, χώρων και σημείων μέτρησης και την αυτόματη συναγωγή έμμεσων συσχετίσεων, δυνατότητες που δεν παρέχει η ετικετοποιητική προσέγγιση του Haystack. Το Project Haystack εξετάστηκε ως η κύρια εναλλακτική προσέγγιση και η ανάλυση των περιορισμών του τεκμηριώνει την επιλογή του Brick, χωρίς να αποκλείεται η αξιοποίηση στοιχείων ετικετοποίησης σε εγκαταστάσεις με διαφορετικές προτεραιότητες.

4.5. Διαδικασία χαρτογράφησης από κανονικοποιημένα δεδομένα σε σημασιολογικές οντότητες

Η χαρτογράφηση από κανονικοποιημένα δεδομένα σε σημασιολογικές οντότητες αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο μεταξύ του επιπέδου δομικής κανονικοποίησης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3 και του πλήρους σημασιολογικού μοντέλου που παράγεται μέσω σχημάτων όπως το Project Haystack και το Brick Schema. Η διαδικασία εκτυλίσσεται σε διακριτά βήματα, καθένα από τα οποία προϋποθέτει την επιτυχή ολοκλήρωση του προηγούμενου, και η αποτελεσματικότητά της καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του σημασιολογικού εμπλουτισμού που θα είναι τελικά διαθέσιμος στις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου.

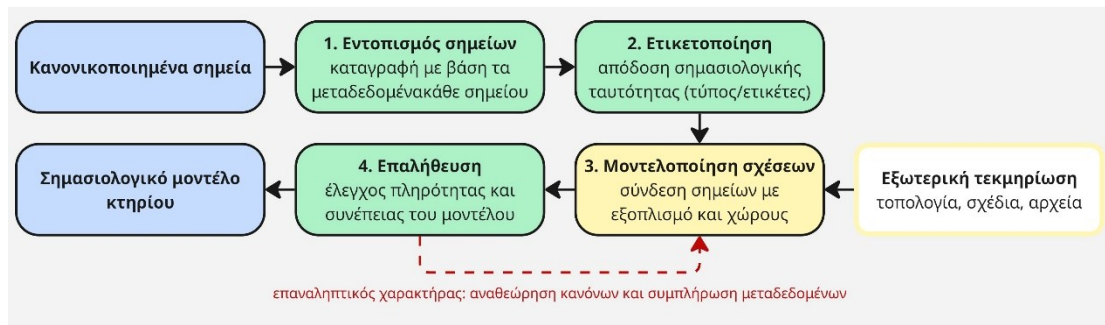
Το πρώτο βήμα αφορά τον εντοπισμό και την καταγραφή όλων των κανονικοποιημένων σημείων μέτρησης που αποτελούν υποψήφια για σημασιολογική αντιστοίχιση. Η καταγραφή στηρίζεται στο σύνολο των μεταδεδομένων που συνοδεύουν κάθε σημείο μέτρησης μετά την κανονικοποίηση, δηλαδή στην ονομασία, τον τύπο της μεταβλητής, τη μονάδα μέτρησης, το πρωτόκολλο προέλευσης και την ιεραρχική θέση στη δομή του συστήματος. Η πληρότητα αυτών των μεταδεδομένων αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την επιτυχή εκτέλεση των επόμενων βημάτων, καθώς η σημασιολογική αντιστοίχιση στηρίζεται σε αυτά ως πρωτογενή πηγή πληροφορίας για τον χαρακτήρα κάθε σημείου (Balaji, et al., 2016).

Στο δεύτερο βήμα εφαρμόζονται οι κανόνες ετικετοποίησης που έχουν ορισθεί στο πλαίσιο του επιλεγμένου σημασιολογικού σχήματος, ώστε κάθε σημείο μέτρησης να λάβει την αρχική του σημασιολογική ταυτότητα. Τα χαρακτηριστικά κάθε σημείου αντιστοιχίζονται στους κατάλληλους τύπους οντοτήτων ή ετικετών ανάλογα με το σχήμα που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση του Brick Schema η αντιστοίχιση περιλαμβάνει τον ορισμό του τύπου οντότητας, όπως αισθητήρας θερμοκρασίας ή βαλβίδα ελέγχου, ενώ στην περίπτωση του Project Haystack περιλαμβάνει την απόδοση του κατάλληλου συνδυασμού ετικετών. Η ακρίβεια αυτής της αντιστοίχισης εξαρτάται από την ποιότητα των κανόνων που έχουν αναπτυχθεί και από τον βαθμό στον οποίο η ονοματολογία των κανονικοποιημένων σημείων ακολουθεί συνεπείς συμβάσεις (Malkawi, et al., 2023).

Το τρίτο βήμα αφορά τη μοντελοποίηση των σχέσεων μεταξύ των αναγνωρισμένων οντοτήτων, δηλαδή τη σύνδεση των σημείων μέτρησης με τον εξοπλισμό που τα παράγει και τους χώρους που εξυπηρετούν. Το βήμα αυτό απαιτεί γνώση της τοπολογίας της εγκατάστασης που δεν ενσωματώνεται στα μεταδεδομένα των σημείων μέτρησης και προϋποθέτει επιπλέον πληροφορία για τη δομή του κτιρίου, όπως η διάταξη των ζωνών ελέγχου, η αντιστοίχιση εξοπλισμού σε χώρους και οι λειτουργικές εξαρτήσεις μεταξύ υποσυστημάτων. Η πληροφορία αυτή παρέχεται συνήθως μέσω εξωτερικής τεκμηρίωσης, όπως σχέδια εγκατάστασης, πίνακες χαρτογράφησης ή αρχεία διαμόρφωσης, και αποτελεί το στοιχείο της διαδικασίας που απαιτεί ανθρώπινη εποπτεία ανεξάρτητα από το επίπεδο αυτοματοποίησης των προηγούμενων βημάτων (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Το τέταρτο βήμα αφορά την επαλήθευση του παραγόμενου σημασιολογικού μοντέλου ως προς την πληρότητα και τη συνέπειά του. Η επαλήθευση περιλαμβάνει τον έλεγχο ότι όλα τα σημεία μέτρησης έχουν λάβει σημασιολογική ταυτότητα, ότι οι σχέσεις που έχουν ορισθεί είναι συνεπείς με τη λογική του σχήματος και ότι δεν υπάρχουν κενά που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη ερμηνεία από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου. Στην περίπτωση του Brick Schema, η τυπική οντολογική δομή επιτρέπει τον ορισμό κανόνων συνέπειας που εφαρμόζονται αυτόματα στο παραγόμενο μοντέλο μέσω συλλογιστικής, μειώνοντας την εξάρτηση από αποκλειστικά χειροκίνητο έλεγχο.

Η διαδικασία χαρτογράφησης έχει επαναληπτικό χαρακτήρα, καθώς η εφαρμογή των κανόνων ετικετοποίησης ενδέχεται να αναδείξει ελλείψεις στα μεταδεδομένα των κανονικοποιημένων σημείων, ενώ η επαλήθευση του μοντέλου ενδέχεται να απαιτήσει αναθεώρηση των κανόνων αντιστοίχισης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Διαδικασία χαρτογράφησης από κανονικοποιημένα δεδομένα σε σημασιολογικές οντότητες.

Ο επαναληπτικός αυτός χαρακτήρας υπογραμμίζει ότι η σημασιολογική χαρτογράφηση εξελίσσεται παράλληλα με την εγκατάσταση και απαιτεί συστηματική διαχείριση, στοιχείο που συνδέεται άμεσα με τα ζητήματα συντήρησης και εξέλιξης του σημασιολογικού μοντέλου που εξετάζονται στην επόμενη ενότητα.

4.6. Έλεγχος συνέπειας, συντήρηση και εξέλιξη σημασιολογικού μοντέλου

Η παραγωγή ενός σημασιολογικού μοντέλου μέσω της διαδικασίας χαρτογράφησης που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα δεν αποτελεί τερματικό στάδιο, αλλά αφετηρία μιας συνεχούς διαδικασίας διαχείρισης. Το σημασιολογικό μοντέλο ενός κτιρίου υπόκειται σε πιέσεις αλλαγής που προκύπτουν τόσο από την εξέλιξη της ίδιας της εγκατάστασης όσο και από την αναθεώρηση των κανόνων αντιστοίχισης που εφαρμόστηκαν κατά την αρχική χαρτογράφηση. Η συστηματική αντιμετώπιση αυτών των πιέσεων μέσω ελέγχου συνέπειας, συντήρησης, και ελεγχόμενης εξέλιξης αποτελεί αναπόσπαστη λειτουργία του ενδιάμεσου επιπέδου και προϋπόθεση για τη μακροχρόνια αξιοπιστία του σημασιολογικού εμπλουτισμού.

Ο έλεγχος συνέπειας αφορά την επαλήθευση ότι το σημασιολογικό μοντέλο παραμένει εσωτερικά συνεπές καθώς εισάγονται νέες οντότητες ή τροποποιούνται υπάρχουσες. Στο πλαίσιο σχημάτων με τυπική οντολογική δομή, όπως το Brick Schema, ο έλεγχος αυτός μπορεί να υλοποιηθεί μέσω αυτοματοποιημένων μηχανισμών που επαληθεύουν ότι κάθε νέα οντότητα ανήκει σε έγκυρο τύπο, ότι οι σχέσεις που ορίζονται μεταξύ οντοτήτων είναι επιτρεπτές από το σχήμα και ότι δεν εισάγονται αντιφάσεις που θα οδηγούσαν σε εσφαλμένη συναγωγή κατά την εφαρμογή συλλογιστικής. Για σχήματα με λιγότερο αυστηρή δομή, όπως το Project Haystack, ο έλεγχος συνέπειας στηρίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε κανόνες που ορίζονται εξωτερικά από το ίδιο το σχήμα και απαιτεί αντίστοιχα μεγαλύτερη ανθρώπινη εποπτεία (Balaji, et al., 2016).

Η συντήρηση του σημασιολογικού μοντέλου αφορά τη διαχείριση των αλλαγών που προκύπτουν από την εξέλιξη της φυσικής εγκατάστασης. Η προσθήκη νέου εξοπλι-

σμού, η αντικατάσταση αισθητήρων, η αναδιαμόρφωση ζωνών ελέγχου ή η επέκταση υποσυστημάτων δημιουργούν νέα σημεία μέτρησης ή τροποποιούν τις σχέσεις υπαρχουσών οντοτήτων, με αποτέλεσμα το μοντέλο να αποκλίνει σταδιακά από την πραγματική κατάσταση της εγκατάστασης εάν δεν συντηρείται συστηματικά. Η απόκλιση αυτή έχει άμεσες επιπτώσεις στην αξιοπιστία των εφαρμογών ανώτερου επιπέδου, οι οποίες στηρίζονται στο μοντέλο για την αυτόματη ερμηνεία των δεδομένων, και εφόσον η απόκλιση δεν εντοπιστεί έγκαιρα, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα χωρίς εμφανή ένδειξη αποτυχίας (Malkawi, et al., 2023). Η αντιμετώπισή της απαιτεί την ύπαρξη σαφώς ορισμένης διαδικασίας ενημέρωσης του μοντέλου παράλληλα με κάθε αλλαγή στη φυσική εγκατάσταση, η οποία να εντάσσεται στον κύκλο διαχείρισης του ενδιάμεσου επιπέδου.

Η εξέλιξη του σημασιολογικού μοντέλου αναφέρεται σε μια διαφορετική κατηγορία αλλαγών, που αφορά την αναθεώρηση των ίδιων των κανόνων αντιστοίχισης ή την υιοθέτηση νεότερης έκδοσης του σχήματος που χρησιμοποιείται. Τα σχήματα σημασιολογικής μοντελοποίησης, όπως το Brick Schema, εξελίσσονται διαχρονικά ώστε να καλύπτουν νέους τύπους εξοπλισμού, να βελτιώνουν την εκφραστική τους ικανότητα και να αντιμετωπίζουν αδυναμίες που αναδείχθηκαν στην πρακτική εφαρμογή τους. Η μετάβαση σε νεότερη έκδοση σχήματος ενδέχεται να απαιτεί αναθεώρηση τμήματος ή του συνόλου του υπάρχοντος μοντέλου, γεγονός που καθιστά τον σχεδιασμό της εξέλιξης εξίσου κρίσιμο με τον αρχικό σχεδιασμό της χαρτογράφησης. Στην παρούσα αρχιτεκτονική, το ενδιάμεσο επίπεδο υποστηρίζει αυτή τη δυνατότητα εξέλιξης χωρίς να απαιτείται πλήρης επανεκκίνηση της διαδικασίας χαρτογράφησης, διατηρώντας τη συνέχεια της πληροφορίας που έχει ήδη παραχθεί.

Συνολικά, ο έλεγχος συνέπειας, η συντήρηση και η εξέλιξη του σημασιολογικού μοντέλου συνθέτουν το πλαίσιο διαχείρισής του κατά τον κύκλο ζωής της εγκατάστασης. Η ενσωμάτωση αυτών των λειτουργιών στον σχεδιασμό του ενδιάμεσου επιπέδου διασφαλίζει ότι η σημασιολογική διαλειτουργικότητα που επιτυγχάνεται κατά την αρχική ανάπτυξη διατηρείται και ενισχύεται με την πάροδο του χρόνου, αποτελώντας σταθερή βάση για τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

5. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης

5.1. Απαιτήσεις σχεδίασης και κριτήρια αξιολόγησης

Ο σχεδιασμός του ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης, ως αρχιτεκτονικής αναφοράς εφαρμόσιμης σε πραγματικές κτιριακές εγκαταστάσεις, προϋποθέτει τον προσδιο-

ρισμό σαφών απαιτήσεων που καθοδηγούν τις επιλογές σχεδίασης και επιτρέπουν την εκ των υστέρων αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της αρχιτεκτονικής. Οι απαιτήσεις αυτές δεν αφορούν αποκλειστικά τεχνικές επιδόσεις, αλλά καλύπτουν ευρύτερες αρχιτεκτονικές ιδιότητες που συνδέονται με τη δυνατότητα εφαρμογής, επέκτασης και μακροχρόνιας λειτουργίας του επιπέδου σε ετερογενή περιβάλλοντα. Ο ορισμός τους αποτελεί προϋπόθεση για τη συνεκτική περιγραφή της αρχιτεκτονικής στις επόμενες ενότητες και για τη διαμόρφωση των κριτηρίων αξιολόγησης που θα εφαρμοστούν στη μελέτη περίπτωσης του Κεφαλαίου 6.

Η πρώτη και θεμελιώδης απαίτηση είναι η τεχνολογική ανεξαρτησία, η οποία εκφράζει την ικανότητα του ενδιάμεσου επιπέδου να λειτουργεί με οποιοδήποτε συνδυασμό πρωτοκόλλων πεδίου χωρίς να απαιτεί αναδιαμόρφωση του πυρήνα κανονικοποίησης. Η απαίτηση αυτή προκύπτει άμεσα από την ανάλυση της ετερογένειας των κτιριακών εγκαταστάσεων που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2, όπου κατεδείχθη ότι η συνύπαρξη πρωτοκόλλων όπως BACnet, KNX, Modbus και MQTT αποτελεί δομικό χαρακτηριστικό των πραγματικών εγκαταστάσεων και όχι εξαίρεση. Σύμφωνα με την προσέγγιση των (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025), η τεχνολογική ανεξαρτησία επιτυγχάνεται μέσω της αρχιτεκτονικής αποσύζευξης των συνιστωσών σύνδεσης πρωτοκόλλων από τον πυρήνα κανονικοποίησης, ώστε η προσθήκη νέου πρωτοκόλλου να απαιτεί μόνο την ανάπτυξη της αντίστοιχης συνιστώσας σύνδεσης.

Η δεύτερη απαίτηση αφορά την επεκτασιμότητα, η οποία εκφράζει την ικανότητα του επιπέδου να ενσωματώνει αυξανόμενο αριθμό πηγών δεδομένων και εφαρμογών κατανάλωσης χωρίς αναδιαμόρφωση των υφιστάμενων συνιστωσών. Η επεκτασιμότητα ορίζεται εδώ ως δομική ιδιότητα και αποτιμάται με βάση το εύρος των μεταβολών που επιβάλλει κάθε επέκταση, και όχι ως επίδοση εκτέλεσης, η οποία δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί χωρίς πραγματικά δεδομένα. Στην οριζόντια διάσταση, η ενσωμάτωση νέας πηγής δεδομένων περιορίζεται στην ανάπτυξη της αντίστοιχης συνιστώσας σύνδεσης και στην προσθήκη των σχετικών εγγραφών παραμετροποίησης, χωρίς τροποποίηση του πυρήνα κανονικοποίησης ή των εφαρμογών που καταναλώνουν τα δεδομένα. Στην κάθετη διάσταση, η προσθήκη νέας εφαρμογής κατανάλωσης πραγματοποιείται μέσω της βαθμίδας διάθεσης χωρίς μεταβολή των κατώτερων βαθμίδων. Η σημασία της απαίτησης αυτής αναδεικνύεται ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις που εξελίσσονται διαχρονικά, όπου η αρχιτεκτονική πρέπει να απορροφά νέα στοιχεία χωρίς να διαταράσσει τη λειτουργία των ήδη ενσωματωμένων (Alfalouji, et al., 2022).

Η τρίτη απαίτηση είναι η πληρότητα της κανονικοποίησης, η οποία εκφράζει την ικανότητα του επιπέδου να καλύπτει όλους τους τύπους δεδομένων που παράγουν τα συ-

στήματα πεδίου, δηλαδή αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγεμούς και συμβάντα, με ισοδύναμο επίπεδο δομικής συνέπειας. Η μερική κανονικοποίηση, που καλύπτει μόνο ορισμένους τύπους δεδομένων, δημιουργεί ασυμμετρίες στο παραγόμενο σύνολο και περιορίζει την αξιοποίησή του από εφαρμογές που απαιτούν ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργικής κατάστασης του κτιρίου. Η απαίτηση αυτή συνδέεται άμεσα με την ανάλυση των ειδών δεδομένων που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 1 και με τη μεθοδολογία κανονικοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Η τέταρτη απαίτηση αφορά τη δυνατότητα σημασιολογικού εμπλουτισμού, εκφράζοντας την ικανότητα του επιπέδου να υποστηρίζει τη χαρτογράφηση κανονικοποιημένων δεδομένων σε καθιερωμένα σημασιολογικά σχήματα χωρίς να απαιτεί αναδιαμόρφωση της κανονικοποιητικής λογικής. Η απαίτηση αυτή αντανακλά τη διάκριση μεταξύ κανονικοποίησης και σημασιολογικής διαλειτουργικότητας που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 και υπογραμμίζει ότι τα δύο επίπεδα εμπλουτισμού πρέπει να σχεδιάζονται ως συμπληρωματικά και αλληλοϋποστηριζόμενα.

