

Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Ενδιαμέσου Επιπέδου Κανονικοποίησης για Έξυπνα Κτίρια: Ενσωμάτωση Πολλαπλών Πρωτοκόλλων και Προσεγγίση Σημασιολογικής Διαλειτουργι- κότητας

Κωνσταντίνος Γ. Σπανουδάκης

Μηχ. Παραγωγής και Διοίκησης και Μεταπτ. Φοι-
τητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

std169489@ac.eap.gr

Μαρία Φαββατά

Επίκουρη καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών και
Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

mfavvata2016@gmail.com

Περίληψη – Η εργασία σχεδιάζει και αποτιμά μια αρχιτεκτο-
νική ψηφιακού ενδιαμέσου επιπέδου κανονικοποίησης για έ-
ξυπνα κτίρια. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η ετε-
ρογένεια των συστημάτων πεδίου και των πρωτοκόλλων επι-
κοινωνίας, όπως τα BACnet, KNX, Modbus, MQTT και MP-
Bus, η οποία εμποδίζει την αξιοποίηση των παραγόμενων δε-
δομένων από εφαρμογές ανώτερου επιπέδου λόγω ασυνέπειας
δομής και απουσίας κοινής σημασιολογικής αναφοράς. Προ-
τείνεται τριεπίπεδη αρχιτεκτονική. Η πρώτη βαθμίδα ανα-
λαμβάνει τη διασύνδεση με τα συστήματα πεδίου μέσω χωρι-
στών συνιστωσών σύνδεσης ανά πρωτόκολλο. Η δεύτερη ε-
φαρμόζει συστηματική κανονικοποίηση, παράγοντας δομικά
ομοιογενείς εγγραφές με κοινό σχήμα μονάδων, τύπων, κλιμά-
κωσης και ποιότητας, ανεξάρτητα από την τεχνολογική προέ-
λευση των δεδομένων. Η τρίτη υλοποιεί σημασιολογικό ε-
μπλουτισμό μέσω αντιστοίχισης των κανονικοποιημένων ση-
μαίων σε οντότητες του Brick Schema, αποδίδοντας τύπο, χω-
ρική τοποθεσία και λειτουργικές σχέσεις. Η αρχιτεκτονική α-
ποτιμάται μέσω μελέτης περίπτωσης βασισμένης στο κτίριο
γραφείων Project NEO στο Βερολίνο, με υποθετικό σενάριο
εγκατάστασης και συνθετικά δεδομένα. Η αποτίμηση είναι α-
ναλυτική και επιδεικτική και αναδεικνύει ότι η αποτελεσμα-
τικότητα της χαρτογράφησης εξαρτάται σε καθοριστικό
βαθμό από συνεπείς συμβάσεις ονοματολογίας και τεκμηρίω-
σης της εγκατάστασης. Η εμπειρική επαλήθευση σε πραγμα-
τική εγκατάσταση παραμένει αντικείμενο μελλοντικής εργα-
σίας.

Λέξεις-Κλειδιά: έξυπνα κτίρια, κανονικοποίηση δεδομένων,
σημασιολογική διαλειτουργικότητα, Brick Schema, κτιρια-
κός αυτοματισμός

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύγχρονα έξυπνα κτίρια χαρακτηρίζονται από υ-
ψηλό βαθμό αυτοματισμού και από τη συνεχή συλλογή με-
γάλου όγκου λειτουργικών δεδομένων από ετερογενή υπο-
συστήματα, όπως η θέρμανση, ο αερισμός και κλιματισμός,
ο φωτισμός, η ενεργειακή παρακολούθηση και τα συστή-
ματα ασφαλείας και ελέγχου πρόσβασης. Τα δεδομένα
αυτά, που εκφράζονται ως αναλογικές τιμές, καταστάσεις,
συναγερμοί και συμβάντα, αποτελούν καταρχήν αξιόλογη
βάση για εφαρμογές ανώτερου επιπέδου, όπως η ενερ-
γειακή ανάλυση, η προγνωστική συντήρηση και η βελτι-

στοποίηση λειτουργίας (Malkawi, et al., 2023). Παρά τη
διαθεσιμότητά τους, η ουσιαστική αξιοποίησή τους παρα-
μένει στην πράξη περιορισμένη.

