



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας
Συστήματα Κινητού και Διάχυτου Υπολογισμού MSc

Διπλωματική Εργασία

Σχεδίαση και Υλοποίηση Κυβερνοφυσικού Συστήματος για
Έξυπνο Σπίτι.

Αναστάσιος Παναγιώτης Παναγιωτόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Σκλάβος

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας /δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο/η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Σχεδίαση και Υλοποίηση Κυβερνοφυσικού Συστήματος για
Έξυπνο Σπίτι.

Αναστάσιος Παναγιώτης Παναγιωτόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Νικόλαος Σκλάβος

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Αχιλλέας Καμέας

Καθηγητής Ελληνικού Ανοικτού
Πανεπιστημίου

Πάτρα, Μάιος 2026

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Σκλάβο, για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε, σε όλη την πορεία της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ξεχωριστά την σύζυγό μου Γιάννα, που ήταν διαρκώς πλάι μου, ακλόνητη στις δυσκολίες στηρίζοντας έμπρακτα τις επιλογές μου, και, δίνοντάς μου δύναμη να συνεχίζω.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός κυβερνοφυσικού συστήματος ενεργειακής διαχείρισης για τον κλιματισμό σε οικιακό περιβάλλον, με στόχο τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και τη διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης για τα άτομα που κατοικούν στο χώρο. Το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει φυσικά στοιχεία, όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές, με υπολογιστικές και δικτυακές υποδομές, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση και τον έξυπνο έλεγχο των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC).

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύσσεται μια αρχιτεκτονική κυβερνοφυσικού συστήματος βασισμένη σε τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), η οποία συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και παρουσίας, καθώς και πληροφορίες σχετικές με τη λειτουργία του συστήματος κλιματισμού. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό τη λήψη αυτοματοποιημένων αποφάσεων ελέγχου, όπως η ρύθμιση της θερμοκρασίας στόχου, η προσαρμογή των κύκλων λειτουργίας και η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του κλιματισμού με βάση την παρουσία ατόμων που κατοικούν στην οικία.

Η υλοποίηση περιλαμβάνει τόσο το υλικό όσο και το λογισμικό του συστήματος, με έμφαση στη διασύνδεση, την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα. Παράλληλα, αναπτύσσεται διεπαφή χρήστη που επιτρέπει την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της κατανάλωσης ενέργειας και της κατάστασης λειτουργίας του συστήματος, καθώς και τη χειροκίνητη παρέμβαση όπου απαιτείται.

Τέλος, η απόδοση του συστήματος αξιολογείται μέσω πειραματικών δοκιμών σε προσομοιωμένο οικιακό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη συμβολή των κυβερνοφυσικών συστημάτων στη βιώσιμη και αποδοτική διαχείριση του κλιματισμού σε σύγχρονα οικιακά περιβάλλοντα.

Λέξεις – Κλειδιά

Έξυπνο σπίτι, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Κυβερνοφυσικό σύστημα, αισθητήρες, HVAC, ESP32

Design and Implementation of a Cyber-physical System for a Smart Home.

Anastasios Panagiotis Panagiotopoulos

Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of a cyber-physical system for energy management of air conditioning in a residential environment, aiming to optimize energy consumption and maintain thermal comfort conditions for the occupants. The proposed system combines physical elements, such as sensors and actuators, with computational and network infrastructures, enabling continuous monitoring and intelligent control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems.

Within the framework of this thesis, a cyber-physical system architecture based on Internet of Things (IoT) technologies is developed. This architecture collects data from temperature, humidity, and occupancy sensors, as well as information related to the operation of the air conditioning system. This data is processed in real-time to make automated control decisions, such as adjusting the target temperature, adapting operational cycles, and activating or deactivating the air conditioning based on user presence.

The implementation encompasses both the hardware and software of the system, with an emphasis on interfacing, reliability, and scalability. Simultaneously, a user interface is developed that allows monitoring of temperature, energy consumption, and the system's operational status, as well as manual intervention where required.

Finally, the system's performance is evaluated through experimental tests in a simulated residential environment. The results highlight the contribution of cyber-physical systems to the sustainable and efficient management of air conditioning in modern residential settings.

Keywords

Smart Home, Internet of Things, Cyber-physical system, Sensors, HVAC, ESP32.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Λέξεις – Κλειδιά	v
Abstract	vi
Keywords	vi
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός	1
1.2 Η σημερινή κατάσταση στον Τομέα.....	1
1.3 Μεθοδολογία - Δομή.....	2
1.4 Ερευνητικό Κενό και Συνεισφορά της Εργασίας.....	2
1.5 Δομή της εργασίας	3
1.6 Συμβολή.....	4
1.7 Συσχέτιση της εργασίας με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ.....	4
2 Θεωρία	5
2.1 Έξυπνα σπίτια και IoT.....	5
2.2 Συστήματα HVAC.....	5
2.3 Κυβερνοφυσικά συστήματα (CPS)	5
2.4 CPS σε έξυπνες κατοικίες και ενεργειακή διαχείριση.....	5
3 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT): Επισκόπηση, Τεχνολογίες και Προκλήσεις.....	7
3.1 Εισαγωγή στο IoT.....	7
3.2 Ορισμός και ρόλος.....	8
3.3 Αρχιτεκτονική και Βασικά Συστατικά	8
3.4 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας IoT.....	12
3.4.1 Πρωτόκολλα Εφαρμογών (Application Protocols).....	12
3.5 Εφαρμογές του IoT.....	12
3.6 Τρέχουσα Κατάσταση Έρευνας και Προκλήσεις.....	13
3.7 Συμπεράσματα.....	13
4 Κυβερνοφυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems – CPS).....	14
4.1 Εισαγωγή.....	14
4.2 Ορισμός και χαρακτηριστικά	14
4.3 Αρχιτεκτονική των CPS	15
4.4 Συσχετισμός με IoT	16
4.5 Εφαρμογές των CPS.....	17
4.6 Πλεονεκτήματα και Οφέλη	17
4.7 Προκλήσεις και Περιορισμοί	18
4.8 Κύριες Κατευθύνσεις Έρευνας.....	18
4.9 Συμπεράσματα.....	18
5 Έξυπνο Σπίτι (Smart Home)	19
5.1 Εισαγωγή.....	19
5.2 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά	19

5.3	Ιστορική Εξέλιξη και Σύγχρονα Πλαίσια Έρευνας.....	20
5.4	Τεχνολογική Αρχιτεκτονική Smart Homes	20
5.5	Λειτουργίες και Υπηρεσίες Smart Homes.....	22
5.6	Οφέλη από την Υιοθέτηση Smart Homes	22
5.7	Προκλήσεις και Περιορισμοί	22
5.8	Τρέχουσες Τάσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	23
5.9	Συμπεράσματα.....	23
6	Συστήματα Θέρμανσης, Εξαερισμού και Κλιματισμού (HVAC).....	24
6.1	Εισαγωγή	24
6.2	Βασικές Αρχές και Συστατικά.....	24
6.3	Τύποι HVAC Συστημάτων.....	25
6.4	Ενεργειακή Απόδοση και Βιωσιμότητα	25
6.5	Έλεγχος HVAC	26
6.6	Αισθητήρες και Πληροφοριακά Συστήματα	26
6.7	Η Σχέση HVAC με Smart Homes	27
6.8	Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις.....	27
6.9	Συμπεράσματα.....	27
7	Συγκριτική Αξιολόγηση Πλατφορμών Ενσωματωμένων Συστημάτων για Υλοποίηση CPS-HVAC	29
7.1	Εισαγωγή	29
7.2	Κριτήρια Επιλογής Πλατφόρμας.....	29
7.3	Arduino Uno	30
7.4	ESP32	31
7.5	Raspberry Pi	32
7.6	Συγκριτική Ανάλυση και Τεκμηρίωση Τελικής Επιλογής.....	33
7.7	Συμπεράσματα.....	33
8	Υλοποίηση και Περιγραφή του Αναπτυγμένου Κυβερνοφυσικού Συστήματος Διαχείρισης HVAC	35
8.1	Εισαγωγή	35
8.2	Γενική αρχιτεκτονική	35
8.2.1	Μικροελεγκτής ESP32.....	36
8.2.2	Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας (DHT22)	37
8.2.3	Αισθητήρας ποιότητας αέρα (MQ-135).....	37
8.2.4	Αισθητήρας παρουσίας (PIR)	37
8.2.5	Οθόνη OLED	38
8.2.6	Πλήκτρο ελέγχου	38
8.2.7	Breadboard και διασυνδέσεις.....	38
8.3	Συνοπτική λειτουργία της διάταξης	38
8.4	Θερμικό μοντέλο του χώρου	39
8.5	Λειτουργία Comfort και Eco	40
8.6	Απόφαση λειτουργίας του HVAC.....	41
8.7	Λειτουργία αερισμού.....	41
8.8	Αποστολή δεδομένων στο ThingsBoard	41
8.9	Απεικόνιση δεδομένων στην OLED	42
9	Πειραματική αξιολόγηση συστήματος.....	43
9.1	Εισαγωγή	43

9.2	Στόχοι της πειραματικής αξιολόγησης	43
9.3	Μεθοδολογία δοκιμών.....	44
9.4	Πειραματικά σενάρια	44
9.4.1	Σενάριο 1: Μετάβαση λειτουργίας HVAC βάσει παρουσίας χρήστη	44
9.4.2	Σενάριο 2: Ανίχνευση υποβάθμισης ποιότητας αέρα και ενεργοποίηση αερισμού.....	47
9.4.3	Σενάριο 3: Πείραμα παρακολούθησης σημείου αναφοράς (Tracking Experiment).....	49
10	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	55
10.1	Συμπεράσματα	55
10.2	Μελλοντική εργασία	55
11	Βιβλιογραφία.....	57
	Παράρτημα Α: «Κώδικας προσομοίωσης».....	61
	Παράρτημα Β: «dataset πειραματικών αξιολογήσεων».....	72