Με βάση τις απαιτήσεις αυτές διαμορφώνονται τα κριτήρια αξιολόγησης που θα εφαρμοστούν στη μελέτη περίπτωσης. Τα κριτήρια αυτά περιλαμβάνουν τον βαθμό κάλυψης των τύπων δεδομένων από τη διαδικασία κανονικοποίησης, την ευκολία ενσωμάτωσης νέων πηγών δεδομένων, την πληρότητα της σημασιολογικής χαρτογράφησης και τον βαθμό στον οποίο τα κανονικοποιημένα και σημασιολογικά εμπλουτισμένα δεδομένα είναι άμεσα αξιοποιήσιμα από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου χωρίς εξειδικευμένη παραμετροποίηση για κάθε εγκατάσταση. Η συστηματική εφαρμογή αυτών των κριτηρίων στη μελέτη περίπτωσης επιτρέπει την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και την ανάδειξη τόσο των δυνατοτήτων όσο και των περιορισμών της.

5.2. Συστατικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής και ροή δεδομένων από το πεδίο προς τις εφαρμογές

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης οργανώνεται σε διακριτές λειτουργικές συνιστώσες, καθεμία από τις οποίες αναλαμβάνει συγκεκριμένο ρόλο στη ροή πληροφορίας από τα συστήματα πεδίου προς τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου. Η οργάνωση αυτή αντανακλά την αρχή της αρχιτεκτονικής αποσύζευξης που διατρέχει ολόκληρη την εργασία, σύμφωνα με την οποία κάθε συνιστώσα ορίζεται από σαφείς διεπαφές εισόδου και εξόδου και μπορεί να εξελιχθεί ανεξάρτητα χωρίς να επηρεάζει τις υπόλοιπες. Η κατανόηση της συνολικής ροής δεδομένων μέσω αυτών των συνιστωσών αποτελεί προϋπόθεση για την αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής

ως ολοκληρωμένου συστήματος και για την κατανόηση των επιμέρους σχεδιαστικών επιλογών που αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

Η ροή δεδομένων ξεκινά από το επίπεδο πεδίου, όπου οι συσκευές πεδίου παράγουν πρωτογενή δεδομένα μέσω των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2. Τα δεδομένα αυτά εισέρχονται στο ενδιάμεσο επίπεδο μέσω των συνιστωσών σύνδεσης πρωτοκόλλων, οι οποίες αποτελούν την πρώτη λειτουργική βαθμίδα της αρχιτεκτονικής. Κάθε συνιστώσα σύνδεσης είναι εξειδικευμένη για ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο και αναλαμβάνει την επικοινωνία με τα αντίστοιχα συστήματα πεδίου, τη συλλογή δεδομένων μέσω του κατάλληλου μηχανισμού, είτε περιοδικής δειγματοληψίας είτε ειδοποίησης μεταβολής, και τη μετατροπή τους σε κοινή εσωτερική αναπαράσταση που τροφοδοτεί τον πυρήνα κανονικοποίησης.

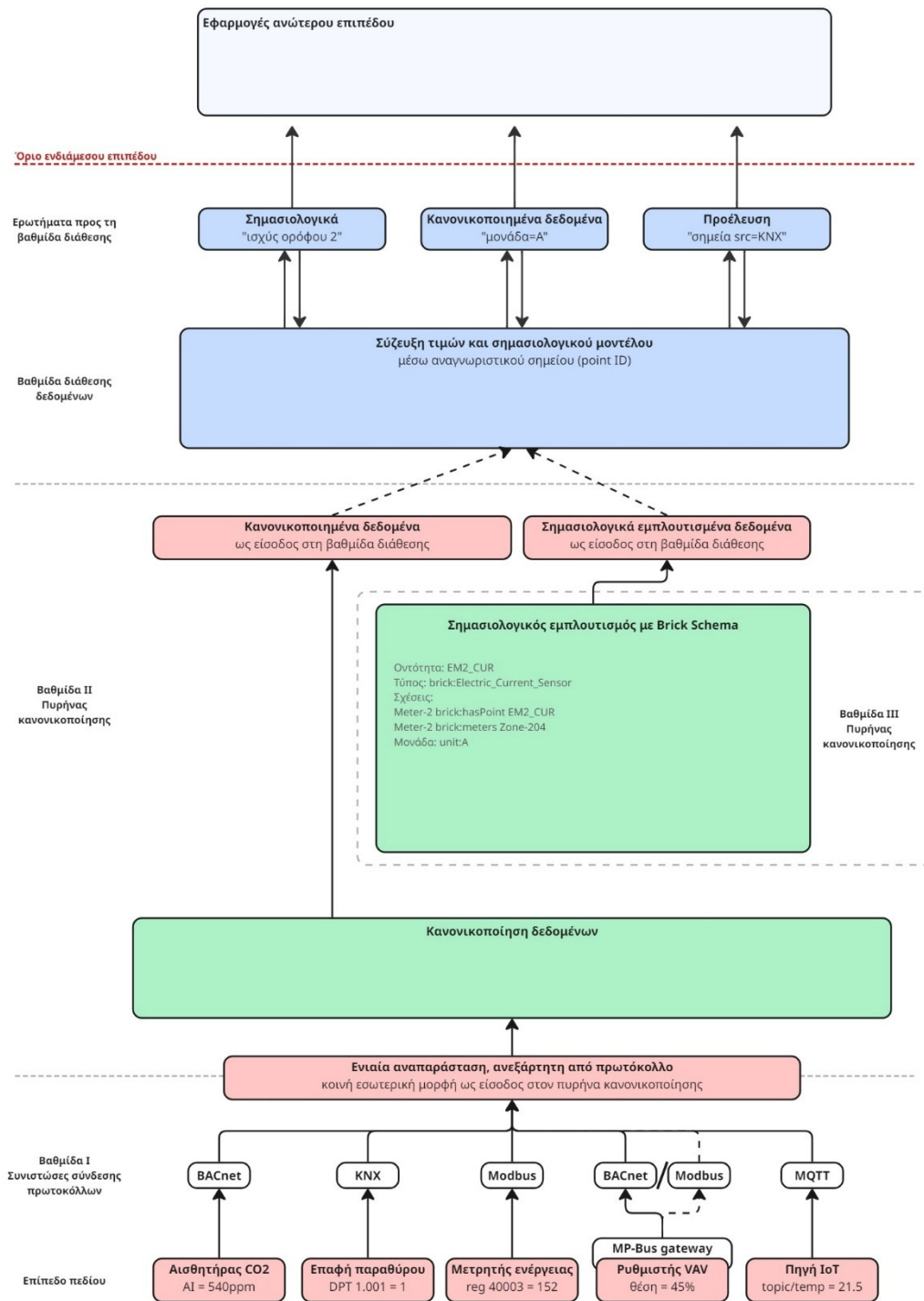
Ο πυρήνας κανονικοποίησης αποτελεί την κεντρική λειτουργική συνιστώσα της αρχιτεκτονικής και εφαρμόζει το σύνολο των κανόνων μετασχηματισμού που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3, καλύπτοντας αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμούς και συμβάντα. Η έξοδος του πυρήνα αποτελεί το κανονικοποιημένο σύνολο δεδομένων, δηλαδή μια δομικά ομοιογενή αναπαράσταση της λειτουργικής κατάστασης του κτιρίου, η οποία είναι ανεξάρτητη από τα πρωτόκολλα και τα συστήματα πεδίου που την παρήγαγαν. Το κανονικοποιημένο αυτό σύνολο αποτελεί τη βάση για κάθε περαιτέρω επεξεργασία εντός του ενδιάμεσου επιπέδου και η ποιότητά του καθορίζει άμεσα την αξιοπιστία όλων των επόμενων βαθμίδων (Blechmann, et al., 2023).

Η επόμενη βαθμίδα αποτελεί το επίπεδο σημασιολογικού εμπλουτισμού, στο οποίο τα κανονικοποιημένα δεδομένα αντιστοιχίζονται σε σημασιολογικές οντότητες μέσω της διαδικασίας χαρτογράφησης που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4. Το αποτέλεσμα αυτής της βαθμίδας είναι ένα σημασιολογικά εμπλουτισμένο σύνολο δεδομένων, στο οποίο κάθε σημείο μέτρησης φέρει τόσο την κανονικοποιημένη τιμή του όσο και τη σημασιολογική του ταυτότητα εντός του μοντέλου του κτιρίου. Η βαθμίδα αυτή λειτουργεί παράλληλα με τον πυρήνα κανονικοποίησης και δεν επεμβαίνει στη ροή των κανονικοποιημένων δεδομένων, διατηρώντας έτσι την αρχιτεκτονική αποσύζευξη μεταξύ δομικής κανονικοποίησης και σημασιολογικού εμπλουτισμού.

Η τελική βαθμίδα της αρχιτεκτονικής αφορά τη διάθεση δεδομένων προς τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, μέσω διεπαφών που υποστηρίζουν διαφορετικά μοντέλα κατανάλωσης πληροφορίας, όπως πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο, ερωτήματα σε ιστορικά δεδομένα και συνδρομή σε ροές συμβάντων. Η βαθμίδα αυτή λειτουργεί ως το εξωτερικό σύνορο του ενδιάμεσου επιπέδου και διασφαλίζει ότι οι εφαρμογές αλληλοεπιδρούν αποκλειστικά με κανονικοποιημένα και σημασιολογικά εμπλουτισμένα δεδο-

μένα, χωρίς άμεση πρόσβαση στα πρωτογενή δεδομένα των συστημάτων πεδίου. Η αρχή αυτή ενισχύει την αποσύζευξη μεταξύ εφαρμογών και συστημάτων πεδίου, η οποία αποτελεί τη θεμελιώδη αρχιτεκτονική λειτουργία του ενδιαμέσου επιπέδου όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3 (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Η συνολική ροή δεδομένων που περιγράφεται, από τις συνιστώσες σύνδεσης πρωτοκόλλων μέσω του πυρήνα κανονικοποίησης και του επιπέδου σημασιολογικού εμπλουτισμού έως τη βαθμίδα διάθεσης, αποτυπώνει μια σαφή αρχιτεκτονική λογική στην οποία κάθε βαθμίδα προσθέτει ένα επίπεδο δομικής ή σημασιολογικής επεξεργασίας στην πληροφορία, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 14. Οι επόμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου αναλύουν καθεμία από αυτές τις βαθμίδες σε επίπεδο σχεδιαστικών αποφάσεων, αναδεικνύοντας τις επιλογές που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα και την επεκτασιμότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής.



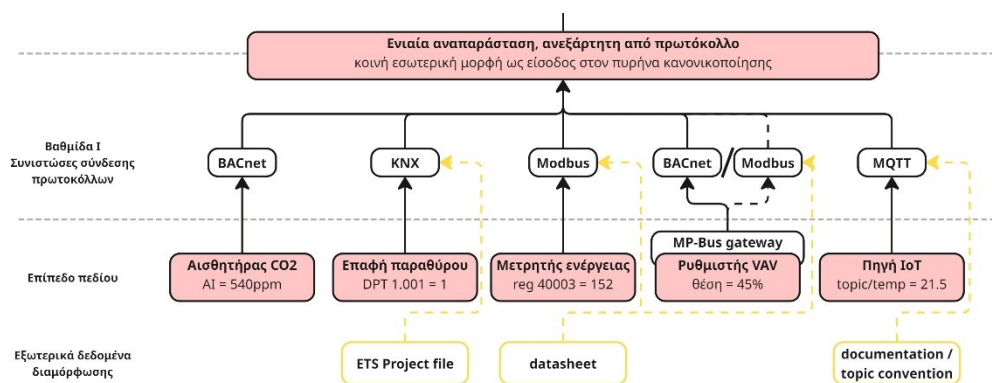
Εικόνα 14: Συνολική αρχιτεκτονική του ενδιάμεσου επιπέδου.

5.3. Βαθμίδα I: Διασύνδεση συστημάτων πεδίου και ενσωμάτωση πολλών πρωτοκόλλων

Η διασύνδεση των συστημάτων πεδίου αποτελεί την πρώτη βαθμίδα της αρχιτεκτονικής και καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το ενδιάμεσο επίπεδο αποκτά πρόσβαση στα πρωτογενή δεδομένα των επιμέρους υποσυστημάτων. Η σχεδίαση αυτής της βαθμίδας πρέπει να αντιμετωπίζει την ετερογένεια των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χαρακτηρίζει τις πραγματικές κτιριακές εγκαταστάσεις, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι οι

ιδιαιτερότητες κάθε πρωτοκόλλου δεν διαπερνούν τα εσωτερικά όρια του ενδιαμέσου επιπέδου και δεν επηρεάζουν τη λειτουργία του πυρήνα κανονικοποίησης.

Η αρχιτεκτονική επιλογή που εξυπηρετεί αυτόν τον στόχο είναι η οργάνωση της διασύνδεσης μέσω εξειδικευμένων συνιστωσών σύνδεσης, μία για κάθε πρωτόκολλο που ενσωματώνεται στην εγκατάσταση. Κάθε συνιστώσα σύνδεσης αναλαμβάνει αποκλειστικά την επικοινωνία με το αντίστοιχο πρωτόκολλο, εφαρμόζοντας τους μηχανισμούς ανακάλυψης συσκευών, ανάγνωσης τιμών, λήψης ειδοποιήσεων και διαχείρισης σφαλμάτων επικοινωνίας που ορίζει το πρωτόκολλο αυτό. Η έξοδος κάθε συνιστώσας είναι ομοιόμορφη και ανεξάρτητη από το πρωτόκολλο προέλευσης, αποτελούμενη από εγγραφές που περιλαμβάνουν την ταυτότητα της πηγής, την τιμή, τον τύπο, τη χρονική σήμανση και έναν αρχικό δείκτη εγκυρότητας της επικοινωνίας. Ακολουθώντας την προσέγγιση των (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025), ο πυρήνας κανονικοποίησης λαμβάνει πάντοτε δεδομένα στην ίδια εσωτερική μορφή, ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο που τα παρήγαγε, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Βαθμίδα I - διασύνδεση πρωτοκόλλων.

- Για το πρωτόκολλο BACnet, η συνιστώσα σύνδεσης αξιοποιεί τον μηχανισμό ανακάλυψης συσκευών και αντικειμένων που παρέχει το πρωτόκολλο, ώστε να αντιστοιχίζει αυτόματα τα διαθέσιμα αντικείμενα και τις ιδιότητές τους στο εσωτερικό μοντέλο του ενδιαμέσου επιπέδου. Η ανακάλυψη αυτή μειώνει την ανάγκη χειροκίνητης παραμετροποίησης, αν και δεν εξαλείφει την ανάγκη επαλήθευσης των αποτελεσμάτων της, καθώς η πρακτική εφαρμογή του BACnet σε ετερογενείς εγκαταστάσεις παρουσιάζει αποκλίσεις που επηρεάζουν την πληρότητα της αυτόματης αντιστοίχισης, όπως αναδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2.
- Για το πρωτόκολλο KNX, η συνιστώσα σύνδεσης στηρίζεται στο αρχείο διαμόρφωσης του έργου που εξάγεται από το ETS, το οποίο παρέχει τις ομάδες διευθύνσεων με τα ονόματά τους και τους τύπους δεδομένων που μεταφέρουν, καθώς το KNX δεν διαθέτει εγγενή μηχανισμό ανακάλυψης κατά τη λειτουργία.

- Για το Modbus, η συνιστώσα σύνδεσης απαιτεί ρητή παραμετροποίηση που ορίζει για κάθε καταχωρητή τη φυσική ποσότητα που αντιπροσωπεύει, τον τύπο δεδομένων και τυχόν συντελεστή κλιμάκωσης, καθώς το πρωτόκολλο δεν ενσωματώνει καμία πληροφορία για τη σημασία των δεδομένων που μεταδίδει.
- Για το MQTT, η συνιστώσα σύνδεσης διαχειρίζεται τη συνδρομή σε θέματα και την ανάλυση των ωφέλιμων φορτίων των μηνυμάτων, αντιστοιχίζοντάς τα στο εσωτερικό μοντέλο βάσει κανόνων που ορίζονται από τη δομή του θέματος και το σχήμα του ωφέλιμου φορτίου.
- Ο μηχανισμός συλλογής δεδομένων διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της μεταβλητής και τις δυνατότητες του πρωτοκόλλου. Για αναλογικές τιμές που μεταβάλλονται συνεχώς, η περιοδική δειγματοληψία με καθορισμένη συχνότητα αποτελεί τη συνηθέστερη προσέγγιση, ενώ για καταστάσεις, συναγερμούς και συμβάντα προτιμάται η ειδοποίηση κατά τη μεταβολή, εφόσον το πρωτόκολλο την υποστηρίζει, ώστε να διατηρείται η χρονική ακρίβεια της καταγραφής. Η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής συλλογής για κάθε σημείο μέτρησης αποτελεί παραμετροποιήσιμη απόφαση που εξαρτάται από τις απαιτήσεις των εφαρμογών κατανάλωσης και από τις δυνατότητες κάθε πρωτοκόλλου (Hildén, et al., 2022).

Η προσθήκη νέου πρωτοκόλλου στην αρχιτεκτονική απαιτεί μόνο την ανάπτυξη της αντίστοιχης συνιστώσας σύνδεσης, χωρίς τροποποίηση οποιασδήποτε άλλης βαθμίδας. Η ιδιότητα αυτή, που προκύπτει από την αρχιτεκτονική αποσύζευξη μεταξύ συνιστωσών σύνδεσης και πυρήνα κανονικοποίησης, αποτελεί την πρακτική έκφραση της απαίτησης τεχνολογικής ανεξαρτησίας που ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα και καθιστά την αρχιτεκτονική εφαρμόσιμη σε εγκαταστάσεις με οποιοδήποτε συνδυασμό πρωτοκόλλων, συμπεριλαμβανομένων μελλοντικών πρωτοκόλλων που δεν έχουν ακόμα ληφθεί υπόψη κατά τον αρχικό σχεδιασμό.