Η ρίζα του προβλήματος εντοπίζεται στην ετερογένεια
των εγκαταστάσεων, οι οποίες διαμορφώνονται προοδαι-
τικά μέσω διαδοχικών φάσεων υλοποίησης, επεκτάσεων
και αναβαθμίσεων (Domingues, Carreira, Vieira, &
Kastner, 2016). Στο ίδιο κτίριο συνυπάρχουν διαφορετικά
πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως τα BACnet, KNX,
Modbus, MP-Bus και MQTT, καθένα με διακριτό μοντέλο
δεδομένων, μηχανισμό διευθυνσιοδότησης και εσωτερική
δομή αναπαράστασης (Abdelwahed, Hefny, Hegazy, Said,
& Soltan, 2025). Κρίσιμο σημείο αποτελεί το γεγονός ότι
η τεχνική συμβατότητα σε επίπεδο μετάδοσης δεν συνεπά-
γεται εννοιολογική συνέπεια, καθώς δύο συστήματα μπο-
ρούν να επικοινωνούν επιτυχώς χωρίς τα δεδομένα τους να
είναι συγκρίσιμα ή κοινώς ερμηνεύσιμα. Επιπλέον, η κα-
νονικοποίηση σε επίπεδο μορφής και δομής δεν επαρκεί
από μόνη της, αφού παραμένει ανοιχτό το ζήτημα της ση-
μασιολογικής ερμηνείας κάθε μεταβλητής, του εξοπλισμού
που την παράγει και του χώρου που εξυπηρετεί.

Στη σχετική βιβλιογραφία η ενοποίηση επιχειρείται συ-
χνά μέσω λύσεων εξαρτώμενων από συγκεκριμένη πλατ-
φόρμα ή κατασκευαστή, οι οποίες περιορίζουν την οριζό-
ντια διαλειτουργικότητα και δυσχεραίνουν τη μεταφορά ε-
φαρμογών σε διαφορετική εγκατάσταση (Blechmann, et al.,
2023). Παράλληλα, καθιερωμένα σχήματα σημασιολογι-
κής μοντελοποίησης, όπως το Project Haystack και το
Brick Schema, προσφέρουν κοινή αναφορά για την από-
δοση νοήματος σε δεδομένα κτιρίων, χωρίς ωστόσο να α-
ντιμετωπίζουν αυτοτελώς το πρόβλημα της δομικής ενο-
ποίησης.

Σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η αποτί-
μηση μιας τεχνολογικά ανεξάρτητης αρχιτεκτονικής ψη-
φιακού ενδιαμέσου επιπέδου που συνδυάζει τη δομική κα-
νονικοποίηση των δεδομένων με τον σημασιολογικό ε-
μπλουτισμό τους μέσω του Brick Schema. Η συμβολή της
έγκειται στη διατύπωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου α-
ναφοράς που αποσυνδέει την ενσωμάτωση των πρωτοκόλ-
λων από τη λογική των εφαρμογών και στην ανάδειξη,