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά συστήματα	7
Εικόνα 2 Μοντέλο IoT 3-επιπέδων	10
Εικόνα 3 Μοντέλο IoT 5-επιπέδων	10
Εικόνα 4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας του IoT	11
Εικόνα 5 Μοντέλο CPS 4-επιπέδων	16
Εικόνα 6 Έξυπνο σπίτι	19
Εικόνα 7 Αρχιτεκτονική έξυπνου σπιτιού 3-επιπέδων	21
Εικόνα 8 HVAC Σύστημα.....	24
Εικόνα 9 Arduino Uno	30
Εικόνα 10 ESP32	31
Εικόνα 11 Raspberry Pi.....	32
Εικόνα 12, Κυβερνοφυσικό σύστημα διαχείρισης κλιματισμού	36
Εικόνα 13, Άποψη του dashboard	42
Εικόνα 14, 1 ^ο Screenshot Dashboard για το πρώτο πείραμα.....	45
Εικόνα 15, 2 ^ο Screenshot Dashboard για το πρώτο πείραμα.....	46
Εικόνα 16, 3 ^ο Screenshot Dashboard για το πρώτο πείραμα.....	47
Εικόνα 17, 1 ^ο Screenshot Dashboard για το δεύτερο πείραμα.....	48
Εικόνα 18, 2 ^ο Screenshot Dashboard για το δεύτερο πείραμα.....	49
Εικόνα 19, 1 ^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα	51
Εικόνα 20, 2 ^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα	51
Εικόνα 21, 3 ^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα	52
Εικόνα 22, 4 ^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα	52

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας IoT	12
Πίνακας 2 Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά CPS	15
Πίνακας 3 Σύγκριση CPS – IoT – Embedded Systems	17
Πίνακας 4 Είδη αισθητήρων HVAC συστημάτων.....	26
Πίνακας 5 Σύγκριση μικροελεγκτών	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 6, πειράματα	44

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ακολουθούν κάποια παραδείγματα:

ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
IoT	Internet of Things
CPS	Cyber-physical system
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
WSN	Wireless Sensor Networks
NSF	National Science Foundation

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η αξιολόγηση ενός κυβερνοφυσικού συστήματος ενεργειακής διαχείρισης για τον κλιματισμό σε οικιακό περιβάλλον. Το σύστημα στοχεύει στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC), διατηρώντας παράλληλα αποδεκτά επίπεδα θερμικής άνεσης για τους/τις ενοίκους. Μέσω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων και αλγορίθμων έξυπνου ελέγχου, επιδιώκεται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου κυβερνοφυσικού πλαισίου που γεφυρώνει τον φυσικό και τον ψηφιακό χώρο του οικιακού περιβάλλοντος.

1.2 Η σημερινή κατάσταση στον Τομέα

Τα τελευταία χρόνια, η ενσωμάτωση Κυβερνοφυσικών Συστημάτων (CPS) στα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη, κυρίως λόγω της ραγδαίας εξέλιξης του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), των τεχνολογιών αισθητήρων και της υπολογιστικής ισχύος χαμηλού κόστους. Η σύγχρονη έρευνα και πρακτική εφαρμογή επικεντρώνεται στη μετάβαση από συμβατικά, στατικά συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας σε ευφυή, δυναμικά και προσαρμοστικά συστήματα διαχείρισης κλιματισμού.

Σε επίπεδο τεχνικής ωριμότητας, η αγορά διαθέτει ήδη «έξυπνους» θερμοστάτες και συστήματα απομακρυσμένου ελέγχου μέσω κινητών συσκευών, τα οποία επιτρέπουν βασικό προγραμματισμό και παρακολούθηση κατανάλωσης. Ωστόσο, πολλά από τα εμπορικά συστήματα λειτουργούν κυρίως με απλούς κανόνες (rule-based control) και περιορισμένη αξιοποίηση δεδομένων πραγματικού χρόνου ή προβλεπτικών μοντέλων.

Παράλληλα, σε ερευνητικό επίπεδο, παρατηρείται έντονη δραστηριότητα στην ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου, όπως μοντέλα πρόβλεψης βασισμένα σε μηχανική μάθηση, προσαρμοστικοί ελεγκτές και τεχνικές βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων, που λαμβάνουν υπόψη τόσο την ενεργειακή κατανάλωση όσο και τη θερμική άνεση. Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνολογιών edge και cloud computing επιτρέπει πιο σύνθετη επεξεργασία δεδομένων και καλύτερη κλιμάκωση των συστημάτων.

Παρά την πρόοδο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, όπως η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών, η ασφάλεια και προστασία δεδομένων, η ακρίβεια των αισθητήρων και

η ανάγκη αξιόπιστης λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, η περαιτέρω ανάπτυξη ολοκληρωμένων CPS για HVAC αποτελεί ενεργό πεδίο έρευνας, με σημαντικές προοπτικές βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας στον οικιακό τομέα.

1.3 Μεθοδολογία - Δομή

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία βασίζεται σε μια συνδυαστική προσέγγιση θεωρητικής μελέτης, σχεδιασμού συστήματος, υλοποίησης και πειραματικής αξιολόγησης. Αρχικά, πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση στους τομείς των IoT, των Κυβερνοφυσικών Συστημάτων, των έξυπνων κατοικιών και των συστημάτων ελέγχου HVAC, με στόχο την κατανόηση των σύγχρονων τεχνολογικών τάσεων και την καταγραφή υφιστάμενων μεθόδων ενεργειακής διαχείρισης.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του προτεινόμενου κυβερνοφυσικού συστήματος, σύμφωνα με τη λογική πολυεπίπεδης δομής (επίπεδο αισθητήρων, επικοινωνίας, επεξεργασίας και διεπαφής ατόμου που χρησιμοποιεί το σύστημα). Καθορίζονται τα απαιτούμενα υλικά και λογισμικά στοιχεία, όπως αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, μονάδα επεξεργασίας, πρωτόκολλα επικοινωνίας και αλγόριθμος ελέγχου του κλιματισμού.

Ακολουθεί η φάση υλοποίησης, η οποία περιλαμβάνει την εγκατάσταση και διασύνδεση των αισθητήρων, την ανάπτυξη του λογισμικού συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την ενσωμάτωση μηχανισμού λήψης αποφάσεων για τη ρύθμιση του συστήματος HVAC. Παράλληλα, αναπτύσσεται διεπαφή ατόμου που χρησιμοποιεί το σύστημα για την παρακολούθηση της λειτουργίας και της ενεργειακής κατανάλωσης.

Τέλος, πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση του συστήματος σε προσομοιωμένο οικιακό περιβάλλον. Συλλέγονται δεδομένα θερμοκρασίας και χρόνου λειτουργίας και κατανάλωσης ενέργειας. Τα αποτελέσματα αναλύονται με στόχο την αποτίμηση της ενεργειακής εξοικονόμησης και της διατήρησης θερμικής άνεσης.

Η παραπάνω μεθοδολογική προσέγγιση διασφαλίζει τη συστηματική ανάπτυξη και αντικειμενική αξιολόγηση του κυβερνοφυσικού συστήματος.

1.4 Ερευνητικό Κενό και Συνεισφορά της Εργασίας

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στον τομέα των έξυπνων κατοικιών και των συστημάτων ελέγχου HVAC, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμοί στη λειτουργικότητα και στην αποδοτικότητα των υφιστάμενων λύσεων. Πολλά εμπορικά συστήματα βασίζονται σε

απλούς θερμοστάτες ή προκαθορισμένους κανόνες λειτουργίας, χωρίς ουσιαστική αξιοποίηση δεδομένων πραγματικού χρόνου, δυναμικής προσαρμογής στις συνθήκες περιβάλλοντος ή ολοκληρωμένης κυβερνοφυσικής αρχιτεκτονικής.

Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις, τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης εστιάζουν αποκλειστικά στη μείωση κατανάλωσης, χωρίς να λαμβάνουν επαρκώς υπόψη τη θερμική άνεση των ατόμων που κατοικούν στον χώρο ή τη συμπεριφορά παρουσίας τους στον χώρο. Παράλληλα, παρατηρείται έλλειψη ενοποιημένων πλαισίων που να συνδυάζουν αισθητήρες, αλγορίθμους ελέγχου, ανάλυση δεδομένων και διεπαφή χρήστη σε ένα ολοκληρωμένο κυβερνοφυσικό σύστημα, ειδικά σε επίπεδο οικιακής κλίμακας.

Το ερευνητικό κενό που επιχειρεί να καλύψει η παρούσα εργασία αφορά τη σχεδίαση και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου κυβερνοφυσικού συστήματος για τον έλεγχο κλιματισμού, το οποίο ενσωματώνει συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων και αξιολόγηση ενεργειακής απόδοσης με παράλληλη διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης.

Η βασική συνεισφορά της εργασίας έγκειται:

- στην ανάπτυξη μιας σαφώς ορισμένης πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής CPS για οικιακό HVAC,
- στην υλοποίηση και πειραματική αξιολόγηση ενός λειτουργικού πρωτοτύπου,
- στη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή έξυπνου ελέγχου, και
- στη συστηματική τεκμηρίωση της σχέσης μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και θερμικής άνεσης.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης σε οικιακά περιβάλλοντα και ενισχύει την πρακτική εφαρμογή των Κυβερνοφυσικών Συστημάτων στον τομέα των έξυπνων κατοικιών.

1.5 Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του IoT. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των κυβερνοφυσικών συστημάτων. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του έξυπνου σπιτιού. Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται ανασκόπηση των συστημάτων HVAC. Στο Κεφάλαιο 7 μια συγκριτική αξιολόγηση των πλατφορμών

ενσωματωμένων συστημάτων που κρίνονται κατάλληλες για την υλοποίηση CPS-HVAC. Στο κεφάλαιο 8 γίνεται η υλοποίηση και η περιγραφή του αναπτυγμένου κυβερνοφυσικού συστήματος. Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση μέσω διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας. Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας. Τέλος στο Κεφάλαιο 11 παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία.

1.6 Συμβολή

Η κύρια συμβολή της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πρωτότυπου κυβερνοφυσικού συστήματος για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός συστήματος HVAC σε περιβάλλον έξυπνου κτιρίου. Το σύστημα συνδυάζει αισθητήρες περιβάλλοντος, μικροελεγκτή ESP32 και πλατφόρμα Internet of Things για την απομακρυσμένη εποπτεία και τον έλεγχο της λειτουργίας του κλιματισμού. Επιπλέον, υλοποιείται ένα απλό θερμικό μοντέλο RC για την προσομοίωση της θερμικής δυναμικής του χώρου και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος μέσω πειραματικών σεναρίων και τα συμπεράσματα αυτών.

1.7 Συσχέτιση της εργασίας με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σχετίζεται άμεσα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development Goals – SDGs) του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών και ειδικότερα με τον Στόχο 7 «Φθηνή και Καθαρή Ενέργεια» (Affordable and Clean Energy), τον Στόχο 11 «Βιώσιμες Πόλεις και Κοινότητες» (Sustainable Cities and Communities) και τον Στόχο 13 «Δράση για το Κλίμα» (Climate Action).