5.4. Βαθμίδα II: Πυρήνας κανονικοποίησης και κανόνες μετασχηματισμού

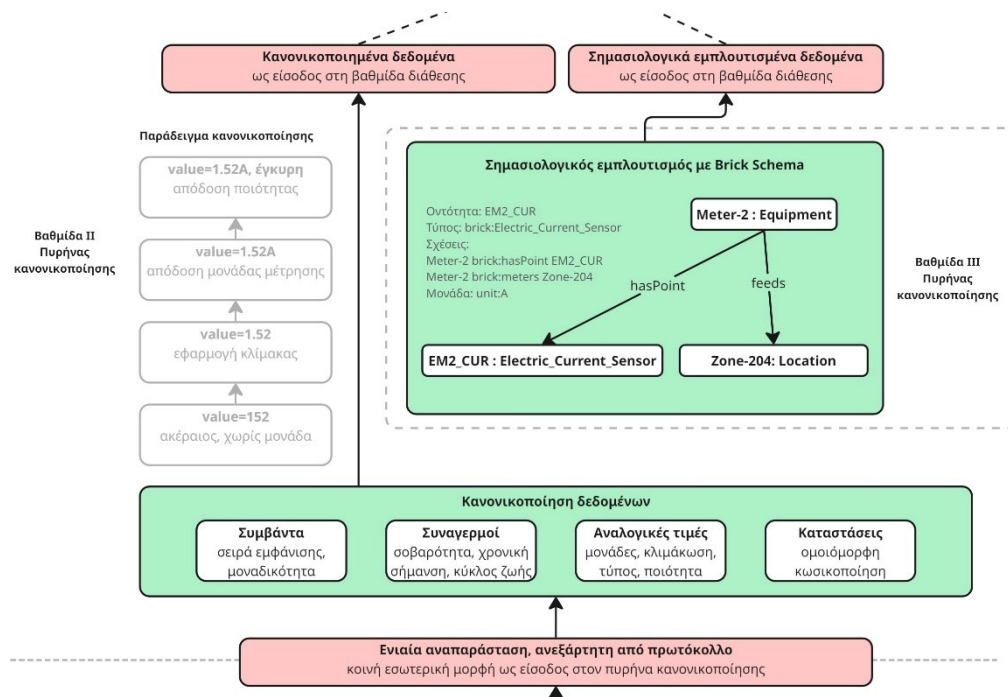
Ο πυρήνας κανονικοποίησης αποτελεί την κεντρική λειτουργική συνιστώσα του ενδιαμέσου επιπέδου και εφαρμόζει το σύνολο των κανόνων μετασχηματισμού που μετατρέπουν τα πρωτογενή δεδομένα των συστημάτων πεδίου, όπως αυτά παραδίδονται από τις συνιστώσες σύνδεσης, σε δομικά ομοιογενείς εγγραφές κοινής λογικής αναπαράστασης. Η λειτουργία αυτή εκτελείται ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο προέλευσης κάθε εγγραφής, καθώς η κοινή εσωτερική μορφή που παράγουν οι συνιστώσες σύνδεσης εξαλείφει την ανάγκη εξειδίκευσης των κανόνων κανονικοποίησης ανά πρωτό-

κόλλο. Ο πυρήνας εφαρμόζει τους ίδιους κανόνες σε κάθε εγγραφή που λαμβάνει, ανεξάρτητα από την πηγή της, γεγονός που διασφαλίζει τη συνέπεια της κανονικοποίησης σε επίπεδο συνόλου δεδομένων.

Οι κανόνες μετασχηματισμού οργανώνονται σε κατηγορίες που αντιστοιχούν στους τύπους δεδομένων που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1 και στη μεθοδολογία κανονικοποίησης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3.

- Για τις αναλογικές τιμές, οι κανόνες καλύπτουν τη μετατροπή μονάδων σε κοινό σύστημα αναφοράς, την εφαρμογή συντελεστών κλιμάκωσης, τον έλεγχο ορίων εγκυρότητας και την απόδοση του δείκτη ποιότητας.
- Για τις καταστάσεις, οι κανόνες ορίζουν την αντιστοίχιση των εσωτερικών κωδικοποιήσεων κάθε συστήματος στο κοινό λεξιλόγιο λειτουργικών συνθηκών.
- Για τους συναγερμούς, οι κανόνες διαχειρίζονται τον κύκλο ζωής κάθε εγγραφής και κανονικοποιούν την κατηγοριοποίηση σοβαρότητας.
- Για τα συμβάντα, οι κανόνες διασφαλίζουν την ομοιογένεια της χρονικής σήμανσης και της κατηγοριοποίησης τύπου ενέργειας (Hildén, et al., 2022).

Κάθε κανόνας μετασχηματισμού αποθηκεύεται ως εγγραφή παραμετροποίησης που συνδέει την ταυτότητα ενός σημείου μέτρησης με τους μετασχηματισμούς που εφαρμόζονται στα δεδομένα του, όπως συντελεστές κλιμάκωσης, μετατροπές μονάδων και όρια εγκυρότητας. Ο πυρήνας αναγιγνώσκει αυτές τις εγγραφές και τις εκτελεί χωρίς να ενσωματώνει τη λογική μετασχηματισμού στον κώδικά του, με αποτέλεσμα η προσθήκη νέου σημείου ή η τροποποίηση υπάρχοντος κανόνα να πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω ενημέρωσης της αντίστοιχης εγγραφής παραμετροποίησης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 16 (Blechmann, et al., 2023).



Εικόνα 16: Βαθμίδα II και Βαθμίδα III - πυρήνας κανονικοποίησης και σημασιολογικός εμπλουτισμός.

Η εκτέλεση των κανόνων μετασχηματισμού για κάθε εισερχόμενη εγγραφή ακολουθεί καθορισμένη σειρά, η οποία εξασφαλίζει ότι οι μετασχηματισμοί εφαρμόζονται με συνεπή τρόπο και ότι το αποτέλεσμα κάθε βήματος είναι διαθέσιμο ως είσοδος στο επόμενο. Η σειρά αυτή ξεκινά από τον τυπολογικό έλεγχο και τη μετατροπή τύπου δεδομένων, συνεχίζει με την εφαρμογή κλιμάκωσης και μετατροπής μονάδων, και ολοκληρώνεται με τον έλεγχο ορίων και την απόδοση δείκτη ποιότητας. Στην παρούσα αρχιτεκτονική, η αποτυχία σε οποιοδήποτε βήμα οδηγεί στην απόδοση δείκτη ποιότητας μη έγκυρης εγγραφής, χωρίς να διακόπτεται η επεξεργασία των υπόλοιπων εγγραφών και χωρίς να διαδίδεται ανεπίγνωστο σφάλμα προς τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου. Η έξοδος του πυρήνα κανονικοποίησης αποτελεί το κεντρικό αποθετήριο της κανονικοποιημένης πληροφορίας, στο οποίο κάθε σημείο μέτρησης αντιπροσωπεύεται από την τελευταία έγκυρη κανονικοποιημένη τιμή του, τον αντίστοιχο δείκτη ποιότητας και τη χρονική σήμανση της τελευταίας ενημέρωσης. Το αποθετήριο αυτό τροφοδοτεί παράλληλα το επίπεδο σημασιολογικού εμπλουτισμού και τη βαθμίδα διάθεσης δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι όλες οι εφαρμογές αντλούν πληροφορία από την ίδια κανονικοποιημένη πηγή και ότι η συνέπεια της αναπαράστασης διατηρείται σε όλα τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής.

5.5. Βαθμίδα III: Επίπεδο σημασιολογικού εμπλουτισμού

Το επίπεδο σημασιολογικού εμπλουτισμού αποτελεί την τρίτη βαθμίδα της αρχιτεκτονικής και λαμβάνει ως είσοδο το κανονικοποιημένο σύνολο δεδομένων που παράγει ο

πυρήνας κανονικοποίησης, εφαρμόζοντας τη διαδικασία χαρτογράφησης που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4. Η λειτουργία της βαθμίδας αυτής είναι εννοιολογικά διακριτή από εκείνη του πυρήνα κανονικοποίησης, καθώς δεν τροποποιεί τις τιμές ή τη δομή των δεδομένων, αλλά προσθέτει στο κάθε σημείο μέτρησης τη σημασιολογική του ταυτότητα εντός του μοντέλου του κτιρίου. Η σημασία αυτής της διάκρισης από αρχιτεκτονικής σκοπιάς είναι ότι επιτρέπει στις δύο βαθμίδες να εξελίσσονται ανεξάρτητα, και ιδίως επιτρέπει την αντικατάσταση ή επέκταση του σημασιολογικού σχήματος χωρίς να επηρεάζεται ο πυρήνας κανονικοποίησης.

Η εφαρμογή του σημασιολογικού εμπλουτισμού στηρίζεται στους κανόνες ετικετοποίησης και αντιστοίχισης που έχουν ορισθεί για το επιλεγμένο σχήμα, είτε αυτό είναι το Project Haystack είτε το Brick Schema είτε συνδυασμός των δύο. Οι κανόνες αυτοί αποθηκεύονται με τον ίδιο τρόπο που αποθηκεύονται οι κανόνες μετασχηματισμού του πυρήνα, δηλαδή ως εγγραφές παραμετροποίησης που αναγιγνώσκονται κατά την εκτέλεση, ώστε η τροποποίηση ή επέκτάσή τους να μην απαιτεί παρέμβαση στον κώδικα της βαθμίδας. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής τους είναι ένα σημασιολογικό μοντέλο που συνδέει κάθε σημείο μέτρησης με τον τύπο οντότητας, τον εξοπλισμό και τον χώρο στον οποίο αναφέρεται, παρέχοντας στις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου το πλαίσιο ερμηνείας που απαιτείται για την αυτόματη αξιοποίηση των δεδομένων (Balaji, et al., 2016).

Καθοριστική σχεδιαστική επιλογή του επιπέδου αυτού είναι ότι ο σημασιολογικός εμπλουτισμός δεν εγγράφεται μέσα στις κανονικοποιημένες τιμές, αλλά διατηρείται ως αυτόνομο μοντέλο. Σε επίπεδο αποθήκευσης, οι κανονικοποιημένες τιμές και το σημασιολογικό μοντέλο διατηρούνται ως δύο διακριτά σύνολα και δεν συγχωνεύονται σε ενιαία οντότητα. Οι τιμές, μαζί με τα χαρακτηριστικά κανονικοποίησης και τα μεταδεδομένα προέλευσής τους, αποθηκεύονται ως χρονικά δεδομένα, ενώ το σημασιολογικό μοντέλο διατηρείται χωριστά ως σύνολο οντοτήτων και σχέσεων. Τα δύο σύνολα συνδέονται μέσω του μοναδικού αναγνωριστικού κάθε σημείου μέτρησης, το οποίο λειτουργεί ως κοινό κλειδί αναφοράς.

Η σύζευξη των δύο συνόλων δεν πραγματοποιείται στον πυρήνα κανονικοποίησης ούτε αποτυπώνεται μόνιμα στα δεδομένα, αλλά εκτελείται στη βαθμίδα διάθεσης, κατά τον χρόνο εκτέλεσης κάθε ερωτήματος που απαιτεί ταυτόχρονα τιμές και σημασιολογικό πλαίσιο. Η επιλογή αυτή υλοποιεί στην πράξη την αποσύζευξη μεταξύ δομικής κανονικοποίησης και σημασιολογικού εμπλουτισμού, καθώς το σημασιολογικό μοντέλο μπορεί να αναθεωρηθεί, να επεκταθεί, να αντικατασταθεί ή να μεταβεί σε νεότερη έκδοση του σχήματος χωρίς καμία επέμβαση στη ροή ή στο ιστορικό των κανονικοποιη-

μένων τιμών, ενώ αντίστροφα η εξέλιξη των κανόνων κανονικοποίησης δεν επιβάλλει εκ νέου παραγωγή του σημασιολογικού μοντέλου. Οι δύο βαθμίδες παραμένουν επομένως ανεξάρτητα συντηρήσιμες σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της εγκατάστασης.

5.6. Διάθεση δεδομένων

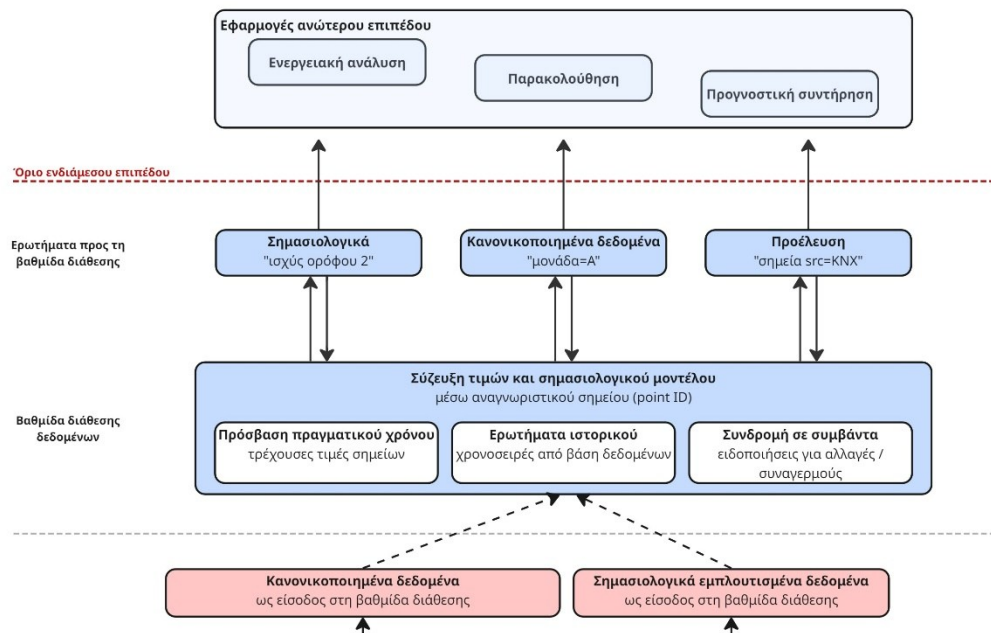
Με δεδομένη τη χωριστή διατήρηση κανονικοποιημένων τιμών και σημασιολογικού μοντέλου που περιγράφηκε στην ενότητα 5.5, η βαθμίδα διάθεσης αναλαμβάνει να συζεύξει τα δύο σύνολα κατά τον χρόνο εκτέλεσης και να καταστήσει την πληροφορία προσβάσιμη στις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου μέσω σαφώς ορισμένων διεπαφών.

Η διάθεση των κανονικοποιημένων και σημασιολογικά εμπλουτισμένων δεδομένων προς τις εφαρμογές υλοποιείται μέσω τριών συμπληρωματικών μηχανισμών.

Ο πρώτος είναι η δημοσίευση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μέσω της οποίας κάθε ενημέρωση ενός σημείου μέτρησης γίνεται άμεσα διαθέσιμη στις εφαρμογές που έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για αυτό.

Ο δεύτερος είναι η διεπαφή ερωτημάτων, μέσω της οποίας οι εφαρμογές μπορούν να αναζητούν δεδομένα βάσει κριτηρίων που αξιοποιούν τόσο τις κανονικοποιημένες τιμές όσο και τις σημασιολογικές ιδιότητες των σημείων μέτρησης, όπως για παράδειγμα η ανάκτηση όλων των αισθητήρων θερμοκρασίας που ανήκουν σε συγκεκριμένο όροφο ή εξυπηρετούν συγκεκριμένη μονάδα HVAC (Balaji, et al., 2016).

Ο τρίτος είναι η συνδρομή σε συμβάντα, μέσω της οποίας οι εφαρμογές ενημερώνονται αυτόματα όταν συμβαίνει μια συγκεκριμένη μεταβολή κατάστασης ή εκδηλώνεται ένας συναγερμός, χωρίς να απαιτείται περιοδική αναζήτηση εκ μέρους τους. Σε αντίθεση με τη δημοσίευση σε πραγματικό χρόνο, η οποία αφορά τη συνεχή ροή τιμών, η συνδρομή σε συμβάντα εστιάζει σε διακριτά γεγονότα που απαιτούν αντίδραση, επιτρέποντας στις εφαρμογές να παρακολουθούν επιλεκτικά μόνο τις μεταβολές που τις αφορούν, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Βαθμίδα διάθεσης δεδομένων.

Η διεπαφή ερωτημάτων αποκτά ιδιαίτερη αξία όταν συνδυάζεται με το σημασιολογικό μοντέλο, καθώς επιτρέπει στις εφαρμογές να εντοπίζουν και να αξιοποιούν δεδομένα βάσει της λειτουργικής τους ταυτότητας και όχι βάσει της τεχνικής τους ονομασίας στο σύστημα πεδίου. Μια εφαρμογή ενεργειακής ανάλυσης που αναζητά όλα τα σημεία μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου μπορεί να διατυπώσει το ερώτημά της βάσει του σημασιολογικού τύπου και να λάβει αποτέλεσμα που περιλαμβάνει σημεία από διαφορετικά πρωτόκολλα και υποσυστήματα, χωρίς να γνωρίζει τις τεχνικές λεπτομέρειες κάθε πηγής. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί την πρακτική έκφραση της σημασιολογικής διαλειτουργικότητας που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 και επιβεβαιώνει ότι η αξία του σημασιολογικού εμπλουτισμού εκδηλώνεται κυρίως στο επίπεδο της διάθεσης και κατανάλωσης των δεδομένων (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Η διεπαφή ερωτημάτων υποστηρίζει τρεις συμπληρωματικούς τρόπους αναζήτησης, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ανάγκες.

Ο πρώτος είναι το σημασιολογικό ερώτημα, στο οποίο η αναζήτηση διατυπώνεται βάσει του τύπου οντότητας και των σχέσεων του σημείου εντός του μοντέλου του κτιρίου, για παράδειγμα η ανάκτηση όλων των σημείων μέτρησης ισχύος ενός ορόφου.

Ο δεύτερος είναι το ερώτημα βάσει κανονικοποιημένων χαρακτηριστικών, στο οποίο η αναζήτηση στηρίζεται στις ιδιότητες που αποδίδει η κανονικοποίηση, όπως ο τύπος του δεδομένου, η μονάδα ή το φυσικό μέγεθος. Ο τρόπος αυτός αποδίδει αποτελέσματα ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο προέλευσης, επιτρέποντας, για παράδειγμα, την ανάκτηση όλων των μετρήσεων ρεύματος του κτιρίου ανεξαρτήτως υποσυστήματος.

Ο τρίτος είναι το ερώτημα βάσει προέλευσης, στο οποίο η αναζήτηση αξιοποιεί τα μεταδεδομένα προέλευσης κάθε σημείου, όπως το πρωτόκολλο και η αρχική του διεύθυνση.

Ενώ οι δύο πρώτοι τρόποι εκφράζουν τον κύριο σκοπό της αρχιτεκτονικής, δηλαδή την απαλλαγή των εφαρμογών από τη γνώση της τεχνολογικής προέλευσης των δεδομένων, ο τρίτος εξυπηρετεί ανάγκες που αφορούν την ίδια την εγκατάσταση και όχι τη σημασία των δεδομένων. Η διατήρηση των μεταδεδομένων προέλευσης επιτρέπει ερωτήματα συντήρησης και απογραφής, όπως η αποτύπωση του φόρτου ενός συγκεκριμένου διαύλου, η καταμέτρηση των σημείων ενός πρωτοκόλλου ή ο εντοπισμός όλων των δυαδικών σημείων μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η κανονικοποίηση καθιστά την προέλευση αδιάφορη για τη χρήση των δεδομένων από τις εφαρμογές. Η διατήρησή της ως χαρακτηριστικού εξασφαλίζει ότι παραμένει διαθέσιμη για ερωτήματα που αφορούν τη διαχείριση της υποδομής.

Ο έλεγχος πρόσβασης στη βαθμίδα διάθεσης διασφαλίζει ότι κάθε εφαρμογή λαμβάνει πρόσβαση μόνο στα δεδομένα που της αντιστοιχούν, σύμφωνα με τις πολιτικές εξουσιοδότησης που ορίζονται κατά τη διαμόρφωση του συστήματος. Η εφαρμογή του ελέγχου πρόσβασης στο επίπεδο της βαθμίδας διάθεσης, και όχι σε κάθε επιμέρους εφαρμογή ξεχωριστά, εξασφαλίζει ενιαία διαχείριση των πολιτικών πρόσβασης και μειώνει την πολυπλοκότητα που θα προέκυπτε από την ανεξάρτητη εφαρμογή τους σε κάθε εφαρμογή που συνδέεται με το ενδιάμεσο επίπεδο.