μέσω μελέτης περίπτωσης, των προϋποθέσεων υπό τις οποίες η προσέγγιση αυτή καθίσταται αποτελεσματική.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας συνίσταται στη σχεδίαση μιας αρχιτεκτονικής αναφοράς για το ενδιαμέσο επίπεδο κανονικοποίησης και στην αποτίμησή της μέσω μελέτης περίπτωσης. Η σχεδίαση καθοδηγείται από σαφείς απαιτήσεις που λειτουργούν ταυτόχρονα ως κριτήρια αξιολόγησης. Πρώτη απαίτηση είναι η τεχνολογική ανεξαρτησία, δηλαδή η ικανότητα λειτουργίας με οποιονδήποτε συνδυασμό πρωτοκόλλων πεδίου χωρίς αναδιαμόρφωση του πυρήνα. Δεύτερη είναι η επεκτασιμότητα, οριζόμενη ως δομική ιδιότητα που αποτιμάται από το εύρος των μεταβολών τις οποίες επιβάλλει κάθε επέκταση (Alfalouji, et al., 2022). Τρίτη είναι η πληρότητα της κανονικοποίησης, ώστε να καλύπτονται με ισοδύναμη δομική συνέπεια όλοι οι τύποι δεδομένων, δηλαδή αναλογικές τιμές, καταστάσεις, συναγερμοί και συμβάντα. Η αρχιτεκτονική οργανώνεται σε τρεις διακριτές βαθμίδες με σαφείς διεπαφές, σύμφωνα με την αρχή της αρχιτεκτονικής αποσύζευξης που επιτρέπει σε κάθε βαθμίδα να εξελίσσεται ανεξάρτητα.

Η πρώτη βαθμίδα αναλαμβάνει τη διασύνδεση των συστημάτων πεδίου μέσω εξειδικευμένων συνιστωσών σύνδεσης, μίας ανά πρωτόκολλο. Κάθε συνιστώσα αναλαμβάνει αποκλειστικά την επικοινωνία με το αντίστοιχο πρωτόκολλο και παραδίδει τα δεδομένα σε κοινή εσωτερική μορφή, ώστε οι ιδιαιτερότητες κάθε πρωτοκόλλου να μη διαπερνούν τα όρια του ενδιαμέσου επιπέδου. Με τον τρόπο αυτό, η ενσωμάτωση νέου πρωτοκόλλου περιορίζεται στην ανάπτυξη της αντίστοιχης συνιστώσας, χωρίς επίδραση στις υπόλοιπες βαθμίδες.

Η δεύτερη βαθμίδα αποτελεί τον πυρήνα κανονικοποίησης και εφαρμόζει τους κανόνες μετασχηματισμού που μετατρέπουν τα πρωτογενή δεδομένα σε δομικά ομοιογενείς εγγραφές κοινής λογικής αναπαράστασης. Επειδή οι συνιστώσες σύνδεσης παραδίδουν ήδη κοινή εσωτερική μορφή, ο πυρήνας εφαρμόζει τους ίδιους κανόνες σε κάθε εγγραφή ανεξάρτητα από την πηγή της, διασφαλίζοντας συνέπεια σε επίπεδο συνόλου δεδομένων. Οι κανόνες οργανώνονται ανά τύπο δεδομένων και καλύπτουν την κανονικοποίηση μονάδων, τύπων, κλιμάκωσης και ποιότητας, καθώς και την ενιαία απόδοση καταστάσεων, συναγερμών και συμβάντων.

Η τρίτη βαθμίδα υλοποιεί τον σημασιολογικό εμπλουτισμό, λαμβάνοντας ως είσοδο το κανονικοποιημένο σύνολο και αντιστοιχίζοντας κάθε σημείο μέτρησης σε οντότητες του Brick Schema (Balaji, et al., 2016). Η βαθμίδα αυτή αποδίδει σε κάθε σημείο τύπο, χωρική τοποθεσία και λειτουργικές σχέσεις εντός του μοντέλου του κτιρίου, χωρίς να τροποποιεί τιμές ή δομή. Οι κανονικοποιημένες τιμές και το σημασιολογικό μοντέλο αποθηκεύονται χωριστά και συνδέονται μέσω του αναγνωριστικού του σημείου κατά τον χρόνο εκτέλεσης των ερωτημάτων, ώστε το σχήμα να μπορεί να επεκταθεί ή να αντικατασταθεί χωρίς επίδραση στον πυρήνα.