Η σύνδεση με τον Στόχο 7 προκύπτει από την προσπάθεια βελτιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης των συστημάτων HVAC μέσω της αξιοποίησης τεχνολογιών Internet of Things (IoT), αισθητήρων και αυτοματοποιημένων μηχανισμών ελέγχου. Το προτεινόμενο κυβερνοφυσικό σύστημα στοχεύει στη μείωση της άσκοπης κατανάλωσης ενέργειας και στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας σε οικιακό περιβάλλον.

Παράλληλα, η εργασία συνδέεται με τον Στόχο 11, καθώς πραγματεύεται τεχνολογίες έξυπνων κατοικιών (Smart Homes), οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία περισσότερο βιώσιμων, αποδοτικών και τεχνολογικά εξελιγμένων οικιακών και αστικών περιβαλλόντων.

Τέλος, η εργασία σχετίζεται και με τον Στόχο 13, δεδομένου ότι η εξοικονόμηση ενέργειας και η αποδοτικότερη λειτουργία των συστημάτων κλιματισμού μπορούν να συμβάλουν έμμεσα στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

2 Θεωρία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τα κυβερνοφυσικά συστήματα, τα συστήματα HVAC και τις τεχνολογίες έξυπνων κατοικιών, τα οποία αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη του προτεινόμενου συστήματος.

2.1 Έξυπνα σπίτια και IoT

Σε ένα συνεχώς εξελισσόμενο τοπίο αστικοποίησης η σχέση μεταξύ της τεχνολογίας και του αυτοματισμού σε σχέση με την βιωσιμότητα κατέχει τεράστια σημασία, [1]. Σε αυτό το πλαίσιο το Έξυπνο Σπίτι είναι μια πολύ σημαντική περιοχή περίπτωσης χρήσης του Διαδικτύου των πραγμάτων και οι τεχνολογίες που το αφορούν συνεχώς επεκτείνονται, [2].

2.2 Συστήματα HVAC

Τα σύγχρονα συστήματα Κλιματισμού και Εξαερισμού (HVAC, Heating, Ventilation, and Air Conditioning), αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων κτηρίων και είναι σχεδιασμένα να παρέχουν άνετα και ευχάριστα εντός οικίας κλιματικά περιβάλλοντα ενώ ταυτόχρονα κάνουν οικονομία και περιορίζουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, [3]. Με την πρόοδο της τεχνολογίας τα συστήματα αυτά πλαισιώθηκαν από ένα σύνολο αισθητήρων (παρουσίας, θερμοκρασίας, υγρασίας) και από συστήματα ελεγχόμενα από υπολογιστές επιτρέποντας τον έλεγχο των κλιματικών παραμέτρων και της διαχείρισης ενέργειας, [3].

2.3 Κυβερνοφυσικά συστήματα (CPS)

Τα κυβερνοφυσικά συστήματα (Cyber-physical Systems – CPS) αποτελούν έναν από τους πλέον δυναμικά αναπτυσσόμενους τομείς της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας, καθώς ενσωματώνουν στενά τον φυσικό κόσμο με τον ψηφιακό μέσω αισθητήρων, ενοργωποιητών, υπολογιστικών μονάδων και δικτύων επικοινωνίας, [4]. Η σύζευξη αυτή επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση, τον αυτόματο έλεγχο και τη βελτιστοποίηση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας τα CPS θεμελιώδη για εφαρμογές όπως οι έξυπνες πόλεις, η βιομηχανία 4.0, η υγεία και οι μεταφορές, [4].

2.4 CPS σε έξυπνες κατοικίες και ενεργειακή διαχείριση

Στο πλαίσιο των έξυπνων κατοικιών (Smart Homes), τα CPS διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς επιτρέπουν την αυτοματοποίηση και τον ευφυή έλεγχο βασικών οικιακών λειτουργιών, όπως ο φωτισμός, η ασφάλεια, η διαχείριση ενέργειας και ο κλιματισμός. Μέσω της αξιοποίησης τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), οι έξυπνες κατοικίες μετατρέπονται σε δυναμικά,

προσαρμοστικά περιβάλλοντα, τα οποία μπορούν να ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τις προτιμήσεις των ατόμων που κατοικούν σε αυτά.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η εφαρμογή CPS στον τομέα της ενεργειακής διαχείρισης, δεδομένου ότι ο οικιακός τομέας αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Τα έξυπνα συστήματα κλιματισμού, που βασίζονται σε κυβερνοφυσικές αρχές, μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, χωρίς να υποβαθμίζουν την ποιότητα ζωής των προσώπων που κατοικούν στον χώρο.

Συνεπώς, η ανάπτυξη και μελέτη κυβερνοφυσικών συστημάτων για έξυπνες κατοικίες δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική πρόκληση, αλλά και σημαντική συνεισφορά προς τη βιώσιμη ανάπτυξη, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη μετάβαση σε πιο «έξυπνα» και φιλικά προς το περιβάλλον οικιακά περιβάλλοντα.

3 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT): Επισκόπηση, Τεχνολογίες και Προκλήσεις

3.1 Εισαγωγή στο IoT

Το Internet of Things (IoT) αποτελεί ένα από τα βασικά τεχνολογικά παραδείγματα της σύγχρονης ψηφιακής επανάστασης, μεταμορφώνοντας τον τρόπο με τον οποίο τα φυσικά αντικείμενα συνδέονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με τον ψηφιακό κόσμο. Ο όρος πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τον Kevin Ashton το 1999 για να περιγράψει τη σύνδεση αισθητήρων RFID σε αντικείμενα έτσι ώστε να μπορούν να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω δικτύων, χωρίς άμεση ανθρώπινη παρέμβαση.

Πρόκειται για μια διάταξη διασυνδεδεμένων υπολογιστικών συσκευών, μηχανικών και ψηφιακών μηχανών, αισθητήρων, μικροελεγκτών και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών οι οποίες είναι μοναδικά αναγνωρίσιμες και οι οποίες μπορούν να επικοινωνούν μέσω του Internet μεταξύ τους δίχως να απαιτούν την διάδραση ανθρώπων ή υπολογιστών, [5].

Η βασική ιδέα του IoT είναι να μετατραπούν απλά καθημερινά αντικείμενα — από αισθητήρες θερμοκρασίας έως οικιακές συσκευές — σε «έξυπνες» διασυνδεδεμένες μονάδες, οι οποίες μπορούν:

- να μετράνε φυσικά φαινόμενα,
- να μεταδίδουν δεδομένα,
- και να πραγματοποιούν ενέργειες ανάλογα με αυτές τις μετρήσεις, [7].

Οι συνεχείς εξελίξεις αναφορικά με τα την τεχνολογία των Ενσωματωμένων Κυκλωμάτων (Integrated Circuits) οδήγησε στην ανάπτυξη των Μίκρο-ηλεκτρο-μηχανικών-συστημάτων (MEMS – Micro Electro Mechanical Systems). Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται οι μικροαισθητήρες, οι μικροενεργοποιητές, τα μικροηλεκτρονικά και άλλες μικροκατασκευές με πολύ μικρό μέγεθος Εικόνα 1.



Εικόνα 1 Μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά συστήματα

Ακολούθως σκοπός ήταν η ασύρματη διασύνδεση των MEMS που μπορούσαν να αισθανθούν και έτσι αναδύθηκε η έννοια των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN – Wireless Sensor Networks). Τα ασύρματα δίκτυα

αισθητήρων αποτελούνται από MEMS οι οποίες αποκαλούνται κόμβοι αίσθησης οι οποίοι παρά το μικρό μέγεθος τους έχουν αυξημένες δυνατότητες. Συγκεκριμένα οι κόμβοι όχι μόνο μπορούν να παρακολουθούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες μεγάλων περιοχών ενδιαφέροντος αλλά μπορούν να επεξεργάζονται και να αποστέλλουν δεδομένα κάνοντας τους έτσι κατάλληλους να υποστηρίξουν ατελείωτο εύρος εφαρμογών.

3.2 Ορισμός και ρόλος

Η διασύνδεση των κόμβων οδήγησε στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων με το οποίο μπορούμε να διαχειριστούμε και να διαμορφώσουμε όλα τα πράγματα (συσκευές), [6], και είναι πλέον ευκολότερη από ποτέ η επικοινωνία μεταξύ χρηστών και εφαρμογών, [5], όπως είναι τα κυβερνοφυσικά συστήματα (CPS) τα οποία διασυνδέουν τον φυσικό χώρο και τον κυβερνοχώρο χρησιμοποιώντας τις τηλεπικοινωνίες, [6]. Η εφαρμογή του διαδικτύου των πραγμάτων στον τομέα των συστημάτων του Σπιτιού οδήγησε στην ανάπτυξη του λεγόμενου τομέα του Έξυπνου Σπιτιού, [6].

Το IoT μπορεί να οριστεί ως ένα παράδειγμα συστημάτων δικτύου που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη σύνδεση και επικοινωνία μεταξύ φυσικών αντικειμένων μέσω του διαδικτύου. Κάθε συσκευή διαθέτει:

- αισθητήρες/ενεργοποιητές,
- υπολογιστική ισχύ,
- και υποστήριξη πρωτοκόλλων δικτύου (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, NB-IoT κ.ά.) .

Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στα «πράγματα» να συλλέγουν και να διαβιβάζουν δεδομένα, τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν σε cloud ή edge συστήματα για να υποστηρίξουν:

- αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο,
- αυτοματοποίηση διαδικασιών,
- και βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης σε πολλαπλούς τομείς όπως η υγεία, η ενέργεια, και οι έξυπνες πόλεις, [8].

3.3 Αρχιτεκτονική και Βασικά Συστατικά

Η αρχιτεκτονική του IoT συνήθως περιλαμβάνει πολλαπλά επίπεδα λειτουργίας, με βασικά από αυτά να είναι:

- Επίπεδο αισθητήρων (Device/Sensing layer): Περιλαμβάνει φυσικές συσκευές και αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον.
- Επίπεδο επικοινωνίας (Communication/Network layer): Εξασφαλίζει τη μεταφορά των δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων όπως Wi-Fi, LoRa, NB-IoT, Bluetooth Low Energy (BLE) ή ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής (LPWAN) .
- Επίπεδο επεξεργασίας (Edge/Cloud computing): Τα δεδομένα που συλλέγονται μεταφέρονται για επεξεργασία είτε σε cloud πλατφόρμες είτε σε edge συστήματα για ανάλυση και λήψη αποφάσεων.
- Επίπεδο εφαρμογής (Application layer): Συνδέει το σύστημα με τους τελικούς χρήστες ή λειτουργίες — για παράδειγμα εφαρμογές smartphone που παρουσιάζουν πληροφορίες ή επιτρέπουν τον έλεγχο συσκευών.