5.7. Αποθήκευση και ιστορικότητα δεδομένων

Η αποθήκευση των κανονικοποιημένων δεδομένων και η διατήρηση της ιστορικότητάς τους αποτελούν λειτουργίες που συνδέονται άμεσα με τη δυνατότητα αξιοποίησης των δεδομένων από εφαρμογές που απαιτούν πρόσβαση σε χρονοσειρές και όχι μόνο στην τρέχουσα κατάσταση του κτιρίου. Η ενεργειακή ανάλυση, η προγνωστική συντήρηση και η αξιολόγηση της απόδοσης υποσυστημάτων προϋποθέτουν πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα επαρκούς βάθους και ανάλυσης, και η ποιότητα των αναλύσεων αυτών εξαρτάται άμεσα από την πληρότητα και τη συνέπεια της αποθηκευμένης πληροφορίας.

Σύμφωνα με την προσέγγιση των (Blechmann, et al., 2023), η αποθήκευση εντός του ενδιάμεσου επιπέδου διασφαλίζει ότι τα ιστορικά δεδομένα φέρουν ήδη την κανονικοποιημένη δομή και δεν απαιτούν εκ των υστέρων μετασχηματισμό για να καταστούν συγκρίσιμα μεταξύ τους. Η οργάνωση της αποθήκευσης λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις των τύπων δεδομένων που διαχειρίζεται το ενδιάμεσο επίπεδο. Οι αναλογικές τιμές παράγουν πυκνές χρονοσειρές με τακτική συχνότητα δειγματοληψίας και εξυπηρετούνται αποδοτικά από εξειδικευμένες βάσεις δεδομένων χρονοσειρών, οι

οποίες βελτιστοποιούνται για εγγραφή και ανάκτηση διαδοχικών χρονικά εγγραφών με κοινό σχήμα. Οι καταστάσεις, οι συναγερμοί και τα συμβάντα παράγουν αραιότερες εγγραφές με ακανόνιστη χρονική κατανομή και απαιτούν αποθήκευση που διατηρεί την πλήρη δομή κάθε εγγραφής, συμπεριλαμβανομένων των πεδίων κύκλου ζωής και κατηγοριοποίησης που ορίστηκαν στο πλαίσιο της κανονικοποίησης. Η επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης που εξυπηρετεί αποδοτικά και τις δύο αυτές κατηγορίες αποτελεί σχεδιαστική απόφαση που εξαρτάται από την κλίμακα της εγκατάστασης και τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Η πολιτική διατήρησης ιστορικών δεδομένων καθορίζει τον χρονικό ορίζοντα για τον οποίο διατηρούνται τα δεδομένα κάθε τύπου, και η διαμόρφωσή της επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι απαιτήσεις των εφαρμογών ανάλυσης, οι διαθέσιμοι αποθηκευτικοί πόροι και τυχόν κανονιστικές υποχρεώσεις τήρησης αρχείων. Για εφαρμογές ενεργειακής ανάλυσης που εξετάζουν εποχιακές μεταβολές, απαιτείται ιστορικό τουλάχιστον ενός πλήρους έτους λειτουργίας, ενώ για εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης το απαιτούμενο βάθος εξαρτάται από τους κύκλους λειτουργίας του εξοπλισμού και από τους αλγορίθμους ανίχνευσης ανωμαλιών που χρησιμοποιούνται. Η αρχιτεκτονική υποστηρίζει διαφοροποιημένες πολιτικές διατήρησης ανά τύπο δεδομένων και ανά κατηγορία σημείου μέτρησης, ώστε να βελτιστοποιείται η χρήση αποθηκευτικών πόρων χωρίς να θυσιάζεται η διαθεσιμότητα της πληροφορίας που απαιτούν οι εφαρμογές.

Η ιστορικότητα των δεδομένων αποκτά πρόσθετη διάσταση όταν εξετάζεται σε συνδυασμό με το σημασιολογικό μοντέλο. Αλλαγές στο μοντέλο, όπως η μετονομασία ενός σημείου μέτρησης ή η αναθεώρηση της σημασιολογικής του ταυτότητας, ενδέχεται να επηρεάζουν την ερμηνεία ιστορικών εγγραφών που καταγράφηκαν υπό προηγούμενη αντιστοίχιση. Η αντιμετώπιση αυτής της διάστασης απαιτεί την τήρηση ιστορικού των μεταβολών του σημασιολογικού μοντέλου παράλληλα με τα ίδια τα δεδομένα, ώστε κάθε ιστορική εγγραφή να μπορεί να ερμηνευθεί στο πλαίσιο του μοντέλου που ίσχυε κατά τη στιγμή της καταγραφής της. Η απαίτηση αυτή, αν και συχνά παραβλέπεται στις αρχικές φάσεις σχεδιασμού, αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη μακροχρόνια αξιοπιστία της αρχιτεκτονικής σε εγκαταστάσεις που εξελίσσονται διαχρονικά.

5.8. Ασφάλεια και λειτουργική παρακολούθηση

Η ασφάλεια και η λειτουργική παρακολούθηση του ενδιαμέσου επιπέδου αποτελούν δύο διακριτές αλλά αλληλοσυμπληρούμενες λειτουργίες που διασφαλίζουν την αδιάλειπτη και αξιόπιστη λειτουργία της αρχιτεκτονικής κατά τον κύκλο ζωής της εγκατάστασης. Η ασφάλεια αφορά την προστασία της ροής πληροφορίας και τον έλεγχο πρόσβασης, ενώ η λειτουργική παρακολούθηση αφορά την ικανότητα του συστήματος να

εντοπίζει και να αναφέρει αποκλίσεις από την αναμενόμενη συμπεριφορά. Η ασφάλεια και η λειτουργική παρακολούθηση αναλύονται εδώ ως αρχιτεκτονικές λειτουργίες του συνολικού σχεδιασμού, διακριτές από την αξιοπιστία και την ποιότητα των κανονικοποιημένων δεδομένων που αποτελούν αντικείμενο της ενότητας 3.6.

Η ασφάλεια του ενδιαμέσου επιπέδου οργανώνεται γύρω από τρεις άξονες.

Ο πρώτος αφορά την προστασία της επικοινωνίας με τα συστήματα πεδίου, όπου η κρυπτογράφηση της μετάδοσης και ο έλεγχος ταυτότητας των συνδεδεμένων συσκευών μειώνουν τον κίνδυνο παρεμβολής ή πλαστογράφησης δεδομένων στο κατώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής.

Ο δεύτερος αφορά τον έλεγχο πρόσβασης στα κανονικοποιημένα δεδομένα, ο οποίος υλοποιείται στη βαθμίδα διάθεσης όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, και διασφαλίζει ότι κάθε εφαρμογή έχει πρόσβαση αποκλειστικά στα δεδομένα που της αντιστοιχούν.

Ο τρίτος αφορά την προστασία της ίδιας της διαμόρφωσης του ενδιαμέσου επιπέδου, δηλαδή των κανόνων κανονικοποίησης, των εγγραφών παραμετροποίησης και του σημασιολογικού μοντέλου, των οποίων η μη εξουσιοδοτημένη τροποποίηση θα επηρέαζε σιωπηλά την ποιότητα της πληροφορίας που διατίθεται προς τις εφαρμογές χωρίς εμφανή ένδειξη αποτυχίας.

Η λειτουργική παρακολούθηση καλύπτει την ικανότητα του ενδιαμέσου επιπέδου να παρακολουθεί τη δική του κατάσταση και να αναφέρει αποκλίσεις που ενδέχεται να επηρεάζουν την ποιότητα των δεδομένων. Οι παράμετροι που παρακολουθούνται περιλαμβάνουν την κατάσταση των συνδέσεων με τα συστήματα πεδίου, τους ρυθμούς συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, τον αριθμό των εγγραφών που λαμβάνουν δείκτη ποιότητας μη έγκυρης τιμής και τον χρόνο απόκρισης των επιμέρους βαθμίδων. Η συνεχής καταγραφή αυτών των παραμέτρων επιτρέπει τον εντοπισμό προβλημάτων πριν αυτά επηρεάσουν τις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, και παρέχει το ιστορικό που απαιτείται για τη διάγνωση αιτίων δυσλειτουργίας (Alfalouji, et al., 2022).

Η λειτουργική παρακολούθηση επεκτείνεται και στην ποιότητα της κανονικοποίησης, παρακολουθώντας δείκτες όπως το ποσοστό σημείων μέτρησης που λαμβάνουν έγκυρες κανονικοποιημένες τιμές σε δεδομένο χρονικό παράθυρο, η κατανομή των δεικτών ποιότητας ανά πηγή δεδομένων και η συχνότητα εμφάνισης τιμών εκτός αναμενόμενου εύρους. Αποκλίσεις σε αυτούς τους δείκτες μπορεί να υποδηλώνουν προβλήματα στα ίδια τα συστήματα πεδίου, στις συνιστώσες σύνδεσης ή στους κανόνες κανονικοποίησης, και η έγκαιρη ανίχνευσή τους επιτρέπει την αντιμετώπισή τους πριν αυτά επηρε-

άσουν την αξιοπιστία των αναλύσεων που στηρίζονται στα δεδομένα (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

Η συνολική αντιμετώπιση της ασφάλειας και της λειτουργικής παρακολούθησης ως αναπόσπαστων συνιστωσών της αρχιτεκτονικής, και όχι ως εξωτερικών προσθηκών, διασφαλίζει ότι το ενδιαμέσο επίπεδο λειτουργεί ως αξιόπιστη και προστατευμένη υποδομή πληροφορίας για το σύνολο των εφαρμογών που εξαρτώνται από αυτό. Η ολοκλήρωση της περιγραφής της αρχιτεκτονικής με τις συνιστώσες αυτές καθιστά το ενδιαμέσο επίπεδο έτοιμο για αξιολόγηση μέσω της μελέτης περίπτωσης που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6. Μελέτη περίπτωσης - Αποτελέσματα

6.1. Περιγραφή εγκατάστασης και διαθέσιμων τεχνικών στοιχείων

Η μελέτη περίπτωσης που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο βασίζεται σε πραγματικό κτίριο, το έργο Project NEO στην οδό Schönhäuser Allee 9 στο Βερολίνο. Το κτίριο, το έργο και ορισμένα από τα τεχνικά συστήματα που αναφέρονται είναι πραγματικά. Ωστόσο, η παρούσα ανάλυση δεν αποτελεί τεκμηρίωση της πραγματικής εγκατάστασης, τα δεδομένα που παρουσιάζονται είναι υποθετικά, η δομή των ζωνών μίσθωσης και η κατανομή των συστημάτων αποτελούν σενάριο που διαμορφώθηκε για τους σκοπούς της εργασίας, και κανένα από τα παρουσιαζόμενα στοιχεία δεν προέρχεται από τα πραγματικά συστήματα του κτιρίου.

Το NEO είναι κτίριο γραφείων υψηλών προδιαγραφών, αποτελούμενο από έξι ανώτερους ορόφους, ισόγειο και υπόγειο, συνολικής μικτής επιφάνειας περίπου 19.400 τμ. Το κτίριο έχει σχεδιαστεί με στόχο την πιστοποίηση WELL Core v2 και LEED BD+C Gold⁴, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις παρακολούθησης ποιότητας περιβάλλοντος εσωτερικού χώρου, ενεργειακής απόδοσης και λειτουργικής διαφάνειας. Οι απαιτήσεις αυτές καθιστούν το κτίριο ιδιαίτερα κατάλληλο ως σενάριο μελέτης περίπτωσης, καθώς δικαιολογούν πλήρως την ανάγκη για ενοποιημένη συλλογή, κανονικοποίηση και σημασιολογικό εμπλουτισμό δεδομένων από ετερογενή υποσυστήματα. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, το κτίριο οργανώνεται σε τέσσερις ζώνες μίσθωσης, MB01, MB02, MB03 και MB04, οι οποίες επαναλαμβάνονται με συνεπή

⁴ Το WELL Core v2 και το LEED BD+C Gold (Leadership in Energy and Environmental Design – Building Design and Construction) είναι διεθνή συστήματα πιστοποίησης κτιρίων που αξιολογούν αντίστοιχα την ευημερία των χρηστών και την περιβαλλοντική απόδοση. Η βαθμίδα Gold υποδηλώνει υψηλό επίπεδο συμμόρφωσης.

τρόπο σε κάθε όροφο και αποτελούν τη λογική μονάδα κατανομής των τεχνικών συστημάτων και των σημείων μέτρησης. Σε κάθε όροφο από το ισόγειο έως τον τέταρτο, κάθε ζώνη μίσθωσης εξυπηρετείται από ξεχωριστή εταιρεία.

Οι όροφοι 5 και 6, καθώς και ο χώρος εκδηλώσεων του υπογείου, μισθώνονται από έναν ενιαίο μισθωτή που καταλαμβάνει όλες τις ζώνες μίσθωσης στους ορόφους αυτούς. Η φυσική δομή των τεσσάρων ζωνών παραμένει κοινή σε όλους τους ορόφους και διαφοροποιείται μόνο ο μισθωτής που τις καταλαμβάνει.

Ο κεντρικός τεχνικός χώρος του υπογείου φιλοξενεί τις κεντρικές τεχνικές εγκαταστάσεις του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων αερισμού και κλιματισμού, των ηλεκτρολογικών υποδομών, των συστημάτων ασφαλείας, και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας.

Τα τεχνικά συστήματα της εγκατάστασης οργανώνονται ως εξής:

- Το σύστημα φωτισμού και ανίχνευσης παρουσίας υλοποιείται μέσω KNX, με ενεργοποιητές φωτισμού και αισθητήρες παρουσίας ανά χώρο.
- Το σύστημα σκίασης, που περιλαμβάνει ρολά και στόρια, υλοποιείται επίσης μέσω KNX, με ενεργοποιητές ανά ομάδα παραθύρων και αισθητήρες εξωτερικής φωτεινότητας ανά πρόσοψη.
- Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες των προσόψεων ελέγχονται μέσω αναλογικού σήματος ανά ομάδα παραθύρων και ρυθμίζουν δυναμικά τον βαθμό χρωματισμού του υαλοπίνακα, περιορίζοντας τη θάμβωση και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού. Το επίπεδο χρωματισμού κάθε ζώνης υαλοπινάκων αποτυπώνεται ως αναλογική τιμή και ενσωματώνεται στο ενδιάμεσο επίπεδο μέσω αναλογικών εισόδων και εξόδων.
- Οι επαφές παραθύρων συνδέονται μέσω KNX και παρέχουν δυαδική ένδειξη ανοιχτού ή κλειστού ανά άνοιγμα.
- Το σύστημα HVAC εξυπηρετείται από τοπικούς ελεγκτές άμεσου ψηφιακού ελέγχου DDC (Direct Digital Control) που επικοινωνούν μέσω BACnet, με τέσσερις DDC ανά όροφο, έναν ανά ζώνη μίσθωσης, και δύο στο υπόγειο, έναν στον χώρο εκδηλώσεων και έναν στον κεντρικό τεχνικό χώρο. Κάθε DDC παρέχει μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής και επιστροφής, κατάσταση λειτουργίας και θέσεις βαλβίδων.
- Οι εξοδικές βαλβίδες των πάνελ οροφής συνδέονται μέσω MP-Bus και εκτίθενται ως Modbus RTU μέσω gateway. Κάθε βαλβίδα φέρει ενσωματωμένο αισθητήρα δρόσου, του οποίου η ένδειξη διατίθεται μέσω της ίδιας διαδρομής και δεν αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή συσκευή πεδίου.

- Τα χειριστήρια χώρου επικοινωνούν μέσω BACnet και αποτελούν το ενιαίο σημείο ελέγχου κάθε χώρου για θερμοκρασία, φωτισμό και σκίαση. Παρέχουν επίσης ένδειξη ιστορικών δεδομένων χρήσης ανά σύστημα και πρόσβαση σε προχωρημένες ρυθμίσεις, η οποία προστατεύεται με έλεγχο εξουσιοδότησης και προορίζεται για το τεχνικό προσωπικό.
- Οι υποδαπέδιες μονάδες ανεμιστήρα στοιχείου, αισθητήρες CO₂, θερμοκρασίας και υγρασίας χώρου, καθώς και οι μετρητές κατανάλωσης ενέργειας ανά περιοχή και ο κεντρικός μετρητής του κτιρίου συνδέονται μέσω Modbus RTU.
- Οι πολυαισθητήρες χώρου συνδέονται μέσω Modbus RTU και ενσωματώνουν σε ενιαία συσκευή πολλαπλές μετρήσεις περιβάλλοντος, όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία και συγκέντρωση CO₂. Κάθε συσκευή εκθέτει τις επιμέρους μετρήσεις ως ξεχωριστά σημεία μέτρησης, παρέχοντας συγκεντρωτική εικόνα της ποιότητας του εσωτερικού χώρου ανά ζώνη.
- Οι αισθητήρες WELL συνδέονται μέσω Modbus RTU και καλύπτουν τις απαιτήσεις παρακολούθησης που θέτει η πιστοποίηση WELL Core v2, μετρώντας παραμέτρους ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος όπως αιωρούμενα σωματίδια, πτητικές οργανικές ενώσεις και επίπεδα φωτισμού. Λόγω του εξειδικευμένου ρόλου τους, εγκαθίστανται σε περιορισμένο αριθμό αντιπροσωπευτικών σημείων ανά ζώνη.
- Οι ρυθμιστές παροχής αέρα VAV συνδέονται μέσω MP-Bus και εκτίθενται ως Modbus RTU μέσω gateway.
- Η ανώτερη βαθμίδα συλλογής και διάθεσης κανονικοποιημένων δεδομένων υλοποιείται μέσω MQTT.

Η ετερογένεια πρωτοκόλλων που χαρακτηρίζει την εγκατάσταση, με παράλληλη χρήση KNX, BACnet, Modbus RTU και MP-Bus στο επίπεδο πεδίου και MQTT στο επίπεδο διάθεσης, αντιπροσωπεύει με ρεαλιστικό τρόπο τη συνθήκη ετερογένειας που τεκμηριώθηκε στην Εισαγωγή και στο Κεφάλαιο 2, και καθιστά την εγκατάσταση κατάλληλο πλαίσιο για την εφαρμογή και αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής.