Η αποτίμηση της αρχιτεκτονικής στηρίζεται σε μελέτη περίπτωσης βασισμένη στο κτίριο γραφείων Project NEO στο Βερολίνο. Ένα κτίριο υψηλών προδιαγραφών με στόχευση πιστοποιήσεων WELL και LEED που δικαιολογούν την ανάγκη ενοποιημένης συλλογής και σημασιολογικού εμπλουτισμού δεδομένων. Το σενάριο εγκατάστασης και τα δεδομένα είναι υποθετικά και διαμορφώθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας, με την εγκατάσταση οργανωμένη σε ε-

παναλαμβανόμενες ζώνες μίσθωσης ανά όροφο. Στο σύνολο αυτό εφαρμόζονται διαδοχικά οι τρεις βαθμίδες και τα αποτελέσματα αξιολογούνται ως προς τα κριτήρια σχεδίασης.

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η αρχιτεκτονική εφαρμόζεται στο σενάριο του Project NEO και τα αποτελέσματα αποτιμώνται σε τρία επίπεδα: τη δομική κάλυψη της χαρτογράφησης, την απόδειξη εννοίας σε δείγμα σημείων και τη συγκριτική αποτίμηση έναντι εναλλακτικών προσεγγίσεων.

Η δομική κάλυψη αποτιμάται ποσοτικά στις 1.107 συσκευές του τυπικού ορόφου, κατανεμημένες ανά πρωτόκολλο και μηχανισμό χαρτογράφησης (ΠΙΝΑΚΑΣ I).

ΠΙΝΑΚΑΣ I

ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΝΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ

Πρωτόκολλο	Συσκευές	Ποσοστό	Βαθμός αυτοματοποίησης
BACnet	15	1,4%	Υψηλός – Αυτόματη ανακάλυψη
KNX	630	56,9%	Ημιαυτόματος – Εξαρτημένος από συμβάσεις
Modbus RTU	130	11,7%	Μηδενικός – Χειροκίνητη αντιστοίχιση
MP-Bus	143	12,9%	Μηδενικός – Μέσω gateway
Analog	189	17,1%	Εκτός υφιστάμενης ανάλυσης

Η ανάλυση αναδεικνύει ότι η πλήρως αυτόματη χαρτογράφηση αφορά μόνο το 1,4% των συσκευών, ενώ το 56,9% εξαρτάται από συνεπείς συμβάσεις ονοματολογίας στο KNX, το 24,6% (Modbus RTU και MP-Bus) απαιτεί ρητή χειροκίνητη αντιστοίχιση καταχωρητών και το 17,1% βρίσκεται εκτός του υποστηριζόμενου περιβάλλοντος. Σε επίπεδο συσκευών, πάνω από το 98% απαιτεί χειροκίνητο ή εξαρτημένο από συμβάσεις χειρισμό. Το εύρημα δείχνει ότι η χειροκίνητη εργασία δεν εξαιλείφεται, ωστόσο συγκεντρώνεται στη συνιστώσα σύνδεσης, ανεξάρτητα από τον πυρήνα και τις εφαρμογές.

Για την απόδειξη εννοίας επιλέγεται δείγμα έξι σημείων από διαφορετικά πρωτόκολλα στον ίδιο χώρο, με συνθετικές τιμές. Μετά την κανονικοποίηση, όλα τα σημεία αποκτούν κοινή δομή εξόδου, ανεξάρτητα από την προέλευσή τους, και αντιστοιχίζονται σε οντότητες Brick με σύνταξη Turtle. Πάνω στο μοντέλο εκτελούνται τρία σημασιολογικά ερωτήματα που αξιοποιούν τις σχέσεις και όχι τα τεχνικά ονόματα. Το πλέον χαρακτηριστικό ερώτημα εντοπίζει, μέσω των σχέσεων hasLocation και feeds, τον εξοπλισμό VAV που εξυπηρετεί τον χώρο ενός αισθητήρα CO₂, χωρίς ρητή δήλωση σύνδεσης. Η έμμεση αυτή συσχέτιση αποτελεί την προστιθέμενη αξία της οντολογικής μοντελοποίησης έναντι της απλής ετικετοποίησης.