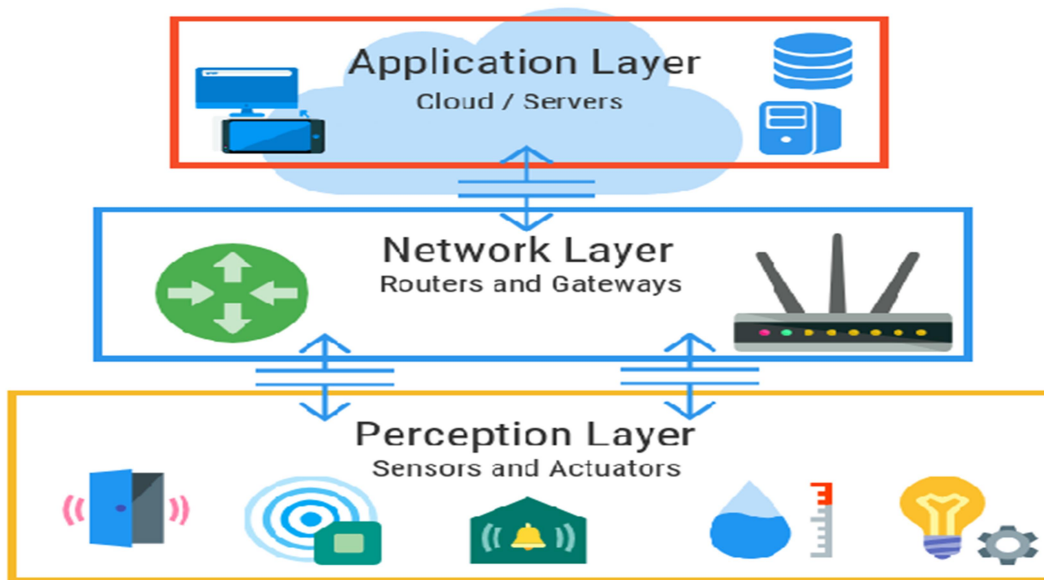
Η διαφοροποίηση μεταξύ των επιπέδων αυτών υποστηρίζει την διαλειτουργικότητα, επεκτασιμότητα και ευελιξία ενός IoT συστήματος στην πράξη, [7].

Η αρχιτεκτονική του IoT μπορεί να αναλυθεί μέσα από διαφορετικά μοντέλα επιπέδων, με πιο συνηθισμένα τα 3-Layer και 5-Layer models, καθώς και πιο σύγχρονες προσεγγίσεις που ενσωματώνουν edge και cloud υπολογισμό.

Το μοντέλο 3 επιπέδων, Εικόνα 2 περιλαμβάνει:

- Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer)
 - Αισθητήρες και ενεργοποιητές
 - Συλλογή φυσικών δεδομένων
 - Μετατροπή φυσικών μεγεθών σε ψηφιακά σήματα
- Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)
 - Μεταφορά δεδομένων

- Wi-Fi, Zigbee, LoRa, Bluetooth, 4G/5G
- Δρομολόγηση και διαχείριση επικοινωνίας

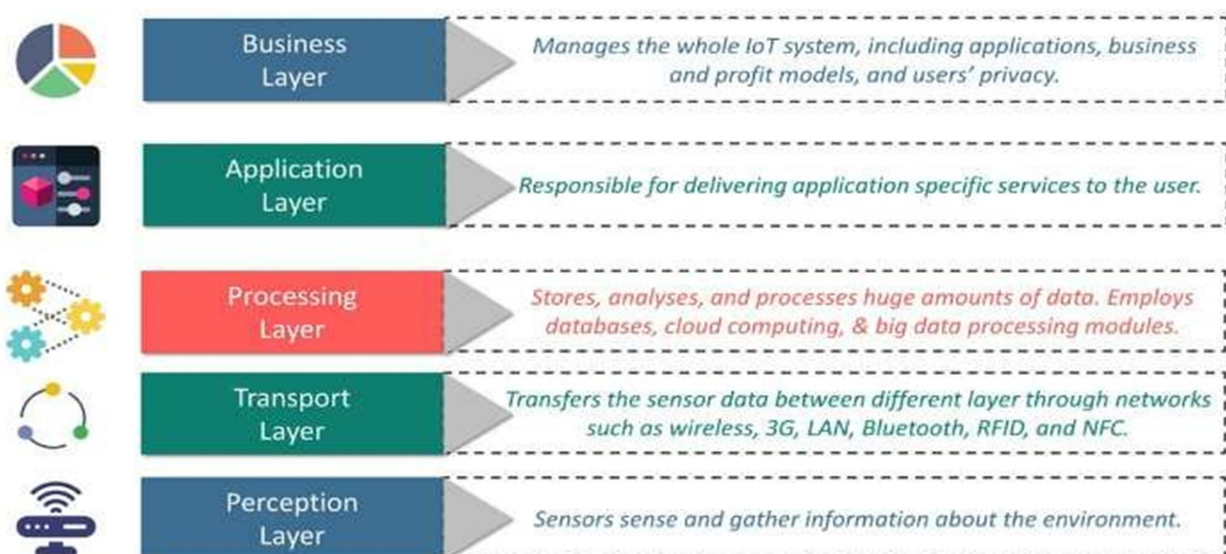


Εικόνα 2 Μοντέλο IoT 3-επιπέδων

- Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer)
 - Υπηρεσίες προς τον χρήστη
 - Smart Home εφαρμογές
 - Διαχείριση ενέργειας, ασφάλεια, HVAC

Το μοντέλο αυτό είναι απλό και κατάλληλο για βασικές εφαρμογές IoT, [9].

Το μοντέλο 5 επιπέδων Εικόνα 3, προσθέτει μεγαλύτερη λειτουργική σαφήνεια:



Εικόνα 3 Μοντέλο IoT 5-επιπέδων

- Το επίπεδο αντίληψης, Perception Layer – Αισθητήρες
- Το επίπεδο μεταφοράς, Transport Layer – Μεταφορά δεδομένων
- Το επίπεδο επεξεργασίας, Processing Layer (Middleware) – Αποθήκευση, Cloud, Analytics
- Το επίπεδο εφαρμογής, Application Layer – Εφαρμογές
- Και το επιχειρηματικό επίπεδο, Business Layer – Διαχείριση, πολιτικές, ανάλυση KPI

Αυτό το μοντέλο είναι πιο κατάλληλο για μεγάλης κλίμακας ή σύνθετα κυβερνοφυσικά συστήματα, [7].

Με την εξάπλωση του IoT πολλές εταιρείες ανέπτυξαν αισθητήρες, ενεργοποιητές και συστήματα ελέγχου τα οποία είναι συμβατά με το IoT. Η ανάγκη διασύνδεσης των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τεχνολογιών επικοινωνίας, με τεχνολογίες όπως το BACnet, το Dupline, το Ethernet και το KNX να είναι οι πρώτες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο περιβάλλον της έξυπνης κατοικίας. Νεότερες τεχνολογίες είναι το Bluetooth, το Wi-Fi, το ZigBee και το Z-Wave. Αναπτύχθηκαν και τεχνολογίες οι οποίες πρόσφεραν επιπλέον δυνατότητες και καινοτόμα χαρακτηριστικά όπως είναι το LowPan, το EnOcean, το Insteon, το mioty και το Thread. Τεχνολογίες σαν το LoRa, το mioty, το Sigfox, το LTE (5G) και το NB-IoT χρησιμοποιούνται επίσης αλλά έχουν τον προσανατολισμό κάλυψης μεγαλύτερων αποστάσεων, Εικόνα 4.



Εικόνα 4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας του IoT

3.4 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας ΙοΤ

Πρωτόκολλο	Κατανάλωση Ενέργειας	Εμβέλεια	Ρυθμός Δεδομένων	Καταλληλότητα
Wi-Fi	Υψηλή	Μεσαία	Υψηλός	Smart Home
Bluetooth Low Energy (BLE)	Πολύ χαμηλή	Μικρή	Χαμηλός	Φορητές συσκευές
Zigbee	Χαμηλή	Μεσαία	Χαμηλός	Αισθητήρες
LoRaWAN	Πολύ χαμηλή	Πολύ μεγάλη	Πολύ χαμηλός	Smart City
NB-IoT	Χαμηλή	Μεγάλη	Χαμηλός	Βιομηχανικές εφαρμογές

Πίνακας 1 Σύγκριση Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας ΙοΤ

3.4.1 Πρωτόκολλα Εφαρμογών (Application Protocols)

- MQTT, [10]
 - Ελαφρύ
 - Publish/Subscribe
 - Ιδανικό για CPS & HVAC
- CoAP, [10]
 - Βασισμένο σε UDP
 - Χαμηλή καθυστέρηση
- HTTP/REST, [10]
 - Ευρεία χρήση
 - Υψηλότερο overhead

3.5 Εφαρμογές του ΙοΤ

Το ΙοΤ έχει ήδη διεισδύσει σε πολλούς τομείς, [11]:

- Έξυπνες κατοικίες (Smart Homes): Αυτοματισμός φωτισμού, κλιματισμού, ασφάλειας και ενεργειακής διαχείρισης, βελτιώνοντας άνεση και απόδοση .
- Βιομηχανικό ΙοΤ (IIoT): Παρακολούθηση εξοπλισμού, predictive maintenance και αυτοματοποίηση γραμμών παραγωγής .
- Υγεία: Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών και φορητές ιατρικές συσκευές.
- Έξυπνες πόλεις: Διαχείριση κυκλοφορίας, ενέργειας, αποβλήτων και ασφάλειας .

- Το IoT επίσης ενισχύει τη βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και βιωσιμότητας.