6.2. Χαρτογράφηση σημείων και ροών πληροφορίας

Η χαρτογράφηση των σημείων μέτρησης αποτελεί το πρώτο βήμα εφαρμογής της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στην εγκατάσταση και προηγείται της κανονικοποίησης και του σημασιολογικού εμπλουτισμού. Σκοπός της είναι η πλήρης καταγραφή όλων των συσκευών και των σημείων μέτρησης που παράγουν δεδομένα, με τα μεταδεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή των κανόνων μετασχηματισμού και την εκτέλεση της χαρτογράφησης σε σημασιολογικές οντότητες. Η διαδικασία καλύπτει τόσο την

τεχνική απαρίθμηση των συσκευών όσο και την τεκμηρίωση της λογικής τους θέσης εντός της αρχιτεκτονικής της εγκατάστασης, δηλαδή του υποσυστήματος στο οποίο ανήκουν, της ζώνης μίσθωσης που εξυπηρετούν και του πρωτοκόλλου μέσω του οποίου επικοινωνούν.

Για το έργο NEO, η χαρτογράφηση οργανώνεται ανά πρωτόκολλο και ανά ζώνη μίσθωσης. Ο παρακάτω πίνακας αποτυπώνει τον αριθμό συσκευών ανά τύπο και ζώνη μίσθωσης για έναν τυπικό όροφο, με την παραδοχή ότι οι όροφοι 1 έως 6 ακολουθούν την ίδια δομή τεσσάρων ζωνών, ανεξάρτητα από την κατανομή των μισθωτών.

Πίνακας 2: Αριθμός συσκευών ανά τύπο, πρωτόκολλο και ζώνη μίσθωσης για τυπικό όροφο της εγκατάστασης NEO.

Συσκευή	Πρωτό- κόλλο	MB01	MB02	MB03	MB04	Σύ- νολο
Φωτιστικά	KNX	120	100	40	50	310
Αισθητήρες παρουσίας	KNX	70	50	24	17	161
Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπί- νακες	Analog	60	40	25	64	189
Επαφές παραθύρων	KNX	30	25	15	13	83
Περσίδες	KNX	23	16	18	19	76
Αισθητήρες CO ₂	Modbus RTU	34	24	20	10	88
Πολυαισθητήρες χώρου	Modbus RTU	10	8	2	3	23
Αισθητήρες WELL	Modbus RTU	2	2	1	1	6
Ρυθμιστές παροχής αέρα	MP-Bus	9	11	4	4	28
Κύριοι ρυθμιστές παροχής αέρα	MP-Bus	4	4	2	2	12
Υποδαπέδιες μονάδες ανε- μιστήρα-στοιχείου	Modbus RTU	2	4	0	3	9
Χειριστήρια χώρου	BACnet	4	4	1	2	11
Εξαοδικές βαλβίδες πάνελ οροφής	MP-Bus	43	38	11	11	103
Ενεργειακοί μετρητές	Modbus RTU	1	1	1	1	4
Ελεγκτές DDC	BACnet	1	1	1	1	4

Ο συνολικός αριθμός συσκευών ανά τυπικό όροφο ανέρχεται σε 1.107, με τη μεγαλύτερη πυκνότητα να εντοπίζεται στις ζώνες MB01 και MB02 λόγω του μεγαλύτερου αριθμού χώρων και ανοιγμάτων. Κάθε συσκευή παράγει κατά κανόνα πολλαπλά σημεία μέτρησης, ο ακριβής αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον κατασκευαστή και την παραμετροποίηση της εγκατάστασης. Ενδεικτικά, ένας αισθητήρας CO₂ τυπικά εκθέτει συγκέντρωση CO₂, θερμοκρασία και κατάσταση λειτουργίας ως ξεχωριστά σημεία μέτρησης, ενώ ένας ρυθμιστής παροχής αέρα εκθέτει θέση βαλβίδας, πραγματική παροχή, τιμή αναφοράς και διαγνωστικές μεταβλητές. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, ο εκτιμώμενος συνολικός αριθμός σημείων μέτρησης ανά τυπικό όροφο κυμαίνεται μεταξύ 3.000 και 4.500, ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας της παραμετροποίησης κάθε συσκευής.

Σημειώνεται ότι η ποσοτική ανάλυση κάλυψης της ενότητας 6.5.2 αποτιμάται σε επίπεδο συσκευής, ώστε ο βαθμός αυτοματοποίησης να αναφέρεται στη μονάδα στην οποία πράγματι καθορίζεται ο μηχανισμός χαρτογράφησης. Η κατανομή των 1.107 συσκευών του Πίνακα 2 (Πίνακας 2) συγκεντρώνεται για τον σκοπό αυτό σε πέντε κατηγορίες ανά μηχανισμό πρόσβασης. Τα χειριστήρια χώρου και οι ελεγκτές DDC, που επικοινωνούν μέσω BACnet, συγκροτούν δεκαπέντε συσκευές. Τα φωτιστικά, οι αισθητήρες παρουσίας, οι επαφές παραθύρων και οι περσίδες, που επικοινωνούν μέσω KNX, συγκροτούν εξακόσιες τριάντα συσκευές. Οι αισθητήρες CO₂, οι πολυαισθητήρες χώρου, οι αισθητήρες WELL, οι υποδαπέδιες μονάδες ανεμιστήρα στοιχείου και οι ενεργειακοί μετρητές, που επικοινωνούν μέσω Modbus RTU, συγκροτούν εκατόν τριάντα συσκευές. Οι ρυθμιστές παροχής αέρα, οι κύριοι ρυθμιστές παροχής αέρα και οι εξαοδικές βαλβίδες πάνελ οροφής, που προσπελούνται μέσω MP-Bus, συγκροτούν εκατόν σαράντα τρεις συσκευές. Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες, που ελέγχονται μέσω αναλογικού σήματος, συγκροτούν εκατόν ογδόντα εννέα συσκευές εκτός των πέντε υποστηριζόμενων πρωτοκόλλων.

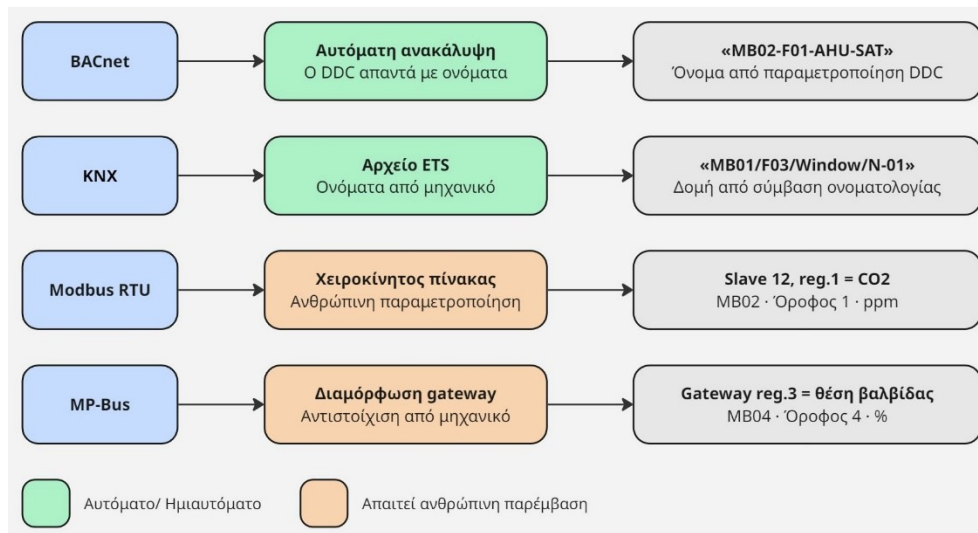
- Τα σημεία KNX καταγράφονται βάσει του αρχείου διαμόρφωσης που εξάγεται από το ETS, το οποίο παρέχει για κάθε ομάδα διευθύνσεων το όνομα, τον τύπο δεδομένων και τη ζώνη μίσθωσης στην οποία ανήκει.
- Τα σημεία BACnet καταγράφονται μέσω της διαδικασίας ανακάλυψης αντικειμένων που παρέχει το πρωτόκολλο, με αφετηρία τους DDC ελεγκτές κάθε ζώνης μίσθωσης, και επαληθεύονται με βάση τα αρχεία παραμετροποίησης των DDC.

- Τα σημεία Modbus RTU απαιτούν ρητή παραμετροποίηση βάσει των τεχνικών εγχειριδίων κάθε συσκευής, με καταγραφή της διεύθυνσης του slave, των καταχωρητών που χρησιμοποιούνται, του τύπου δεδομένων και του συντελεστή κλιμάκωσης.
- Τα σημεία MP-Bus καταγράφονται μέσω της διαμόρφωσης του gateway, το οποίο εκθέτει τα δεδομένα των ρυθμιστών παροχής αέρα σε Modbus RTU, και η χαρτογράφησή τους απαιτεί την αντιστοίχιση των καταχωρητών του gateway με τις φυσικές μεταβλητές κάθε συσκευής.

Η συνολική ροή πληροφορίας που προκύπτει από τη χαρτογράφηση αποτυπώνει με σαφήνεια την ετερογένεια της εγκατάστασης.

- Τα σημεία KNX παράγουν κυρίως δυαδικές καταστάσεις και διακριτές τιμές με σχετικά χαμηλή συχνότητα μεταβολής και αποτελούν την κατηγορία με τον μεγαλύτερο αριθμό συσκευών στην εγκατάσταση.
- Τα σημεία BACnet παράγουν συνδυασμό αναλογικών τιμών και καταστάσεων με μέτρια συχνότητα ενημέρωσης και χαρακτηρίζονται από την υψηλότερη δομική πληρότητα μεταδεδομένων λόγω του αντικειμενοστραφούς μοντέλου του πρωτοκόλλου.
- Τα σημεία Modbus RTU αποτελούν την κατηγορία με τη μεγαλύτερη ποικιλία τύπων συσκευών και απαιτούν την εκτενέστερη παραμετροποίηση, καθώς το πρωτόκολλο δεν ενσωματώνει πληροφορία για τη σημασία των δεδομένων που μεταδίδει.
- Τα σημεία MP-Bus, που προσπελούνται μέσω gateway, παράγουν τόσο αναλογικές τιμές λειτουργίας όσο και διαγνωστικές πληροφορίες που αποκτούν ιδιαίτερη αξία για εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης.

Η διαφοροποίηση αυτή στα χαρακτηριστικά των σημείων ανά πρωτόκολλο επιβεβαιώνει την ανάγκη για διαφοροποιημένες στρατηγικές συλλογής που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5 και τεκμηριώνει τη σχεδιαστική λογική της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 18.

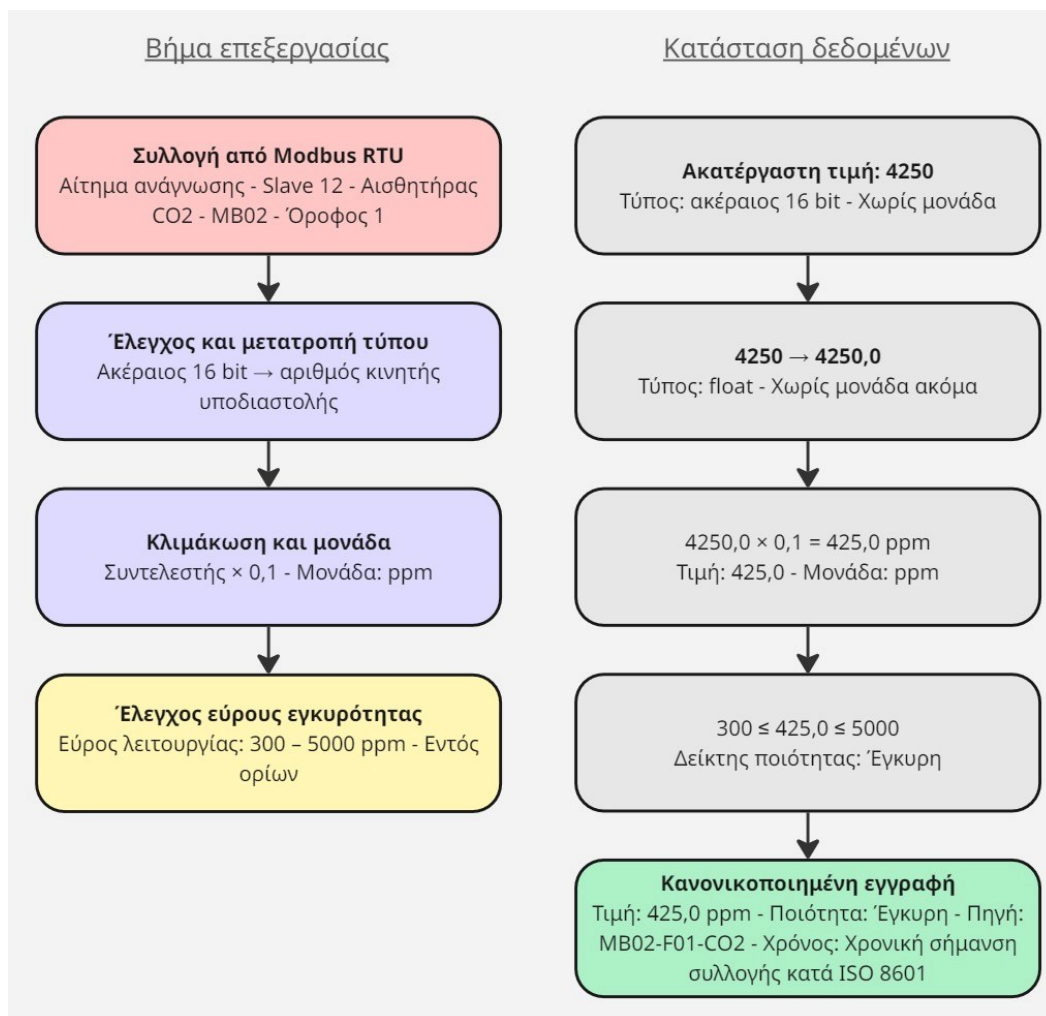


Εικόνα 18: Μηχανισμός αναγνώρισης ταυτότητας συσκευής ανά πρωτόκολλο: αυτόματη ανακάλυψη έναντι ανθρώπινης παραμετροποίησης.

6.3. Εφαρμογή κανονικοποίησης σε επιλεγμένα δεδομένα

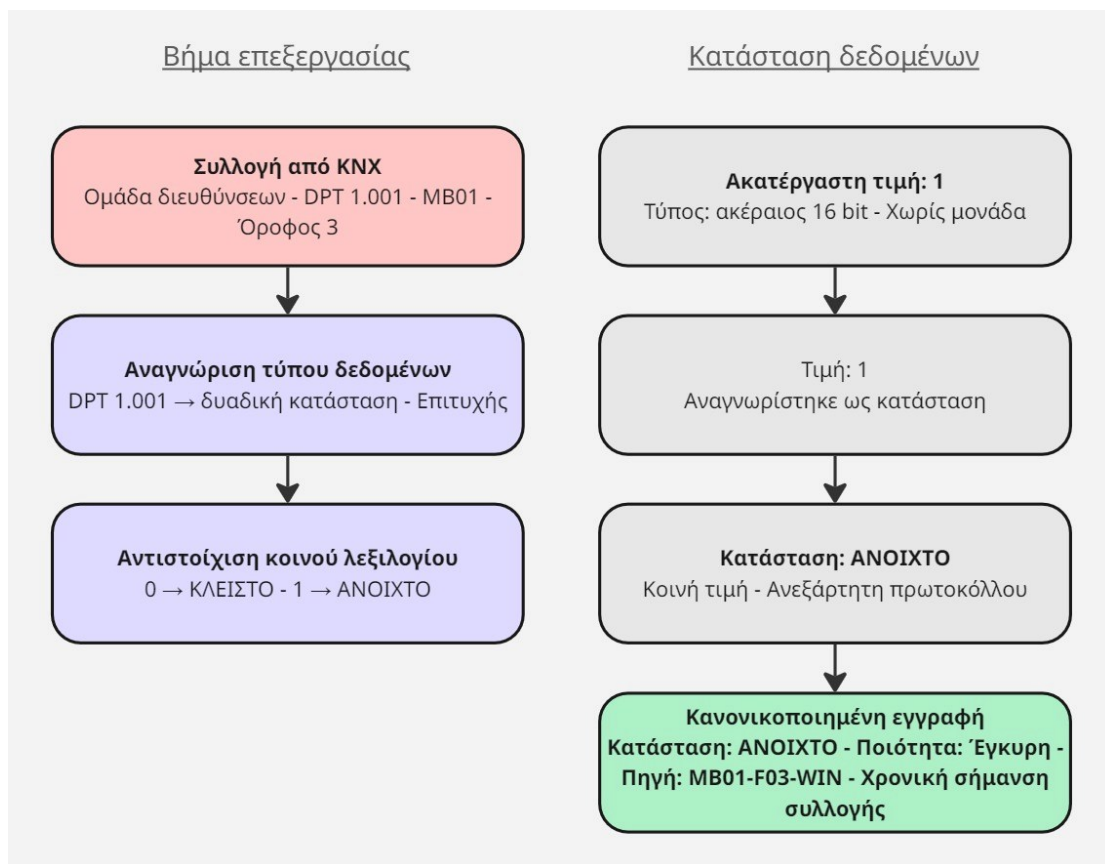
Η εφαρμογή της διαδικασίας κανονικοποίησης στην εγκατάσταση NEO εξετάζεται μέσω επιλεγμένων παραδειγμάτων που αντιπροσωπεύουν τους τέσσερις τύπους δεδομένων που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1 και καλύπτουν το σύνολο των πρωτοκόλλων που απαντώνται στην εγκατάσταση. Η επιλογή των παραδειγμάτων αποσκοπεί στην ανάδειξη των χαρακτηριστικών προκλήσεων κανονικοποίησης που θέτει κάθε πρωτόκολλο και κάθε τύπος δεδομένων, και στην επιβεβαίωση ότι οι κανόνες μετασχηματισμού που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5 είναι εφαρμόσιμοι στις συνθήκες της συγκεκριμένης εγκατάστασης.

Το πρώτο παράδειγμα αφορά την κανονικοποίηση αναλογικής τιμής από αισθητήρα CO₂ της ζώνης MB02 του πρώτου ορόφου, ο οποίος συνδέεται μέσω Modbus RTU. Ο αισθητήρας μεταδίδει την τιμή συγκέντρωσης CO₂ ως ακέραιο αριθμό χωρίς δεκαδικά ψηφία, με συντελεστή κλιμάκωσης 0,1 και μονάδα μέτρησης ppm (parts per million) σύμφωνα με το τεχνικό εγχειρίδιο της συσκευής. Μια τυπική ακατέργαστη τιμή 4250 μετατρέπεται στην κανονικοποιημένη τιμή 425,0 ppm μέσω εφαρμογής του συντελεστή κλιμάκωσης και απόδοσης μονάδας μέτρησης. Ο πυρήνας κανονικοποίησης ελέγχει επιπλέον ότι η τιμή εμπίπτει εντός του αναμενόμενου εύρους λειτουργίας, που ορίζεται μεταξύ 300 και 5000 ppm για εσωτερικό χώρο, και αποδίδει δείκτη ποιότητας «έγκυρη» εφόσον ο έλεγχος επιτύχει. Η κανονικοποιημένη εγγραφή περιλαμβάνει την τιμή, τη μονάδα, τον δείκτη ποιότητας, τη χρονική σήμανση συλλογής και την ταυτότητα της πηγής, συνθέτοντας μια πλήρη και αυτοπεριγραφόμενη εγγραφή ανεξάρτητη από το Modbus RTU ως πρωτόκολλο προέλευσης.