Τέλος, η προσέγγιση αποτιμάται συγκριτικά έναντι της σύνδεσης σημείο προς σημείο και της προσέγγισης μόνο με ετικετοποίηση. Η πρώτη υποχρεώνει κάθε εφαρμογή να ενσωματώνει τις τεχνικές λεπτομέρειες όλων των πρωτοκόλλων, ενώ η δεύτερη επιλύει τη δομική ομοιογένεια αλλά όχι την έμμεση συσχέτιση οντοτήτων. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υπερτερεί στη μετάβαση από τιμές σε σχέσεις, με κόστος τη χειροκίνητη αποτύπωση της τοπολογίας.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία ανέπτυξε και αποτίμησε μια αρχιτεκτονική ψηφιακού ενδιαμέσου επιπέδου κανονικοποίησης για έξυπνα κτίρια και κατέληξε σε τρία κεντρικά συμπεράσματα. Πρώτον, η αποσύζευξη του επιπέδου πεδίου από το επίπεδο εφαρμογών μέσω ενδιαμέσου επιπέδου αποτελεί αναγκαία αρχιτεκτονική συνθήκη για την αξιόπιστη και κλιμακούμενη αξιοποίηση κτιριακών δεδομένων, καθώς η άμεση διασύνδεση εφαρμογών με ετερογενή συστήματα πεδίου εισάγει εξαρτήσεις που περιορίζουν τη φορητότητα και αυξάνουν την πολυπλοκότητα. Δεύτερον, η κανονικοποίηση και η σημασιολογική διαλειτουργικότητα συνιστούν δύο διακριτά και αλληλοσυμπληρούμενα επίπεδα, όπου η δομική ομοιογένεια είναι αναγκαία αλλά ανεπαρκής από μόνη της, ενώ η αντιστοίχιση με το Brick Schema προσθέτει το λειτουργικό και χωρικό πλαίσιο που καθιστά τα δεδομένα αυτόματα ερμηνεύσιμα και επιτρέπει τη μετάβαση από μεμονωμένες τιμές σε σχέσεις μεταξύ οντοτήτων. Τρίτον, η αποτελεσματικότητα της αρχιτεκτονικής εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από τη συνέπεια της ονοματολογίας και της τεκμηρίωσης της εγκατάστασης, καθώς η αρχιτεκτονική δεν εξαλείφει τη χειροκίνητη εργασία αλλά τη συγκεντρώνει στη συνιστώσα σύνδεσης, και επομένως δεν μπορεί να εξεταστεί ανεξάρτητα από τις πρακτικές διαχείρισης τεκμηρίωσης κατά τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Τα συμπεράσματα διατυπώνονται εντός των ορίων της μεθόδου, η οποία στηρίχθηκε σε υποθετικό αλλά ρεαλιστικό σενάριο και σε συνθετικό δείγμα δεδομένων, και συνιστά αναλυτική και επιδεικτική αποτίμηση των ιδιοτήτων της αρχιτεκτονικής, χωρίς να επεκτείνεται σε εμπειρική επαλήθευση σε συνθήκες λειτουργίας. Ως προς τις μελλοντικές κατευθύνσεις, αναδεικνύονται τρεις. Η πρώτη αφορά την επαλήθευση σε πραγματική εγκατάσταση με δεδομένα πεδίου και μετρήσιμους δείκτες κάλυψης ανά τύπο δεδομένων. Η δεύτερη αφορά την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων μηχανισμών χαρτογράφησης που αξιοποιούν τεχνικές επεξεργασίας φυσικής γλώσσας για την εξαγωγή σημασιολογικής πληροφορίας από τα ονόματα των σημείων, μειώνοντας την εξάρτηση από χειροκίνητη παραμετροποίηση. Η τρίτη αφορά την επέκταση της αρχιτεκτονικής ώστε να υποστηρίζει δυναμική ενημέρωση του σημασιολογικού μοντέλου κατά τη λειτουργία, χωρίς διακοπή της ροής δεδομένων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 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
- 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
- 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
- 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

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