3.6 Τρέχουσα Κατάσταση Έρευνας και Προκλήσεις

Παρότι το IoT έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο, η έρευνα συνεχίζεται εντατικά για να αντιμετωπιστούν σημαντικές προκλήσεις όπως:

- Διαλειτουργικότητα και τυποποίηση: Παρόλο που υπάρχουν προσπάθειες για ενοποίηση προτύπων, δεν υπάρχει μία καθολικά αποδεκτή αρχιτεκτονική ή πρωτόκολλο που να υποστηρίζει πλήρως όλες τις εφαρμογές IoT, [7].
- Ασφάλεια και ιδιωτικότητα: Η αύξηση συσκευών σημαίνει και αύξηση διαδρομών επίθεσης. Οι περιορισμένοι πόροι συσκευών IoT, σε συνδυασμό με την ποικιλία πρωτοκόλλων, καθιστούν την ασφάλεια περίπλοκη πρόκληση, [7].
- Κλιμάκωση & Αποδοτικότητα: Ο όγκος δεδομένων και οι απαιτήσεις για μικρή καθυστέρηση μεγαλώνουν συνεχώς, ειδικά με εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως έξυπνες ενεργειακές λύσεις και συστήματα αυτοματισμού, [12].

Παρά τις προκλήσεις, οι αναλύσεις δείχνουν ότι το IoT παραμένει ένας από τους πλέον ενεργούς ερευνητικούς και εφαρμοσμένους τομείς, με προβλεπόμενη εξαιρετικά υψηλή ανάπτυξη και επενδύσεις παγκοσμίως τα επόμενα χρόνια, [12]

3.7 Συμπεράσματα

Το IoT αναπτύσσεται ραγδαία και αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο πολλών σύγχρονων εφαρμογών και συστημάτων, όπως τα έξυπνα σπίτια, τα οποία αργότερα μπορούν να ενσωματώσουν CPS για πιο εξελιγμένο έλεγχο και αυτοματοποίηση. Η ολοκληρωμένη κατανόηση της αρχιτεκτονικής, των τεχνολογιών και των προκλήσεων του IoT αποτελεί προϋπόθεση για την επιτυχή σχεδίαση και υλοποίηση σύνθετων CPS εφαρμογών.

4 Κυβερνοφυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems – CPS)

4.1 Εισαγωγή

Τα Κυβερνοφυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems – CPS) αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στη σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία, ενοποιώντας στενά φυσικές διεργασίες με υπολογιστικά και δικτυακά υποσυστήματα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ενσωματωμένα συστήματα, τα CPS δεν περιορίζονται στον απλό έλεγχο υλικού μέσω λογισμικού, αλλά επιδιώκουν μια βαθύτερη συγκλίνουσα ολοκλήρωση μεταξύ του φυσικού κόσμου και του ψηφιακού ελέγχου. Αυτή η ολοκλήρωση επιτρέπει στα CPS να αντιλαμβάνονται, να επεξεργάζονται και να αντιδρούν σε περιβαλλοντικές αλλαγές σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας τόσο την αυτοματοποίηση όσο και την απόδοση των συστημάτων που τα υλοποιούν, [14], [15].

Το ενδιαφέρον για τα CPS έχει αυξηθεί ριζικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, με σημαντική υποστήριξη από φορείς όπως η National Science Foundation (NSF), που έχουν αναγνωρίσει τα CPS ως μία από τις βασικές μελλοντικές ερευνητικές προτεραιότητες με τεράστιο επιστημονικό και τεχνολογικό αντίκτυπο, [14].

4.2 Ορισμός και χαρακτηριστικά

Ένα CPS μπορεί να οριστεί ως ένα σύστημα στο οποίο οι υπολογιστικές μονάδες και οι φυσικές διεργασίες βρίσκονται στενά ενσωματωμένες, επιτρέποντας σε υπολογιστικά στοιχεία να επηρεάζουν φυσικές διεργασίες και το αντίστροφο με συνεχή ανάδραση, [14].

Τα βασικά χαρακτηριστικά των CPS περιλαμβάνουν:

Σύνδεση φυσικού και ψηφιακού κόσμου: Οι αισθητήρες ανιχνεύουν φυσικά δεδομένα, τα οποία υποβάλλονται σε επεξεργασία από λογισμικό, το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί αποφάσεις που επιστρέφονται στο φυσικό επίπεδο, [14], [15].

Πραγματικός χρόνος και δυναμική αλληλεπίδραση: Η συμπεριφορά συχνά πρέπει να αξιολογείται και να ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο, [14].

Διαλειτουργικότητα: τα CPS αποτελούνται από πολλά υποσυστήματα και ενσωματώνουν συχνά διαφορετικές τεχνολογίες δικτύωσης, αισθητήρων, και ελεγκτικών μονάδων, [16].

Κλίμακα και πολυπλοκότητα: Πολλά CPS είναι μεγάλης κλίμακας, κατανεμημένα και διαχειρίζονται τεράστια ποσά δεδομένων, [16].

Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά CPS	
Τεχνολογία	Ρόλος σε CPS
Αισθητήρες IoT	Συλλογή φυσικών δεδομένων
Edge Computing	Τοπική επεξεργασία χαμηλής καθυστέρησης
Cloud Computing	Ανάλυση μεγάλης κλίμακας
AI / Machine Learning	Προγνωστικός έλεγχος
5G / WiFi 6	Χαμηλή καθυστέρηση
Real-Time OS	Χρονικός συγχρονισμός

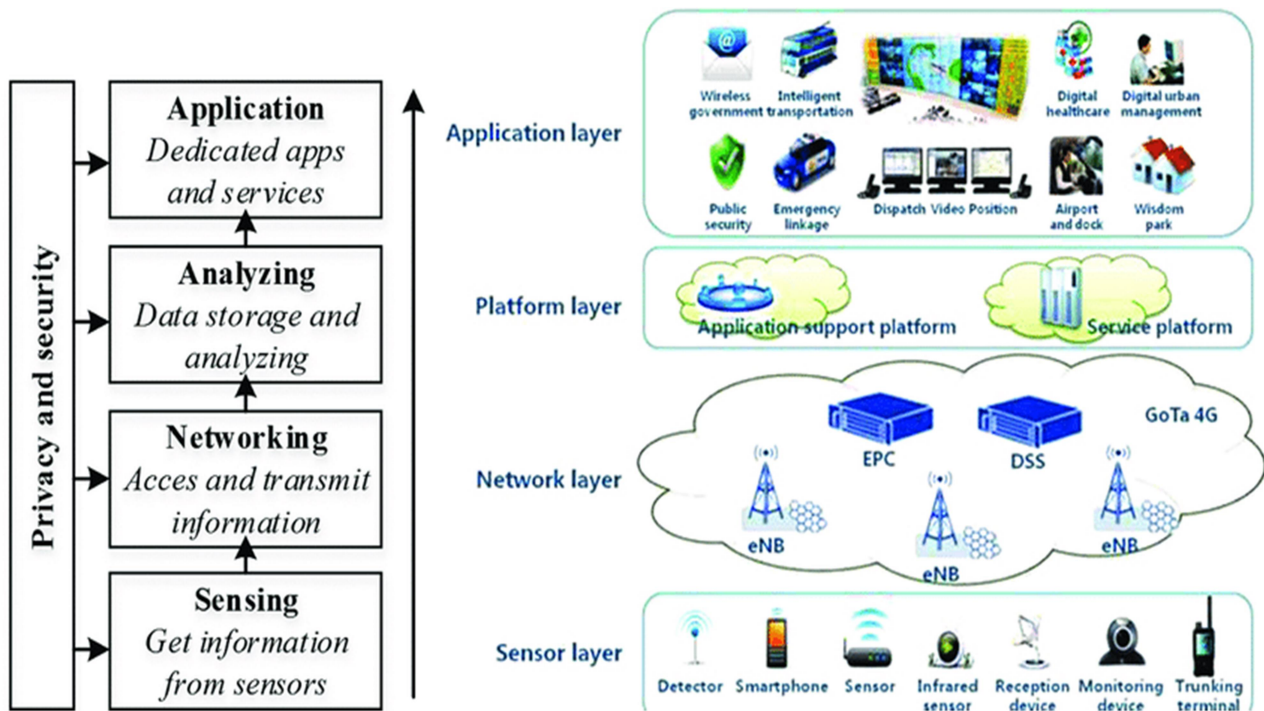
Πίνακας 2 Τεχνολογικά Χαρακτηριστικά CPS

4.3 Αρχιτεκτονική των CPS

Ένα CPS χαρακτηρίζεται από μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που επιτρέπει την ενσωμάτωση αισθητήρων, επικοινωνίας, επεξεργασίας και ελέγχου. Συχνά η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει:

- Επίπεδο Αντίληψης: Περιλαμβάνει αισθητήρες και ενεργοποιητές που συλλέγουν φυσικά δεδομένα και επηρεάζουν το φυσικό περιβάλλον, [18].
- Επίπεδο Επικοινωνίας: Μεταφέρει δεδομένα μεταξύ συσκευών και υπολογιστικών μονάδων μέσω δικτύων, τα οποία μπορεί να είναι ενσύρματα ή ασύρματα, [19].
- Επίπεδο Επεξεργασίας και Ελέγχου: Περιλαμβάνει υπολογιστικές μονάδες που αναλύουν δεδομένα, λαμβάνουν αποφάσεις και στέλνουν εντολές ελέγχου, [19].
- Επίπεδο Εφαρμογής: Παρέχει λειτουργίες και υπηρεσίες προς χρήστες ή άλλα συστήματα, [19].

Αυτή η δομή επιτρέπει στο CPS να λειτουργεί ως ενιαίο σύστημα με συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού επιπέδου.



Εικόνα 5 Μοντέλο CPS 4-επιπέδων

Η αρχιτεκτονική ενός CPS οργανώνεται συνήθως σε τέσσερα βασικά επίπεδα:

- Physical Layer: Περιλαμβάνει αισθητήρες και ενεργοποιητές.
- Network Layer: Υλοποιεί την επικοινωνία δεδομένων.
- Cyber Layer: Περιλαμβάνει επεξεργασία, ανάλυση και έλεγχο.
- Application Layer: Παρέχει διεπαφή χρήστη και υπηρεσίες.

Η βασική ιδιαιτερότητα των CPS είναι ο κλειστός βρόχος ανάδρασης (closed-loop feedback) μεταξύ φυσικού και ψηφιακού κόσμου.

4.4 Συσχετισμός με IoT

Το CPS και το Internet of Things (IoT) είναι στενά συνδεδεμένα, αλλά δεν είναι ταυτόσημα. Το IoT παρέχει τη συνδεσιμότητα και τις βασικές τεχνολογίες αισθητήρων και επικοινωνίας, αλλά τα CPS πηγαίνουν ένα βήμα παραπέρα, ενσωματώνοντας πραγματικό χρονικό έλεγχο και ενεργές αλληλεπιδράσεις μεταξύ υπολογιστικών και φυσικών συστημάτων, [19], [20].