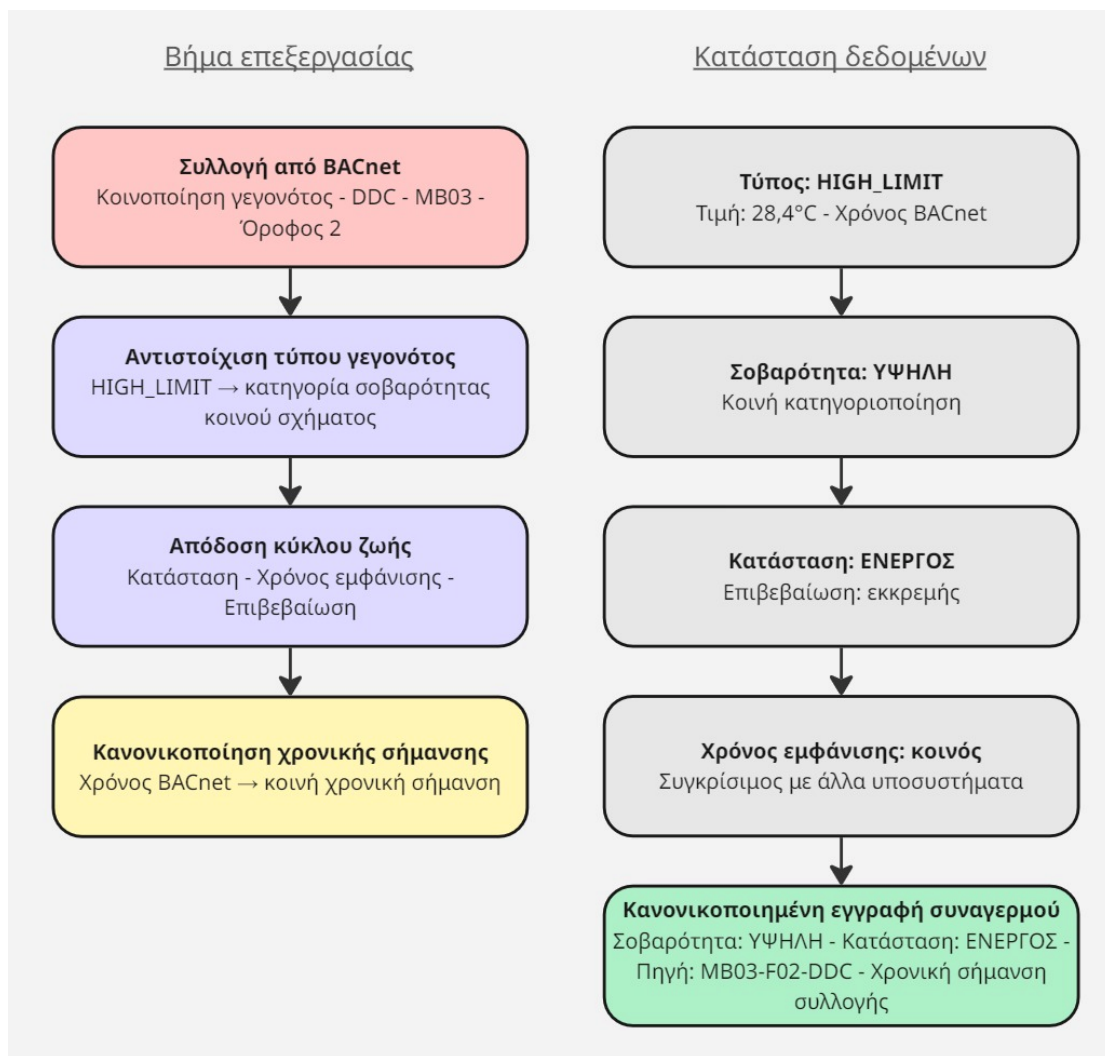
Εικόνα 19: Διαδικασία κανονικοποίησης αναλογικής τιμής: αισθητήρας CO₂, ζώνη MB02, όροφος 1, πρωτόκολλο Modbus RTU.

Το δεύτερο παράδειγμα αφορά την κανονικοποίηση κατάστασης από επαφή παραθύρου της ζώνης MB01 του τρίτου ορόφου, η οποία συνδέεται μέσω KNX. Η ομάδα διευθύνσεων που αντιστοιχεί στην επαφή μεταδίδει δυαδική τιμή ενός bit, όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί σε κλειστό παράθυρο και η τιμή 1 σε ανοιχτό, σύμφωνα με τον τύπο δεδομένων DPT (KNX Data Point Type) 1.001 που ορίζει το πρότυπο KNX. Ο κανόνας αντιστοίχισης μετατρέπει αυτές τις δυαδικές τιμές στο κοινό λεξιλόγιο καταστάσεων που ορίζει το ενδιαμέσο επίπεδο, αποδίδοντας τις τιμές «ΚΛΕΙΣΤΟ» και «ΑΝΟΙΧΤΟ» αντίστοιχα. Η κανονικοποιημένη εγγραφή περιλαμβάνει την κατάσταση, τη χρονική σήμανση της μεταβολής, τον δείκτη ποιότητας και την ταυτότητα της πηγής, παρέχοντας στις εφαρμογές ανώτερου επιπέδου μια ομοιογενή αναπαράσταση που είναι άμεσα συγκρίσιμη με καταστάσεις παραθύρων από οποιοδήποτε άλλο πρωτόκολλο.



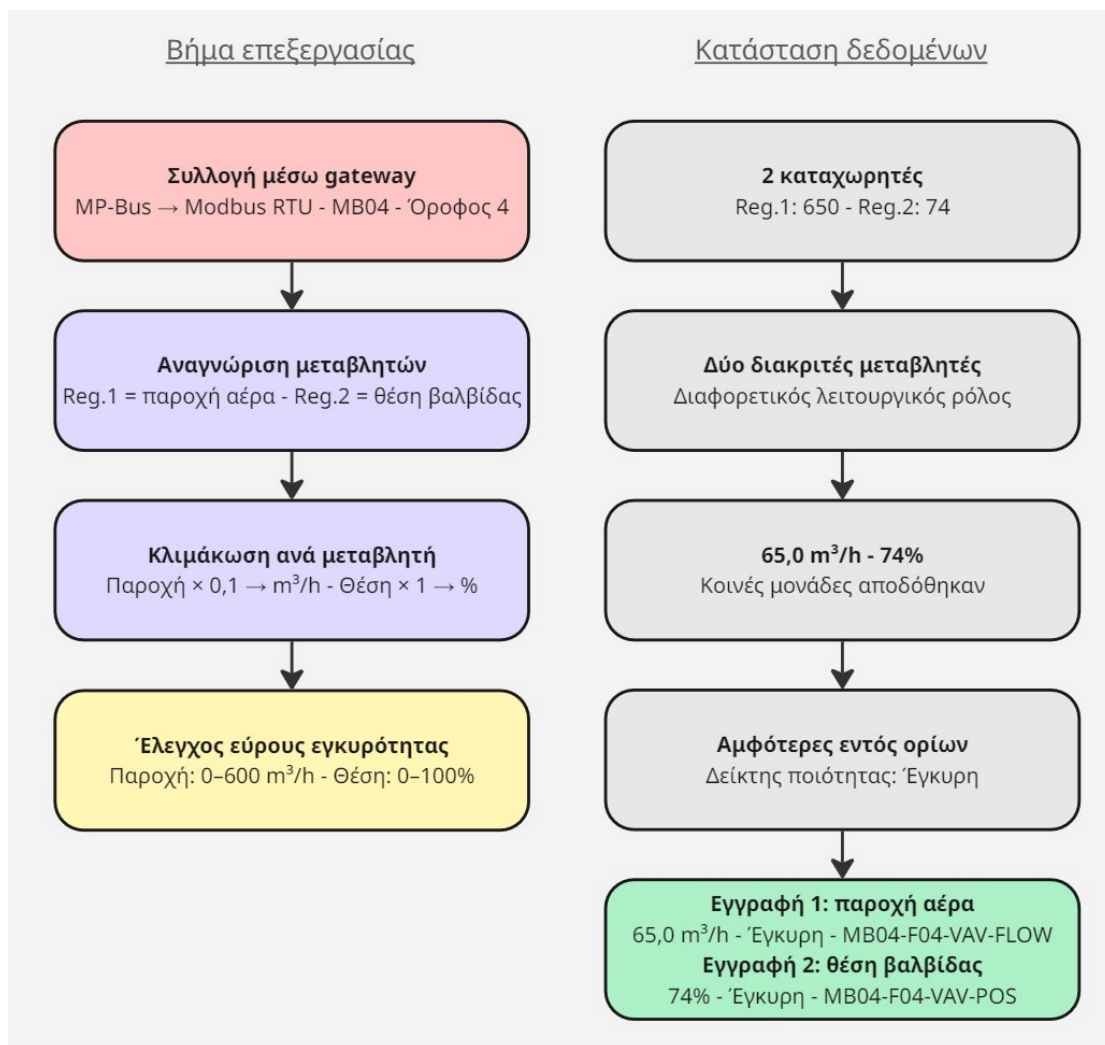
Εικόνα 20: Διαδικασία κανονικοποίησης κατάστασης: επαφή παραθύρου, ζώνη MB01, όροφος 3, πρωτόκολλο KNX.

Το τρίτο παράδειγμα αφορά την κανονικοποίηση συναγερμού από DDC ελεγκτή της ζώνης MB03 του δευτέρου ορόφου, ο οποίος επικοινωνεί μέσω BACnet. Ο ελεγκτής εκδίδει συναγερμό υψηλής θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής όταν η μετρούμενη τιμή υπερβεί το ανώτατο όριο λειτουργίας. Το BACnet μεταδίδει τον συναγερμό μέσω του μηχανισμού κοινοποίησης γεγονότων, συμπεριλαμβάνοντας τον τύπο του γεγονότος, την τιμή που ενεργοποίησε τον συναγερμό και τη χρονική σήμανση. Ο κανόνας κανονικοποίησης αντιστοιχίζει τον τύπο γεγονότος BACnet στην κατηγορία σοβαρότητας του κοινού σχήματος συναγερμών, αποδίδει κατάσταση κύκλου ζωής «ΕΝΕΡΓΟΣ» και συμπληρώνει τα πεδία χρονικής σήμανσης εμφάνισης και επιβεβαίωσης σύμφωνα με το κοινό σχήμα. Η κανονικοποιημένη εγγραφή συναγερμού είναι άμεσα συγκρίσιμη με συναγερμούς από οποιοδήποτε άλλο υποσύστημα, ανεξάρτητα από τον μηχανισμό εκδήλωσής τους.



Εικόνα 21: Διαδικασία κανονικοποίησης συναγερμού: DDC ελεγκτής, ζώνη MB03, όροφος 2, πρωτόκολλο BACnet.

Το τέταρτο παράδειγμα αφορά την κανονικοποίηση δεδομένων από ρυθμιστή παροχής αέρα της ζώνης MB04 του τετάρτου ορόφου, ο οποίος συνδέεται μέσω MP-Bus και εκθέτει τα δεδομένα του σε Modbus RTU μέσω gateway. Η τιμή αναφοράς παροχής αέρα και η πραγματική θέση της βαλβίδας διατίθενται σε διαδοχικούς καταχωρητές, με τη θέση βαλβίδας να εκφράζεται ως ποσοστό και την τιμή αναφοράς ως παροχή αέρα σε m^3/h μετά από εφαρμογή συντελεστή κλιμάκωσης. Η κανονικοποίηση εφαρμόζει τους αντίστοιχους κανόνες μετασχηματισμού και παράγει δύο διακριτές κανονικοποιημένες εγγραφές, μία για τη θέση βαλβίδας και μία για την παροχή αέρα, καθεμία με τη δική της μονάδα, δείκτη ποιότητας και χρονική σήμανση. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική καθώς οι δύο μεταβλητές έχουν διαφορετικό λειτουργικό ρόλο και θα αντιστοιχιστούν σε διαφορετικές σημασιολογικές οντότητες κατά την επόμενη φάση εμπλουτισμού.



Εικόνα 22: Διαδικασία κανονικοποίησης δεδομένων ρυθμιστή παροχής αέρα: ζώνη MB04, όροφος 4, πρωτόκολλο MP-Bus μέσω gateway.

Η εξέταση των τεσσάρων παραδειγμάτων επιβεβαιώνει ότι οι κανόνες κανονικοποίησης που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 5 είναι εφαρμόσιμοι στις συνθήκες της εγκατάστασης NEO και παράγουν δομικά ομοιογενείς εγγραφές ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο και τον τύπο δεδομένων προέλευσης. Η ετερογένεια της εγκατάστασης, που εκτείνεται από τις ακατέργαστες τιμές καταχωρητών Modbus RTU έως τις δομημένες κοινοποιήσεις γεγονότων BACnet και τα δεδομένα MP-Bus που προσπελούνται μέσω gateway, αντιμετωπίζεται συστηματικά από τον πυρήνα κανονικοποίησης μέσω διαφοροποιημένων κανόνων που προσαρμόζονται στον τύπο δεδομένων κάθε πηγής. Τα παραδείγματα αναδεικνύουν επίσης δύο σημαντικές αρχιτεκτονικές ιδιότητες του ενδιάμεσου επιπέδου. Πρώτον, η δομή εξόδου παραμένει κοινή σε όλους τους τύπους δεδομένων, καθώς κάθε κανονικοποιημένη εγγραφή περιλαμβάνει πάντοτε τιμή ή κατάσταση, μονάδα ή λεξιλόγιο, δείκτη ποιότητας, χρονική σήμανση και ταυτότητα πηγής, ανεξάρτητα από το αν πρόκειται για αναλογική τιμή, κατάσταση, συναγερμό ή δεδομένο ρυθμιστή παροχής αέρα. Δεύτερον, μία φυσική συσκευή μπορεί να παράγει πολλαπλές ανεξάρτητες κανονικοποιημένες εγγραφές, όπως φάνηκε στο παράδειγμα

του ρυθμιστή παροχής αέρα, καθεμία με διακριτή ταυτότητα και λειτουργικό ρόλο. Το κανονικοποιημένο σύνολο δεδομένων που προκύπτει αποτελεί αξιόπιστη βάση για τη σημασιολογική αντιστοίχιση που εξετάζεται στην επόμενη ενότητα.

6.4. Εφαρμογή σημασιολογικής αντιστοίχισης με Brick Schema

Με βάση την ανάλυση που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, η σημασιολογική αντιστοίχιση για την εγκατάσταση NEO υλοποιείται μέσω του Brick Schema, το οποίο παρέχει την οντολογική δομή που απαιτείται για τη μοντελοποίηση των σχέσεων μεταξύ σημείων μέτρησης, εξοπλισμού και χώρων σε εγκατάσταση αυτής της κλίμακας και πολυπλοκότητας. Οι τύποι οντοτήτων και οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια προέρχονται από την έκδοση 1.3 του Brick Schema, η οποία αποτελεί τη σταθερή έκδοση αναφοράς κατά την εκπόνηση της εργασίας και περιλαμβάνει το σύνολο των κλάσεων εξοπλισμού, χώρων και σημείων που απαιτεί το σενάριο. Η διαδικασία εφαρμόζεται στα κανονικοποιημένα δεδομένα που παράγει το ενδιαμέσο επίπεδο και ακολουθεί τα τέσσερα βήματα χαρτογράφησης που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.5, χωρίς να τροποποιεί τις τιμές ή τη δομή των εγγραφών.

Το πρώτο βήμα αφορά την αντιστοίχιση των σημείων μέτρησης σε τύπους οντοτήτων Brick. Για κάθε κατηγορία συσκευής της εγκατάστασης ορίζεται ο αντίστοιχος τύπος οντότητας από τη βιβλιοθήκη του Brick Schema. Ο αισθητήρας CO₂ αντιστοιχίζεται στον τύπο `CO2_Sensor`, η επαφή παραθύρου στον τύπο `Window_Open_Close_Status`, ο ρυθμιστής παροχής αέρα στον τύπο `VAV` με τα επιμέρους σημεία μέτρησής του να αντιστοιχίζονται στους τύπους `Air_Flow_Sensor` και `Damper_Position_Sensor`, και η εξαοδική βαλβίδα πάνελ οροφής στον τύπο `Six_Way_Valve` με τα σχετικά σημεία θερμοκρασίας στους τύπους `Supply_Water_Temperature_Sensor` και `Return_Water_Temperature_Sensor`. Οι κανόνες αντιστοίχισης εφαρμόζονται αυτόματα βάσει του τύπου συσκευής και της μονάδας μέτρησης που έχουν αποδοθεί κατά την κανονικοποίηση, με ανθρώπινη επαλήθευση σε περιπτώσεις αμφισημίας.

Το δεύτερο βήμα αφορά τη μοντελοποίηση των χώρων της εγκατάστασης. Η ιεραρχική δομή του κτιρίου αποτυπώνεται μέσω των τύπων οντοτήτων `Building`, `Floor`, `Zone` και `Room`, με σχέσεις `hasPart` που συνδέουν κάθε επίπεδο της ιεραρχίας με το επόμενο. Κάθε ζώνη μίσθωσης αντιστοιχίζεται σε οντότητα τύπου `Zone`, και οι επιμέρους χώροι κάθε ζώνης αντιστοιχίζονται σε οντότητες τύπου `Room`. Η δομή αυτή επιτρέπει στις εφαρμογές να εντοπίζουν αυτόματα όλα τα σημεία μέτρησης που ανήκουν σε συγκεκριμένο όροφο, ζώνη ή χώρο, χωρίς να απαιτείται γνώση της τεχνικής τοπολογίας της εγκατάστασης.

Το τρίτο βήμα αφορά τη μοντελοποίηση του εξοπλισμού και των σχέσεών του με τα σημεία μέτρησης και τους χώρους. Κάθε DDC ελεγκτής αντιστοιχίζεται σε οντότητα τύπου **Controller**, τα σημεία μέτρησης και ελέγχου του οποίου συνδέονται με αυτόν μέσω της σχέσης **hasPoint**, ενώ ο ίδιος ο ελεγκτής εντάσσεται στη ζώνη μίσθωσης που εξυπηρετεί μέσω της σχέσης **hasLocation**. Οι ρυθμιστές παροχής αέρα αντιστοιχίζονται σε οντότητες τύπου **VAV** και συνδέονται με τους χώρους που εξυπηρετούν μέσω της σχέσης **feeds**, ενώ τα επιμέρους σημεία μέτρησής τους συνδέονται με τον εξοπλισμό μέσω της σχέσης **hasPoint**. Οι εξαοδικές βαλβίδες πάνελ οροφής αντιστοιχίζονται σε οντότητα τύπου **Valve** και συνδέονται με την οντότητα του αντίστοιχου τερματικού στοιχείου ακτινοβολίας οροφής μέσω της σχέσης **isPartOf**, αποτυπώνοντας τόσο τον τύπο της συσκευής όσο και την ένταξή της στο σύστημα ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό, κάθε σημείο μέτρησης εντάσσεται σε πλήρες λειτουργικό και χωρικό πλαίσιο που επιτρέπει την αυτόματη ερμηνεία του από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου (Balaji, et al., 2016).