Ωστόσο, πολλά σύγχρονα CPS χρησιμοποιούν τεχνολογίες IoT για να υλοποιήσουν την επικοινωνία και τη συλλογή δεδομένων, καθιστώντας το IoT ένα υποσύστημα ζωτικής σημασίας, [20].

Σύγκριση CPS – IoT – Embedded Systems			
Χαρακτηριστικό	Embedded Systems	IoT	CPS
Σύνδεση στο διαδίκτυο	Όχι απαραίτητα	Ναι	Συχνά
Πραγματικός χρόνος	Περιορισμένος	Όχι πάντα	Κρίσιμος
Κλειστός βρόχος ελέγχου	Ναι	Όχι απαραίτητα	Ναι
Φυσική αλληλεπίδραση	Ναι	Μερικώς	Βαθιά ενσωματωμένη
Πολυπλοκότητα	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή
Ανάλυση δεδομένων	Περιορισμένη	Cloud-based	Edge + Control-centric

Πίνακας 3 Σύγκριση CPS – IoT – Embedded Systems

4.5 Εφαρμογές των CPS

Τα CPS βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς:

- Βιομηχανία 4.0. Τα CPS αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της Βιομηχανίας 4.0, ενσωματώνοντας αυτοματοποίηση, αισθητήρες και ευφυή έλεγχο σε γραμμές παραγωγής και συστήματα logistics, [17].
- Ενεργειακά Συστήματα. Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που ενσωματώνουν CPS — γνωστά και ως Cyber-Physical Energy Systems — επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο δικτύων, πρόβλεψη ζήτησης και διαχείριση φόρτου, [18].
- Αυτοκινητοβιομηχανία και Μεταφορές. Αυτόνομα οχήματα, συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας και έξυπνοι δρόμοι βασίζονται σε CPS για ασφαλή και αποδοτική λειτουργία, [21].
- Υγεία και Ρομποτική. Τα ιατρικά CPS περιλαμβάνουν ρομποτική χειρουργική, φορητές συσκευές παρακολούθησης και ολοκληρωμένα συστήματα φροντίδας ασθενών, [18].
- Κτίρια και Έξυπνες Πόλεις. Συστήματα ελέγχου HVAC, ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων και υποδομές έξυπνων πόλεων χρησιμοποιούν CPS για αποδοτικότερη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα ζωής, [19].

4.6 Πλεονεκτήματα και Οφέλη

Τα CPS προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως:

- Αυξημένη αυτοματοποίηση και αποδοτικότητα
- Βελτιωμένη εμπειρία χρήστη
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο

- Ενσωμάτωση με συστήματα ανάλυσης και AI για πρόβλεψη και βελτιστοποίηση, [16].

4.7 Προκλήσεις και Περιορισμοί

Παρά τα οφέλη, τα CPS αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις:

- Ασφάλεια και Ανθεκτικότητα. Τα CPS είναι ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις καθώς ενσωματώνουν πολλές διεπαφές και δίκτυα, [16].
- Πολυπλοκότητα και Διαλειτουργικότητα. Η ανάπτυξη προτύπων για CPS είναι δύσκολη λόγω της ποικιλίας συσκευών, πρωτοκόλλων και εφαρμογών, [16].
- Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Πραγματικός Χρόνος. Η διαχείριση καθυστερήσεων και η ακριβής συγχρονισμός είναι κρίσιμα ζητήματα για συστήματα που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, [16].

4.8 Κύριες Κατευθύνσεις Έρευνας

Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται σε:

- Ανθεκτικότητα και ασφάλεια CPS, με έμφαση σε frameworks για αντιμετώπιση απειλών και ανίχνευση επιθέσεων, [22].
- Σύνδεση με 5G και μελλοντικά δίκτυα για χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή απόδοση, [16].
- Μοντελοποίηση και ανάλυση αρχιτεκτονικών CPS για καλύτερη κατανόηση αλληλεπιδράσεων, [23].

4.9 Συμπεράσματα

Τα κυβερνοφυσικά συστήματα αποτελούν ένα διαρκώς αναπτυσσόμενο πεδίο, που διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη σύγχρονη τεχνολογία. Η ικανότητά τους να συνδέουν φυσικά και ψηφιακά υποσυστήματα σε πραγματικό χρόνο τα καθιστά απαραίτητα για εφαρμογές σε πολλούς τομείς, από την παραγωγή μέχρι την υγεία και τις έξυπνες πόλεις. Παρά τις προκλήσεις, η πρόοδος στην έρευνα και τεχνολογία υποδεικνύει ότι τα CPS θα συνεχίσουν να αποτελούν πρωταρχικό παράγοντα καινοτομίας.

5 Έξυπνο Σπίτι (Smart Home)

5.1 Εισαγωγή

Ο όρος Έξυπνο Σπίτι (Smart Home), Εικόνα 6, περιγράφει ένα οικιακό περιβάλλον στο οποίο διάφορες οικιακές συσκευές, αισθητήρες, υποσυστήματα και υπηρεσίες είναι διασυνδεδεμένα με σκοπό τη συλλογή δεδομένων, τον αυτοματοποιημένο έλεγχο λειτουργιών, την απομακρυσμένη διαχείριση και την εξατομικευμένη εμπειρία των ατόμων που τα χρησιμοποιούν. Τα smart homes αποτελούν ειδική κατηγορία εφαρμογών του Internet of Things (IoT), αξιοποιώντας τεχνολογίες αισθητήρων, δικτύωσης, επεξεργασίας δεδομένων, αυτοματισμού και διαδραστικών διεπαφών χρήστη με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, της άνεσης, της ασφάλειας και της ενεργειακής αποδοτικότητας των κατοικιών.



Εικόνα 6 Έξυπνο σπίτι

Παράλληλα το πεδίο συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον στην ακαδημαϊκή έρευνα, με βιβλιογραφικές εργασίες να αναλύουν τόσο τεχνολογικές όσο και κοινωνικές πτυχές της υιοθέτησης smart home συστημάτων, [24].

5.2 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά

Ένα έξυπνο σπίτι είναι μια κατοικία εξοπλισμένη με τεχνολογίες που επιτρέπουν:

- Παρακολούθηση και Έλεγχος: απομακρυσμένη διαχείριση συσκευών και εγκαταστάσεων όπως φωτισμός, θέρμανση, κλιματισμός, κουζίνα, κλειδαριές και ασφάλεια μέσω εφαρμογών ή φωνητικών βοηθών, [25].
- Αυτοματισμούς: λειτουργίες που ενεργοποιούνται βάσει κανόνων ή συνθηκών (π.χ. ενεργοποίηση φωτισμού όταν ανιχνεύεται κίνηση), [25].
- Ενεργειακή Διαχείριση: συστήματα που παρακολουθούν την κατανάλωση και προσαρμόζουν λειτουργίες για εξοικονόμηση ενέργειας, [25].
- Εξατομίκευση: προσωποποιημένες ρυθμίσεις που προσαρμόζονται στις συνήθειες των κατοίκων, συχνά μέσω τεχνητής νοημοσύνης, [25].

Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν καταστήσει τα smart homes ένα ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα τεχνολογίας με ποικίλες εφαρμογές που ξεπερνούν τον απλό αυτοματισμό («προχειροποίηση») και απαιτούν διαλειτουργία, ασφάλεια δικτύου, διαχείριση δεδομένων και ευφυΐα συστήματος, [25].

5.3 Ιστορική Εξέλιξη και Σύγχρονα Πλαίσια Έρευνας

Η εξέλιξη των smart homes συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη του IoT και των φθηνών ασύρματων αισθητήρων. Τα πρώιμα συστήματα βασίζονταν σε ενσύρματα δίκτυα και απλούς αυτοματισμούς, ενώ η εισαγωγή δικτύων όπως Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee και Z-Wave επέτρεψε ευρύτερη κάλυψη και ασύρματη συνδεσιμότητα. Η πρόσφατη βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η υιοθέτηση τεχνολογιών IoT έχει μετασηματίσει τα smart homes από απλά συστήματα ελέγχου σε περιβάλλοντα που μπορούν να «μαθαίνουν» και να προσαρμόζονται με βάση τη συμπεριφορά των χρηστών, [25].

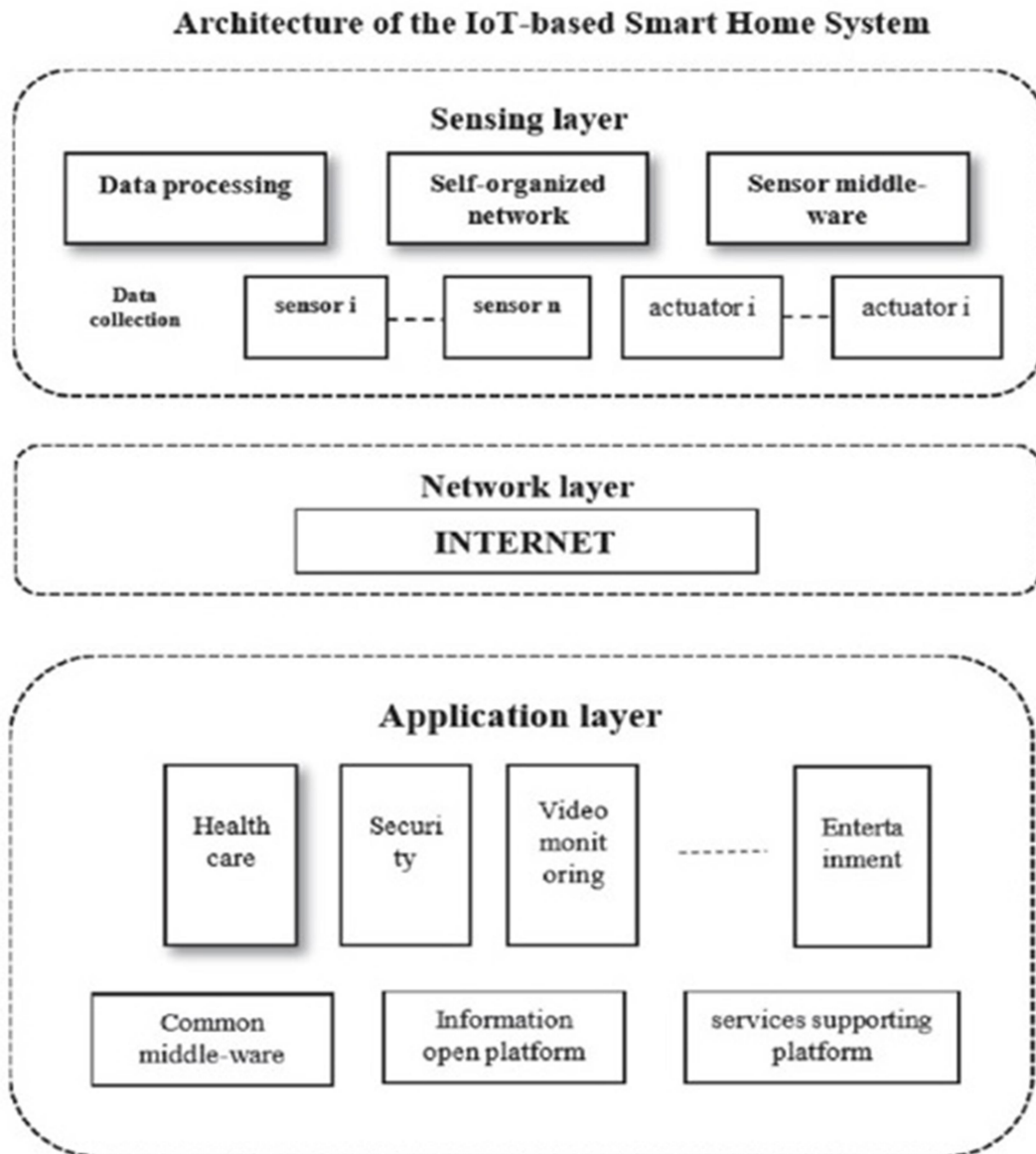
Μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι η έρευνα για smart homes έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, με περισσότερες από 399 επιστημονικές δημοσιεύσεις που καλύπτουν θέματα από αρχιτεκτονική συστημάτων μέχρι κοινωνικές επιπτώσεις και προκλήσεις υιοθέτησης, [25].

5.4 Τεχνολογική Αρχιτεκτονική Smart Homes

Η τυπική αρχιτεκτονική ενός smart home βασίζεται σε τρία επίπεδα, Εικόνα 7:

- Επίπεδο Συσκευών και Αισθητήρων. Αποτελείται από αισθητήρες (π.χ. θερμοκρασίας, παρουσίας, φωτισμού) και ενεργοποιητές (π.χ. smart plugs, actuators) που συλλέγουν και εκτελούν εντολές. Η επιλογή των αισθητήρων επηρεάζει τη δυνατότητα παρακολούθησης και αυτοματοποίησης των λειτουργιών, [24].

- Επίπεδο Δικτύου και Επικοινωνίας. Η διασύνδεση συσκευών με κεντρικό ελεγκτή ή hub πραγματοποιείται μέσω πρωτοκόλλων όπως Wi-Fi, Zigbee και Z-Wave. Η επιλογή των πρωτοκόλλων επηρεάζει την εμβέλεια, την κατανάλωση ενέργειας και τη διαλειτουργία συσκευών, [24].
- Επίπεδο Ελέγχου και Υπηρεσιών. Σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνονται λογισμικό διαχείρισης, cloud υπηρεσίες, εφαρμογές για κινητά και συχνά μονάδες τεχνητής



Εικόνα 7 Αρχιτεκτονική έξυπνου σπιτιού 3-επιπέδων

νοημοσύνης για ανάλυση συμπεριφοράς και προτάσεις αυτοματοποίησης, [24].

5.5 Λειτουργίες και Υπηρεσίες Smart Homes

Οι βασικές λειτουργίες που υποστηρίζονται από συστήματα smart homes περιλαμβάνουν:

- Ασφάλεια και Παρακολούθηση: έξυπνες κάμερες, αισθητήρες ανοιχτών θυρών/παραθύρων, συναγερμοί.
- Έλεγχος Περιβάλλοντος: ρύθμιση θερμοκρασίας, φωτισμού και ποιότητας αέρα.
- Αυτοματισμοί Καθημερινών Δραστηριοτήτων: όπως αυτόματη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση συσκευών.
- Απομακρυσμένη Διαχείριση: χρήση έξυπνων εφαρμογών για έλεγχο από απόσταση.

Ο συνδυασμός αυτών των λειτουργιών οδηγεί σε βελτιωμένη άνεση, ασφάλεια και ενεργειακή απόδοση, ενώ ανοίγει δρόμο για πιο προηγμένες υπηρεσίες όπως η ανάλυση συμπεριφοράς χρηστών και η «προγνωστική» αυτοματοποίηση, [26].

5.6 Οφέλη από την Υιοθέτηση Smart Homes

Η ακαδημαϊκή έρευνα αναγνωρίζει πολλαπλά οφέλη από τα έξυπνα σπίτια. Σύμφωνα με ανασκοπήσεις, τα smart homes:

- Βελτιώνουν την ποιότητα ζωής μέσω αυτοματισμών που υποστηρίζουν καθημερινές δραστηριότητες, [27].
- Ενισχύουν την ενεργειακή αποδοτικότητα με συστήματα που ρυθμίζουν αυτόματα λειτουργίες με βάση χρήση και ανάγκες, [27].
- Προωθούν την ασφάλεια με έξυπνους συναγερμούς και παρακολούθηση, [27].
- Υποστηρίζουν κοινωνικούς στόχους, όπως την ανεξάρτητη διαβίωση ηλικιωμένων ατόμων ή ατόμων με ειδικές ανάγκες, [27].

5.7 Προκλήσεις και Περιορισμοί

Παρά τα οφέλη, η υλοποίηση smart homes αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις:

- Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα. Η σύνδεση συσκευών στο διαδίκτυο αυξάνει τις πιθανότητες παραβιάσεων δεδομένων και μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης, όπως επισημαίνουν σύγχρονες μελέτες που ερευνούν τις ψηφιακές απειλές σε smart home περιβάλλοντα, [28].
- Διαλειτουργικότητα και Τυποποίηση. Η ύπαρξη πολλών διαφορετικών πρωτοκόλλων και προτύπων δυσχεραίνει τη σωστή λειτουργία και συμβατότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών εταιριών κατασκευής, [28].

- Αποδοχή Χρηστών/-τών. Η υιοθέτηση τεχνολογιών smart home εξαρτάται από την αντίληψη των ατόμων που τις χρησιμοποιούν για την ασφάλεια, την ευκολία χρήσης και τις πραγματικές ανάγκες μειωμένης κατανάλωσης και άνεσης, [28].

5.8 Τρέχουσες Τάσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα smart homes εξελίσσονται γρήγορα προς πιο ευφυή, προσαρμοστικά και μάλλον «προγνωστικά» συστήματα. Οι τάσεις περιλαμβάνουν:

- Τεχνητή Νοημοσύνη και Μάθηση Συμπεριφοράς: για προσωποποιημένη αυτοματοποίηση και βελτιστοποίηση λειτουργιών, [25].
- Edge Computing: για ταχύτερη επεξεργασία δεδομένων τοπικά και καλύτερη απόκριση σε πραγματικό χρόνο, [25].
- Προηγμένα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας και Διαλειτουργικότητας: που στοχεύουν στη μείωση πολυπλοκότητας και αύξηση ασφάλειας, [25].
- Εστίαση στη βιωσιμότητα: με ενσωματωμένες λύσεις ενεργειακής διαχείρισης και ανανεώσιμων πηγών, [25].

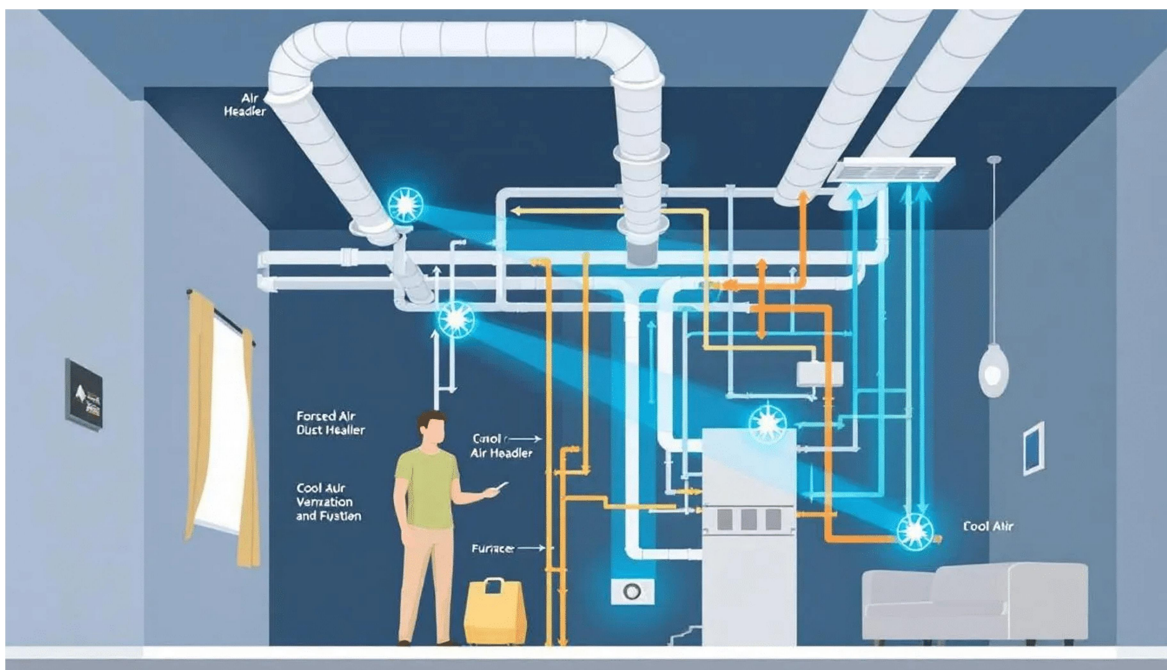
5.9 Συμπεράσματα

Το έξυπνο σπίτι αντιπροσωπεύει μια σημαντική τεχνολογική εξέλιξη στον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε και αλληλεπιδρούμε με τον οικιακό μας χώρο. Μέσω της σύγκλισης τεχνολογιών IoT, αισθητήρων, επικοινωνιών και αυτοματισμών, τα smart homes προσφέρουν βελτιώσεις στην άνεση, ενεργειακή απόδοση, ασφάλεια και ποιότητα ζωής. Παρά τις προκλήσεις που παραμένουν σε θέματα ασφάλειας, διαλειτουργικότητας και αποδοχής από τους χρήστες, η ενεργή έρευνα και ανάπτυξη στον χώρο δείχνει ότι το μέλλον των έξυπνων κατοικιών θα είναι ολοένα πιο εξελιγμένο, προσαρμοστικό και στενά συνδεδεμένο με ευρύτερα συστήματα CPS και βιομηχανίας 4.0.