Το τέταρτο βήμα αφορά την επαλήθευση της συνέπειας του παραγόμενου μοντέλου. Η τυπική οντολογική δομή του Brick Schema επιτρέπει την εφαρμογή αυτοματοποιημένων ελέγχων συνέπειας μέσω συλλογιστικής, οι οποίοι επαληθεύουν ότι κάθε σημείο μέτρησης έχει λάβει έγκυρο τύπο οντότητας, ότι οι σχέσεις που έχουν ορισθεί είναι επιτρεπτές από το σχήμα και ότι δεν υπάρχουν αντιφάσεις στη μοντελοποίηση. Για την εγκατάσταση NEO, με τον συνολικό αριθμό συσκευών που αναφέρθηκε στην ενότητα 6.2, η αυτοματοποίηση αυτών των ελέγχων αποτελεί πρακτική αναγκαιότητα και όχι απλώς επιθυμητό χαρακτηριστικό. Το παραγόμενο σημασιολογικό μοντέλο αποτελεί τη βάση για την αξιολόγηση που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

Για την απεικόνιση της διαδικασίας αντιστοίχισης παρουσιάζεται ένα συγκεκριμένο παράδειγμα που αφορά τον αισθητήρα CO₂ της ζώνης MB02 του πρώτου ορόφου, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ήδη στην ενότητα 6.3 ως παράδειγμα κανονικοποίησης αναλογικής τιμής. Η επιλογή του ίδιου σημείου μέτρησης επιτρέπει την παρακολούθηση της πλήρους διαδρομής από την ακατέργαστη τιμή πεδίου έως τη σημασιολογικά εμπλουτισμένη οντότητα.

Κάθε αισθητήρας αντιστοιχίζεται στον χώρο εντός του οποίου βρίσκεται φυσικά. Στο Brick Schema, ο χώρος αυτός αναπαρίσταται ως οντότητα τύπου **Room** που εντάσσεται στην ιεραρχία **Building** → **Floor** → **Zone** → **Room**, όπου η μεταβλητή **Zone** αντιστοιχεί στη ζώνη μίσθωσης MB02 και η μεταβλητή **Floor** στον πρώτο όροφο. Η αντιστοίχιση του αισθητήρα εκφράζεται μέσω των ακόλουθων δηλώσεων:

NEO-MB02-F01-C02-01 είναι οντότητα τύπου CO2_Sensor
NEO-MB02-F01-C02-01 hasLocation NEO-MB02-F01-ROOM-04
NEO-MB02-F01-ROOM-04 είναι οντότητα τύπου Room
NEO-MB02-F01-ROOM-04 isPartOf NEO-MB02-F01
NEO-MB02-F01 είναι οντότητα τύπου Zone
NEO-MB02-F01 isPartOf NEO-F01
NEO-F01 είναι οντότητα τύπου Floor
NEO-F01 isPartOf NEO
NEO είναι οντότητα τύπου Building
NEO-MB02-F01-TEMP-01 είναι οντότητα τύπου Temperature_Sensor
NEO-MB02-F01-TEMP-01 hasLocation NEO-MB02-F01-ROOM-04

Παράλληλα, οι ρυθμιστές παροχής αέρα που εξυπηρετούν τον ίδιο χώρο αντιστοιχίζονται ως εξής:

NEO-MB02-F01-VAV-04 είναι οντότητα τύπου VAV
NEO-MB02-F01-VAV-04 feeds NEO-MB02-F01-ROOM-04

Η δομή αυτή επιτρέπει σε μια εφαρμογή ενεργειακής ανάλυσης να εντοπίσει αυτόματα ότι ο αισθητήρας CO₂ και ο ρυθμιστής παροχής αέρα εξυπηρετούν τον ίδιο χώρο, μέσω ερωτήματος που αναζητά όλες τις οντότητες που συνδέονται με τον χώρο NEO-MB02-F01-ROOM-04, χωρίς να απαιτείται ρητή δήλωση σχέσης μεταξύ αισθητήρα και VAV. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της αξίας που προσθέτει η σημασιολογική μοντελοποίηση με Brick Schema σε σχέση με την απλή ετικετοποίηση, καθώς η έμμεση συσχέτιση μεταξύ οντοτήτων προκύπτει αυτόματα από τη δομή του μοντέλου και όχι από ρητές δηλώσεις που θα έπρεπε να συντηρούνται χειροκίνητα.

6.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με βάση τα κριτήρια του Κεφαλαίου 5

Η αξιολόγηση της εφαρμογής της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στην εγκατάσταση NEO πραγματοποιείται με βάση τα τέσσερα κριτήρια που διατυπώθηκαν στην ενότητα 5.1. Η αποτίμηση κάθε κριτηρίου, μαζί με την ποσοτική ανάλυση κάλυψης, την απόδειξη εννοίας σε δείγμα σημείων και τη συγκριτική αποτίμηση έναντι εναλλακτικών προσεγγίσεων, αναπτύσσεται στις επόμενες υποενότητες.

6.5.1. Αποτίμηση της εφαρμογής

Επειδή η μελέτη στηρίζεται σε υποθετικό σενάριο και όχι σε λειτουργικές μετρήσεις, η αποτίμηση είναι αναλυτική και ποσοτική ως προς τη δομή της εγκατάστασης, καθώς εξετάζει αν οι μηχανισμοί της αρχιτεκτονικής αντιμετωπίζουν κάθε κριτήριο με βάση την απογραφή της ενότητας 6.2 και τη διαδικασία των ενοτήτων 6.3 και 6.4. Η ανάλυση συμπληρώνεται από απόδειξη εννοίας σε δείγμα σημείων και από συγκριτική αποτίμηση έναντι εναλλακτικών προσεγγίσεων, ενώ η αποτίμηση κάθε κριτηρίου συνοδεύεται από τα όρια εντός των οποίων ισχύει.

Ως προς το πρώτο κριτήριο, την πληρότητα της κανονικοποίησης, η εφαρμογή καλύπτει και τους τέσσερις τύπους δεδομένων της εγκατάστασης, δηλαδή αναλογικές τιμές, λειτουργικές καταστάσεις, συναγερμούς και δεδομένα σύνθετου εξοπλισμού, με κοινή δομή εξόδου μέσω διαφοροποιημένων κανόνων ανά τύπο. Η κάλυψη είναι πλήρης για τα πέντε πρωτόκολλα που διαχειρίζεται η αρχιτεκτονική αλλά όχι καθολική, καθώς τα αναλογικά σημεία εκτός των πέντε πρωτοκόλλων, χαρακτηριστικά οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες, απαιτούν χωριστή αναλογική συνιστώσα σύνδεσης. Ο όρος πληρότητα αναφέρεται εδώ στη δομική κάλυψη των τύπων και όχι στην ποιότητα των τιμών σε λειτουργία, η οποία δεν αποτιμάται χωρίς πραγματικά δεδομένα.

Ως προς το δεύτερο κριτήριο, την τεχνολογική ανεξαρτησία, η ενσωμάτωση καθενός από τα πέντε πρωτόκολλα απαιτεί μόνο την αντίστοιχη συνιστώσα σύνδεσης, χωρίς τροποποίηση του πυρήνα. Το MP-Bus αποτελεί το ισχυρότερο και ταυτόχρονα το οριακό παράδειγμα. Ένα ιδιόκτητο πρωτόκολλο ενσωματώνεται χωρίς αλλαγή του πυρήνα, αλλά μόνο έμμεσα μέσω gateway, και όπως σημειώθηκε στην ενότητα 2.7 η εξάρτηση αυτή περιορίζει την ανεξάρτητη ανάπτυξη της συνιστώσας. Συνεπώς η τεχνολογική ανεξαρτησία ισχύει πλήρως για τα ανοιχτά πρωτόκολλα και μερικώς για τα ιδιόκτητα.

Ως προς το κριτήριο της επεκτασιμότητας, όπως ορίστηκε δομικά στην ενότητα 5.1, η εφαρμογή στο σενάριο NEO επιβεβαιώνει ότι κάθε επέκταση περιορίζεται σε σαφώς οριοθετημένο σύνολο μεταβολών. Η ενσωμάτωση καθενός από τα πέντε πρωτόκολλα της εγκατάστασης απαιτεί μόνο την αντίστοιχη συνιστώσα σύνδεσης, ενώ η προσθήκη των χιλίων εκατό επτά συσκευών του τυπικού ορόφου εκφράζεται ως προσθήκη εγγραφών παραμετροποίησης και δεν επιβάλλει μεταβολή στον πυρήνα κανονικοποίησης ούτε στις εφαρμογές κατανάλωσης. Η αποτίμηση αυτή αφορά το εύρος των απαιτούμενων μεταβολών και όχι την επίδοση του συστήματος υπό φόρτο, η οποία δεν είναι δυνατόν να εξεταστεί στο πλαίσιο υποθετικού σεναρίου χωρίς λειτουργικές μετρήσεις.

Ως προς το τέταρτο κριτήριο, την αξιοποιησιμότητα από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, το αποτέλεσμα είναι δομημένο ώστε οι εφαρμογές να διατυπώνουν ερωτήματα βάσει τύπων και σχέσεων Brick και όχι βάσει τεχνικών ονομάτων σημείων. Η ιδιότητα αυτή τεκμηριώνεται στην απόδειξη εννοίας που ακολουθεί, αλλά παραμένει επίδειξη σε συνθετικό δείγμα και όχι επαλήθευση με πραγματικά δεδομένα.

6.5.2. Ποσοτική ανάλυση κάλυψης

Η δομική κάλυψη αποτιμάται ποσοτικά πάνω στις 1.107 συσκευές του τυπικού ορόφου, κατανεμημένες ανά πρωτόκολλο και μηχανισμό χαρτογράφησης όπως φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Δομική κάλυψη ανά πρωτόκολλο, με αριθμό συσκευών, ποσοστό, μηχανισμό χαρτογράφησης και βαθμό αυτοματοποίησης.

Πρωτό- κόλλο	Συ- σκευές	Ποσο- στό	Μηχανισμός χαρτογράφησης	Βαθμός αυτοματο- ποίησης
BACnet	15	1,4%	Αυτόματη ανακάλυψη αντικειμένων και ιδιοτήτων	Υψηλός
KNX	630	56,9%	Αντιστοίχιση από διευθύνσεις ομάδας βάσει τεκμηρίωσης έργου ETS	Ημιαυτόματος, εξαρτημένος από συμβάσεις
Modbus RTU	130	11,7%	Ρητή παραμετροποίηση καταχωρητών	Χειροκίνητος
MP-Bus	143	12,9%	Παραμετροποίηση καταχωρητών μέσω gateway	Χειροκίνητος, με εξάρτηση από gateway
Analog	189	17,1%	Εκτός των πέντε πρωτοκόλλων, απαιτεί χωριστή αναλογική συνιστώσα	Εκτός υφιστάμενης κάλυψης

Η ανάλυση αναδεικνύει ότι η πλήρως αυτόματη χαρτογράφηση μέσω ανακάλυψης αφορά μόνο το 1,4% των συσκευών, ενώ το μεγαλύτερο μέρος, σε ποσοστό 56,9%, εξαρτάται από συνεπείς συμβάσεις ονοματολογίας στο KNX, περίπου το ένα τέταρτο, σε ποσοστό 24,6% που προκύπτει από το άθροισμα Modbus RTU (11,7%) και MP-Bus (12,9%), απαιτεί ρητή χειροκίνητη αντιστοίχιση καταχωρητών και το 17,1% βρίσκεται εκτός του υποστηριζόμενου πρωτοκολλικού περιβάλλοντος. Το εύρημα αυτό ποσοτικοποιεί τον περιορισμό που αλλιώς διατυπώνεται μόνο ποιοτικά και δείχνει ότι η αξία της αρχιτεκτονικής δεν έγκειται στην εξάλειψη της χειροκίνητης εργασίας αλλά στη

συγκέντρωσή της σε ένα σαφώς ορισμένο σημείο, τη συνιστώσα σύνδεσης, ανεξάρτητα από τον πυρήνα και τις εφαρμογές.

Η κάλυψη αποτιμάται σε επίπεδο συσκευής και όχι μεμονωμένου σημείου μέτρησης, καθώς ο μηχανισμός χαρτογράφησης, δηλαδή η αυτόματη ανακάλυψη έναντι της ρητής χειροκίνητης παραμετροποίησης, καθορίζεται ανά πρωτόκολλο και ανά κατηγορία συσκευής, και όχι ανά επιμέρους σημείο. Συνεπώς η συσκευή αποτελεί τη φυσική μονάδα μέτρησης του βαθμού αυτοματοποίησης της χαρτογράφησης.

Η επιλογή της συσκευής ως μονάδας μέτρησης συνεπάγεται ότι τα ποσοστά κάλυψης δεν αντιστοιχούν ευθέως στον όγκο των σημείων μέτρησης που χειρίζεται κάθε μηχανισμός. Όπως σημειώθηκε στην ενότητα 6.2, κάθε συσκευή παράγει πολλαπλά σημεία, ο αριθμός των οποίων διαφέρει σημαντικά ανά κατηγορία. Μια συσκευή Modbus RTU, όπως ένας πολυαισθητήρας χώρου, εκθέτει αρκετά σημεία και χαρτογραφείται χειροκίνητα, ενώ ένα αντικείμενο BACnet που ανακαλύπτεται αυτόματα ενδέχεται να αντιστοιχεί σε λιγότερα σημεία. Κατά συνέπεια, ο βαθμός αυτοματοποίησης μετρούμενος ανά σημείο μέτρησης θα ήταν πιθανότατα χαμηλότερος από τον αντίστοιχο ανά συσκευή, γεγονός που ενισχύει το συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο μέρος της χαρτογράφησης εξαρτάται από χειροκίνητη ή εξαρτημένη από συμβάσεις παρέμβαση. Η αποτίμηση ανά συσκευή αποτελεί επομένως τη συντηρητικότερη ως προς την αυτοματοποίηση επιλογή και δεν υπερεκτιμά τον χειρωνακτικό φόρτο.

6.5.3. Απόδειξη εννοίας σε δείγμα σημείων

Για να επιδειχθεί ο μηχανισμός, επιλέγεται δείγμα έξι σημείων από διαφορετικά πρωτόκολλα που σχετίζονται με τον χώρο NEO-MB02-F01-ROOM-04, με συνθετικές τιμές. Μετά την κανονικοποίηση, όλα τα σημεία αποκτούν κοινή δομή εξόδου ανεξάρτητα από την προέλευσή τους, όπως φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Δείγμα σημείων διαφορετικών πρωτοκόλλων πριν και μετά την κανονικοποίηση, στο πλαίσιο της απόδειξης εννοίας.

Σημείο	Πρωτόκολλο	Τιμή πεδίου	Κανονικοποιημένη τιμή	Μονάδα	Τύπος	Ποιότητα
ROOM-04 θερμοκρασία	KNX	0x0A12	23,8	°C	αναλογική	έγκυρη
ROOM-04 CO ₂	Modbus RTU	612	612	ppm	αναλογική	έγκυρη
VAV-04 ροή αέρα	MP-Bus μέσω gateway	1820	182,0	m ³ /h	αναλογική	έγκυρη
ROOM-04 χειριστήριο	BACnet	active	true		κατάσταση	έγκυρη

MB02	Modbus RTU	48230	48,23	kW	αναλογική	έγκυρη
μετρητής ισχύος						
ROOM-04	KNX	0x01	true		κατά-	έγκυρη
φωτιστικό					σταση	

Στη συνέχεια τα κανονικοποιημένα σημεία αντιστοιχίζονται σε οντότητες Brick. Το ακόλουθο απόσπασμα σε σύνταξη Turtle αποτυπώνει τη σημασιολογική δομή του χώρου και χρησιμοποιεί δύο χώρους ονομάτων. Ο πρώτος, brick, παραπέμπει στο επίσημο λεξιλόγιο του Brick Schema, από το οποίο προέρχονται οι τύποι οντοτήτων και οι σχέσεις. Ο δεύτερος, neo, αποτελεί τον τοπικό χώρο ονομάτων της εγκατάστασης NEO, κάτω από τον οποίο ορίζονται οι συγκεκριμένες οντότητες του κτιρίου, όπως οι χώροι και ο εξοπλισμός. Το URL του neo είναι ενδεικτικό και σε πραγματική εφαρμογή αντικαθίσταται από τον πραγματικό χώρο ονομάτων του οργανισμού.

```
@prefix brick:      https://brickschema.org/schema/Brick# .
@prefix neo:        https://example.org/neo# .
neo:MB02-F01-ROOM-04 a brick:Room .
neo:MB02-F01-C02-01 a brick:C02_Sensor ; brick:hasLocation neo:MB02-F01-ROOM-04 .
neo:MB02-F01-TEMP-01 a brick:Temperature_Sensor ; brick:hasLocation neo:MB02-F01-ROOM-04 .
neo:MB02-F01-VAV-04 a brick:VAV ; brick:feeds neo:MB02-F01-ROOM-04 ; brick:hasPoint neo:MB02-F01-VAV-04-airflow .
neo:MB02-F01-VAV-04-airflow a brick:Air_Flow_Sensor .
```

Πάνω στο μοντέλο εκτελούνται τρία αντιπροσωπευτικά ερωτήματα που αξιοποιούν τη σημασιολογική δομή και όχι τα τεχνικά ονόματα των σημείων. Το πρώτο ερώτημα αναζητά όλα τα σημεία που βρίσκονται στον χώρο ROOM-04 και επιστρέφει τον αισθητήρα CO₂ και τον αισθητήρα θερμοκρασίας. Το δεύτερο αναζητά όλους τους αισθητήρες CO₂ του κτιρίου ανεξαρτήτως πρωτοκόλλου και επιστρέφει το σύνολο των οντοτήτων τύπου **brick:C02_Sensor**, χωρίς να γνωρίζει αν προέρχονται από Modbus ή άλλο πρωτόκολλο. Το τρίτο ξεκινά από τον αισθητήρα CO₂ και, μέσω της σχέσης **hasLocation** και της σχέσης **feeds**, εντοπίζει τον εξοπλισμό που εξυπηρετεί τον ίδιο χώρο, επιστρέφοντας τον VAV-04 χωρίς να έχει δηλωθεί ρητή σύνδεση αισθητήρα και VAV. Η έμμεση αυτή συσχέτιση αποτελεί την προστιθέμενη αξία της οντολογικής μοντελοποίησης έναντι της απλής ετικετοποίησης.

Η απόδειξη εννοίας επιβεβαιώνει σε συνθετικό δείγμα ότι σημεία διαφορετικών πρωτοκόλλων καταλήγουν σε κοινή δομή και καθίστανται προσπελάσιμα μέσω σημασιο-

λογικών ερωτημάτων, χωρίς να υποκαθιστά την επαλήθευση σε πραγματική εγκατάσταση με πλήρη όγκο δεδομένων.

6.5.4. Συγκριτική αποτίμηση έναντι εναλλακτικών προσεγγίσεων

Η αξία της προτεινόμενης προσέγγισης αποτιμάται συγκριτικά έναντι δύο εναλλακτικών που απαντώνται στην πράξη, της σύνδεσης σημείο προς σημείο, όπου κάθε εφαρμογή διασυνδέεται απευθείας με κάθε πρωτόκολλο, και της προσέγγισης μόνο με ετικετοποίηση, χωρίς πυρήνα κανονικοποίησης και χωρίς οντολογικές σχέσεις. Η σύγκριση παρουσιάζεται ακολούθως (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Συγκριτική αποτίμηση της προτεινόμενης προσέγγισης έναντι της σύνδεσης σημείο προς σημείο και της προσέγγισης μόνο με ετικετοποίηση, ως προς τα τέσσερα κριτήρια.

Κριτήριο	Σημείο προς σημείο	Μόνο ετικετοποίηση	Προτεινόμενη
Κανονικοποίηση τύπων	Καμία, κάθε εφαρμογή χειρίζεται μόνη της μονάδες και τύπους	Μερική, χωρίς ενιαία δομή εξόδου	Πλήρης για τα πέντε πρωτόκολλα
Ενσωμάτωση νέας πηγής	Απαιτεί αλλαγή σε κάθε εφαρμογή	Απαιτεί νέους κανόνες ετικετών ανά εφαρμογή	Μόνο νέα συνιστώσα σύνδεσης
Σημασιολογική πληρότητα	Ανύπαρκτη, γνώση τοπολογίας ανά εφαρμογή	Ετικέτες χωρίς σχέσεις, καμία αυτόματη συσχέτιση	Σχέσεις και αυτόματη συσχέτιση μέσω Brick
Αξιοποίηση από εφαρμογές	Εξαρτημένη από τεχνικά ονόματα σημείων	Εξαρτημένη από συμβάσεις ετικετών	Ερωτήματα βάσει τύπων και σχέσεων

Η σύγκριση δείχνει ότι η σύνδεση σημείο προς σημείο υποχρεώνει κάθε εφαρμογή να ενσωματώνει η ίδια τις τεχνικές λεπτομέρειες όλων των πρωτοκόλλων, ενώ η προσέγγιση μόνο με ετικετοποίηση λύνει τη δομική ομοιογένεια αλλά όχι την έμμεση συσχέτιση οντοτήτων. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υπερτερεί στη μετάβαση από τιμές σε σχέσεις, με κόστος τη χειροκίνητη αποτύπωση τοπολογίας που καταγράφηκε στους περιορισμούς.

Συνολικά, η αποτίμηση δείχνει ότι η αρχιτεκτονική αντιμετωπίζει και τα τέσσερα κριτήρια στο σενάριο NEO εντός των ορίων που σημειώθηκαν, και ότι η αξία της εντοπίζεται στη συγκέντρωση της πολυπλοκότητας σε ένα σημείο και στην οντολογική συσχέτιση των δεδομένων. Καθώς όμως στηρίζεται σε υποθετικό σενάριο και σε συνθε-

τικό δείγμα, συνιστά αναλυτική και επιδεικτική τεκμηρίωση, ενώ η εμπειρική επαλήθευση σε πραγματική εγκατάσταση παραμένει αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

6.6. Περιορισμοί και δυνατότητα γενίκευσης

Η εφαρμογή της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στην εγκατάσταση NEO ανέδειξε, παράλληλα με τα θετικά αποτελέσματα που τεκμηριώθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, έναν αριθμό περιορισμών που αφορούν τόσο τη συγκεκριμένη εγκατάσταση όσο και τη γενικότερη εφαρμοσιμότητα της αρχιτεκτονικής.

Ο πρώτος περιορισμός αφορά την εξάρτηση της ποιότητας της κανονικοποίησης και της σημασιολογικής αντιστοίχισης από την ποιότητα της ονοματολογίας και της παραμετροποίησης που έχει εφαρμοστεί κατά την εγκατάσταση. Όπως αναδείχθηκε στην ενότητα 6.2, η αναγνώριση της ταυτότητας κάθε συσκευής στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ανθρώπινες αποφάσεις ονοματολογίας που λαμβάνονται κατά τη φάση εγκατάστασης και παραμετροποίησης. Εγκαταστάσεις στις οποίες η ονοματολογία δεν ακολουθεί συνεπείς συμβάσεις απαιτούν εκτενέστερη χειροκίνητη επεξεργασία κατά τη φάση χαρτογράφησης, αυξάνοντας το κόστος εφαρμογής και μειώνοντας τον βαθμό αυτοματοποίησης που μπορεί να επιτευχθεί. Ο περιορισμός αυτός δεν αφορά αποκλειστικά την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, αλλά είναι κοινός σε κάθε προσέγγιση σημασιολογικής μοντελοποίησης κτιριακών δεδομένων και έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους κυριότερους περιορισμούς για την ευρεία υιοθέτηση τέτοιων προσεγγίσεων (Balaji, et al., 2016).

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά τον χειροκίνητο χαρακτήρα της μοντελοποίησης σχέσεων στο Brick Schema, και ιδίως τη σύνδεση εξοπλισμού με χώρους. Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 6.4, η αντιστοίχιση αυτή απαιτεί εξωτερική τεκμηρίωση της τοπολογίας της εγκατάστασης και δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως ανεξάρτητα από το επίπεδο ωριμότητας των κανόνων αντιστοίχισης που έχουν αναπτυχθεί για την εγκατάσταση. Για εγκαταστάσεις της κλίμακας του NEO, με χιλιάδες συσκευές κατανεμημένες σε πολλαπλές ζώνες και ορόφους, η χειροκίνητη αποτύπωση των σχέσεων εξοπλισμού και χώρων απαιτεί σημαντικό χρόνο και εξειδικευμένη γνώση της εγκατάστασης, ιδίως όταν η διαθέσιμη τεκμηρίωση είναι ελλιπής ή δεν έχουν διατηρηθεί ενημερωμένα τεχνικά σχέδια και αρχεία παραμετροποίησης κατά τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Ο τρίτος περιορισμός αφορά τον υποθετικό χαρακτήρα της μελέτης περίπτωσης. Αν και το σενάριο της εγκατάστασης NEO διαμορφώθηκε με βάση ρεαλιστικές παραδοχές και πραγματικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι υποθετικά και δεν αντανακλούν την πραγματική λειτουργία της εγκατάστασης. Η επα-

λήθευση της αρχιτεκτονικής σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, με πραγματικά δεδομένα πεδίου και πραγματικές απαιτήσεις εφαρμογών, θα παρείχε ισχυρότερη τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν και θα επέτρεπε τον εντοπισμό πρόσθετων περιορισμών που δεν είναι εμφανείς σε υποθετικό σενάριο.

Ως προς τη δυνατότητα γενίκευσης, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική σχεδιάστηκε με ρητό στόχο την εφαρμοσιμότητα σε ετερογενή περιβάλλοντα και δεν περιέχει στοιχεία που να την καθιστούν εξειδικευμένη για τον τύπο ή την κλίμακα της εγκατάστασης NEO. Οι αρχές αποσύζευξης, η δομή των συνιστωσών σύνδεσης και η λογική κανονικοποίησης είναι εφαρμόσιμες σε οποιαδήποτε εγκατάσταση που διαθέτει ετερογενή πρωτόκολλα επικοινωνίας, ανεξάρτητα από τον τύπο του κτιρίου, την κλίμακα της εγκατάστασης ή τον συνδυασμό πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, ο βαθμός αυτοματοποίησης που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φάση χαρτογράφησης και σημασιολογικής αντιστοίχισης εξαρτάται από την ποιότητα της τεκμηρίωσης και της ονοματολογίας κάθε εγκατάστασης, παράγοντας που διαφέρει σημαντικά μεταξύ εγκαταστάσεων και αποτελεί τη σημαντικότερη μεταβλητή στην πρακτική εφαρμογή της αρχιτεκτονικής (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said, & Soltan, 2025).

7. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

Η παρούσα εργασία ανέπτυξε και αξιολόγησε μια αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης για έξυπνα κτίρια, με στόχο την αντιμετώπιση της ετερογένειας των συστημάτων πεδίου και την παροχή δομικά ομοιογενών και σημασιολογικά εμπλουτισμένων δεδομένων προς εφαρμογές ανώτερου επιπέδου. Η αναλυτική αποτίμηση στο σενάριο της εγκατάστασης NEO, μαζί με την ποσοτική ανάλυση κάλυψης, την απόδειξη εννοίας σε δείγμα σημείων και τη συγκριτική αποτίμηση έναντι εναλλακτικών προσεγγίσεων, επιτρέπει τη διατύπωση συμπερασμάτων που αφορούν τόσο την αρχιτεκτονική καθεαυτή όσο και τις ευρύτερες προεκτάσεις της για τον σχεδιασμό συστημάτων διαχείρισης κτιριακών δεδομένων.

Το κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι η αποσύζευξη μεταξύ επιπέδου πεδίου και επιπέδου εφαρμογών μέσω ενδιάμεσου επιπέδου κανονικοποίησης αποτελεί αναγκαία αρχιτεκτονική συνθήκη για την αξιόπιστη και κλιμακούμενη αξιοποίηση κτιριακών δεδομένων. Η άμεση διασύνδεση εφαρμογών με ετερογενή συστήματα πεδίου εισάγει εξαρτήσεις που αυξάνουν την πολυπλοκότητα, περιορίζουν τη φορητότητα και καθιστούν κάθε αλλαγή στο επίπεδο πεδίου πιθανή αιτία δυσλειτουργίας σε επίπεδο εφαρμογών. Η συγκριτική αποτίμηση επιβεβαίωσε ότι η σύνδεση σημείο προς σημείο υποχρεώνει κάθε εφαρμογή να ενσωματώνει η ίδια τις τεχνικές λεπτομέρειες όλων των πρωτοκόλ-

λων, ενώ το ενδιάμεσο επίπεδο απορροφά την ετερογένεια και παράγει ομοιογενή πληροφορία ανεξάρτητη από την τεχνολογία προέλευσής της.

Το δεύτερο συμπέρασμα αφορά τη διάκριση μεταξύ κανονικοποίησης και σημασιολογικής διαλειτουργικότητας ως δύο διακριτών και αλληλοσυμπληρούμενων επιπέδων εμπλουτισμού. Η κανονικοποίηση παρέχει δομική ομοιογένεια που είναι αναγκαία αλλά ανεπαρκής από μόνη της, ενώ η σημασιολογική αντιστοίχιση με Brick Schema προσθέτει το λειτουργικό και χωρικό πλαίσιο που καθιστά τα δεδομένα αυτόματα ερμηνεύσιμα από εφαρμογές. Η απόδειξη εννοίας στην εγκατάσταση NEO επιβεβαίωσε σε συνθετικό δείγμα ότι σημεία διαφορετικών πρωτοκόλλων καθίστανται προσπελάσιμα μέσω σημασιολογικών ερωτημάτων ανεξάρτητα από τα τεχνικά τους ονόματα, ενώ η συγκριτική αποτίμηση ανέδειξε ότι η διακριτή αξία της προσέγγισης έναντι της απλής ετικετοποίησης έγκειται στη μετάβαση από μεμονωμένες τιμές σε σχέσεις μεταξύ οντοτήτων.

Το τρίτο συμπέρασμα αφορά την κρίσιμη σημασία της ονοματολογίας και της τεκμηρίωσης της εγκατάστασης ως προϋπόθεσης για την αποτελεσματική εφαρμογή της αρχιτεκτονικής. Η ποσοτική ανάλυση κάλυψης στο σενάριο NEO ανέδειξε ότι μόνο μικρό ποσοστό των σημείων χαρτογραφείται πλήρως αυτόματα μέσω ανακάλυψης, ενώ το μεγαλύτερο μέρος εξαρτάται από συνεπείς συμβάσεις ονοματολογίας και από την ποιότητα των τεχνικών σχεδίων και αρχείων παραμετροποίησης. Το εύρημα αυτό οδηγεί σε ένα ουσιώδες συμπέρασμα, ότι η αρχιτεκτονική δεν εξαλείφει τη χειροκίνητη εργασία αλλά τη συγκεντρώνει σε ένα σαφώς ορισμένο σημείο, τη συνιστώσα σύνδεσης, και ότι επομένως δεν μπορεί να εξεταστεί απομονωμένα από τις πρακτικές διαχείρισης τεκμηρίωσης που εφαρμόζονται κατά τον κύκλο ζωής του κτιρίου.

Τα συμπεράσματα αυτά διατυπώνονται εντός των ορίων της μεθόδου αποτίμησης. Η αξιολόγηση στηρίχθηκε σε υποθετικό, αν και ρεαλιστικό, σενάριο και σε συνθετικό δείγμα δεδομένων, και συνεπώς συνιστά αναλυτική και επιδεικτική τεκμηρίωση των ιδιοτήτων της αρχιτεκτονικής και όχι εμπειρική επαλήθευση σε συνθήκες λειτουργίας. Η ισχύς των συμπερασμάτων περιορίζεται αντίστοιχα, και η επιβεβαίωσή τους σε πραγματική εγκατάσταση αποτελεί αναγκαίο επόμενο βήμα.

Ως προς τις προτάσεις για μελλοντική εργασία, αναδεικνύονται τρεις κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά την επαλήθευση της αρχιτεκτονικής σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, με πραγματικά δεδομένα πεδίου από εγκατάσταση σε λειτουργία και με μετρήσιμους δείκτες όπως το ποσοστό σημείων που χαρτογραφούνται αυτόματα έναντι χειροκίνητα και η κάλυψη ανά τύπο δεδομένων, ώστε να εντοπιστούν περιορισμοί που δεν είναι εμφανείς σε υποθετικό σενάριο. Η δεύτερη αφορά την ανάπτυξη αυτοματοποιη-

μένων μηχανισμών χαρτογράφησης που αξιοποιούν τεχνικές επεξεργασίας φυσικής γλώσσας για την εξαγωγή σημασιολογικής πληροφορίας από ονόματα σημείων μέτρησης, μειώνοντας την εξάρτηση από χειροκίνητη παραμετροποίηση. Η τρίτη αφορά την επέκταση της αρχιτεκτονικής ώστε να υποστηρίζει δυναμική ενημέρωση του σημασιολογικού μοντέλου κατά τη διάρκεια λειτουργίας, χωρίς διακοπή της ροής δεδομένων, αντιμετωπίζοντας την πρόκληση της συντήρησης του μοντέλου σε εγκαταστάσεις που εξελίσσονται διαχρονικά.

8. Δήλωση Χρήσης Τεχνητής Νοημοσύνης

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας έγινε περιορισμένη χρήση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης, αποκλειστικά για υποστηρικτικούς σκοπούς. Συγκεκριμένα, τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη μορφοποίηση του κειμένου, τον εντοπισμό γραμματικών και συντακτικών σφαλμάτων, και την αξιολόγηση της εγκυρότητας εξωτερικών πηγών. Το σύνολο του περιεχομένου της εργασίας, συμπεριλαμβανομένων της ανάλυσης, της επιχειρηματολογίας και των συμπερασμάτων, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν της πνευματικής εργασίας του συγγραφέα. Κανένα τμήμα του κειμένου δεν παράχθηκε ή διαμορφώθηκε ουσιαστικά από συστήματα τεχνητής νοημοσύνης.

9. Βιβλιογραφία

- Abdelwahed, S. H., Hefny, I. M., Hegazy, M., Said, L. A., & Soltan, A. (2025). Survey of IoT multi-protocol gateways: Architectures, protocols and cybersecurity. *Internet of Things*, 33, 101703. doi:<https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101703>
- Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72, 343-355. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>
- Alfalouji, Q., Schranz, T., Kümpel, A., Schraven, M., Storek, T., Gross, S., . . . Schweiger, G. (2022). IoT Middleware Platforms for Smart Energy Systems: An Empirical Expert Survey. *Buildings*, 12. doi:10.3390/buildings12050526
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2024). *ANSI/ASHRAE Standard 135-2024: BACnet – A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks*. ASHRAE. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Balaji, B., Bhattacharya, A., Fierro, G., Gao, J., Gluck, J., Hong, D., . . . Whitehouse, K. (2016). Brick: Towards a Unified Metadata Schema For Buildings. *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments* (pp. 41–50). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2993422.2993577

- Blechmann, S., Sowa, I., Schraven, M. H., Streblow, R., Müller, D., & Monti, A. (2023). Open source platform application for smart building and smart grid controls. *Automation in Construction*, 145, 104622. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104622>
- Dawson-Haggerty, S., Jiang, X., Tolle, G., Ortiz, J., & Culler, D. (2010). sMAP: a simple measurement and actuation profile for physical information. *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (pp. 197–210). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1869983.1870003
- Domingues, P., Carreira, P., Vieira, R., & Kastner, W. (2016). Building automation systems: Concepts and technology review. *Computer Standards & Interfaces*, 45, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.11.005>
- Dong, B., Cao, C., & Lee, S. E. (2005). Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region. *Energy and Buildings*, 37, 545-553. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.009>
- Hildén, A., Järventausta, P., Repo, S., Systä, K., Heikkilä, V., Hylli, O., . . . Vilkkö, M. (2022). A data collection and supplementary control platform of a modern building for smart energy applications. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100928. doi:<https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100928>
- International Organization for Standardization. (2005). # ISO 16484-3:2005: *Building automation and control systems (BACS) - Part 3: Functions*. Geneva.
- International Organization for Standardization. (2006). # ISO/IEC 14543-3-1:2006: *Information technology - Home electronic systems (HES) architecture - Part 3-1: Communication layers - Application layer for network based control of HES Class 1*. Geneva.
- International Organization for Standardization. (2022). # ISO 16484-5:2022: *Building automation and control systems (BACS) - Part 5: Data communication protocol*. Geneva.
- Malkawi, A., Ervin, S., Han, X., Chen, E. X., Lim, S., Ampanavos, S., & Howard, P. (2023). Design and applications of an IoT architecture for data-driven smart building operations and experimentation. *Energy and Buildings*, 295, 113291. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113291>
- Massoud Amin, S., & Wollenberg, B. F. (2005). Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3, 34-41. doi:10.1109/MPAE.2005.1507024
- Modbus Organization, Inc. (2012). *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. Modbus Organization, Inc. Hopkinton, MA: Modbus Organization, Inc. Retrieved 04 05, 2026, from <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocolspecification.pdf>

- Pandharipande, A., & Caicedo, D. (2011). Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing. *Energy and Buildings*, 43, 944-950. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.018>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394-398. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Wetter, M., Zuo, W., Noudui, T. S., & Pang, X. (2014). Modelica Buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7, 253-270. doi:[10.1080/19401493.2013.765506](https://doi.org/10.1080/19401493.2013.765506)