6 Συστήματα Θέρμανσης, Εξαερισμού και Κλιματισμού (HVAC)

6.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), Εικόνα 8, αποτελούν βασικό στοιχείο σχεδιασμού και λειτουργίας κάθε σύγχρονου κτιριακού περιβάλλοντος, εξασφαλίζοντας άνετες και υγιεινές συνθήκες διαβίωσης ή εργασίας μέσω της ρύθμισης θερμοκρασίας, υγρασίας και ποιότητας αέρα. Η σημασία των HVAC συστημάτων είναι αυξανόμενη όχι μόνο λόγω της άνεσης που προσφέρουν, αλλά και επειδή αντιπροσωπεύουν ένα από τα μεγαλύτερα τμήματα της ενεργειακής κατανάλωσης στα κτίρια (μέχρι και 40–60% σε ορισμένες περιπτώσεις) [29][30]. Αναδεικνύονται επομένως ισχυρές ανάγκες για βελτιστοποίηση, αποδοτικότερη λειτουργία και ενσωμάτωση έξυπνων τεχνολογιών.



Εικόνα 8 HVAC Σύστημα

6.2 Βασικές Αρχές και Συστατικά

Τα HVAC συστήματα συνδυάζουν τρεις βασικές λειτουργίες:

- Θέρμανση (Heating). Στόχος είναι η αύξηση της θερμοκρασίας εσωτερικών χώρων σε άνετα επίπεδα. Τα παραδοσιακά συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούν λέβητες, καυστήρες, θερμαντικά σώματα ή αντλίες θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας στον χώρο. Μελέτες δείχνουν ότι η απόδοση της θέρμανσης εξαρτάται σημαντικά από την

επιλογή καυσίμου, την αποδοτικότητα του λέβητα και τον τρόπο διανομής της θερμότητας [31].

- Κλιματισμός (Air Conditioning). Ο κλιματισμός αφορά τόσο τη μείωση θερμοκρασίας όσο και τη διατήρηση επιθυμητών επιπέδων υγρασίας. Η ψύξη πραγματοποιείται με συστήματα συμπιεστή/εξατμιστή, τα οποία αφαιρούν θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο και την αποβάλλουν στο περιβάλλον· η λειτουργία αυτή καταναλώνει σημαντική ηλεκτρική ενέργεια [29][31].
- Εξαερισμός (Ventilation). Ο εξαερισμός εξασφαλίζει την ανανέωση του αέρα και τη ρύθμιση της ποιότητας με φυσική ή μηχανική ροή, αφαιρώντας ρύπους, CO₂, οσμές και υγρασία. Στην πράξη, τα σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν φίλτρα υψηλής απόδοσης (HEPA, ενεργού άνθρακα) και αισθητήρες ποιότητας αέρα [32].

6.3 Τύποι HVAC Συστημάτων

Τα HVAC συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την κλίμακα, την εφαρμογή και την τεχνολογία λειτουργίας:

- Κεντρικά HVAC Συστήματα. Σε μεγάλα κτίρια και επιχειρησιακούς χώρους, τα κεντρικά συστήματα χρησιμοποιούν έναν κεντρικό λέβητα ή ψύκτη αέρα που εξυπηρετεί πολλούς χώρους μέσω δικτύου αεραγωγών (ducts). Είναι υψηλής ισχύος, έχουν μεγάλο αρχικό κόστος αλλά προσφέρουν ομοιόμορφη διαχείριση [33].
- Αυτόνομα (Split) Συστήματα. Σε κατοικίες ή μικρούς χώρους, οι μονάδες split αποτελούνται από εξωτερική και εσωτερική μονάδα, παρέχοντας ευέλικτο έλεγχο ανά χώρο χωρίς εγκατάσταση δικτύου αεραγωγών. Η απόδοση τους αυξάνεται με τεχνολογίες inverter και μεταβλητής συχνότητας [30][31].
- Αντλίες Θερμότητας (Heat Pumps). Οι αντλίες θερμότητας είναι ενεργειακά αποδοτικές, μεταφέρουν θερμότητα από το ένα περιβάλλον στο άλλο και μπορούν να λειτουργούν τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Μελέτες δείχνουν ότι σε ήπια κλίματα μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (COP) [34].

6.4 Ενεργειακή Απόδοση και Βιωσιμότητα

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των HVAC συστημάτων αποτελεί πεδίο έντονης έρευνας και ανάπτυξης, λόγω της υψηλής συμμετοχής τους στη συνολική κατανάλωση σε κατοικίες και εμπορικά κτίρια. Σύμφωνα με μελέτες, η βελτιστοποίηση σχεδιασμού, η χρήση υψηλής απόδοσης συσκευών, η μόνωση και σωστή ρύθμιση λειτουργίας μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση [29][30].

Οι σύγχρονες μεθοδολογίες περιλαμβάνουν:

- Χρήση inverter τεχνολογίας: για τη μείωση των απωλειών λειτουργίας [30],
- Ανάκτηση θερμότητας: αξιοποίηση θερμότητας από εξαγωγή για προθέρμανση [35],
- Συστήματα zoned control: διαχείριση μεμονωμένων ζωνών με βάση ανάγκες [36].
- Η ενεργειακή απόδοση μετράται με δείκτες όπως ο SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) για ψύξη και ο HSPF (Heating Seasonal Performance Factor) για θέρμανση [29].

6.5 Έλεγχος HVAC

Ο έλεγχος των HVAC συστημάτων έχει παραδοσιακά υλοποιηθεί με θερμοστάτες και προκαθορισμένα προγράμματα λειτουργίας. Ωστόσο, η έρευνα δείχνει ότι η χρήση προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων PID, fuzzy logic, model predictive control (MPC) και τεχνικών μηχανικής μάθησης, μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και τη σταθερότητα λειτουργίας [37][38].

Ο κλασικός PID έλεγχος επιτυγχάνει αξιόπιστο αποτέλεσμα σε σταθερές συνθήκες, αλλά αντιμετωπίζει δυσκολίες σε περιβάλλοντα με υψηλή δυναμική μεταβολή. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι MPC μπορούν να ενσωματώσουν προβλεπτικά μοντέλα θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου, προσφέροντας καλύτερο έλεγχο με λιγότερη σπατάλη ενέργειας [37].

6.6 Αισθητήρες και Πληροφοριακά Συστήματα

Οι αισθητήρες αποτελούν κρίσιμο υποσύστημα των HVAC συστημάτων:

Τύπος Αισθητήρα	Στόχος
Θερμοκρασίας	Μέτρηση θερμοκρασίας στον χώρο
Υγρασίας	Συλλογή στοιχείων σχετικά με υγρασία αέρα
CO ₂ / VOC	Ποιότητα αέρα
Ροής αέρα	Έλεγχος και ρύθμιση συστημάτων αερισμού

Πίνακας 4 Είδη αισθητήρων HVAC συστημάτων

Σύγχρονες μελέτες προτείνουν τη χρήση δικτύων αισθητήρων και real-time δεδομένων για βελτιστοποίηση λειτουργίας και εξοικονόμηση ενέργειας [39].

6.7 Η Σχέση HVAC με Smart Homes

Τα HVAC συστήματα αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς πυλώνες της λογικής smart building / smart home. Ο συνδυασμός αισθητήρων, δικτύωσης, αυτοματισμού και βελτιστοποίησης επιτρέπει:

- Εξατομικευμένο έλεγχο θερμοκρασίας
- Ρύθμιση λειτουργίας βάσει παρουσίας ατόμων στο χώρο
- Απομακρυσμένο έλεγχο μέσω εφαρμογών
- Ολοκλήρωση με συστήματα ενεργειακής διαχείρισης

Έρευνες δείχνουν ότι τέτοιες ολοκληρωμένες λύσεις μπορούν να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση έως 20-30% σε κατοικίες και κτίρια γραφείων [40].

6.8 Προκλήσεις και Μελλοντικές Τάσεις

Παρά τη μεγάλη πρόοδο, τα HVAC συστήματα αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις:

- Ασφάλεια Δεδομένων και IoT. Η ενσωμάτωση HVAC σε δίκτυα και IoT πλατφόρμες αυξάνει τον κίνδυνο κυβερνοεπιθέσεων. Η ασφάλεια στη μεταφορά και διαχείριση δεδομένων είναι κρίσιμο ζήτημα στη σύγχρονη αρχιτεκτονική HVAC/CPS συστημάτων [40].
- Τυποποίηση και Διαλειτουργικότητα. Οι διαφορετικοί κατασκευαστές συσκευών και πρωτοκόλλων καθιστούν δύσκολη τη διαλειτουργία. Υπάρχουν προσπάθειες για ανοικτά πρότυπα και πλατφόρμες που να εξαλείφουν αυτά τα εμπόδια [41].
- Βελτιστοποίηση σε Πραγματικό Χρόνο. Η ανάγκη για accurate real-time control και μείωση ενεργειακής σπατάλης απαιτεί εξελιγμένους αλγορίθμους και υπολογιστική υποστήριξη, συχνά μέσω edge ή cloud υπολογισμού [42].

Μελλοντικές τάσεις περιλαμβάνουν:

- AI-based adaptive control
- Predictive maintenance
- Cloud / edge συνεργασία
- Integration with renewable energy sources

6.9 Συμπεράσματα

Τα HVAC συστήματα αποτελούν βασικό υποσύστημα των κτιρίων, με μεγάλη επίδραση στην άνεση των χρηστών και τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Η εξέλιξη τους σε smart, αυτοματοποιημένα, διασυνδεδεμένα συστήματα αποτελεί αναγκαίο βήμα για βιώσιμη λειτουργία

κατοικιών και κτιρίων. Η ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου, αισθητήρων υψηλής πιστότητας, και CPS/IoT τεχνολογιών υπόσχεται σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση και λειτουργικότητα των HVAC συστημάτων του μέλλοντος.

7 Συγκριτική Αξιολόγηση Πλατφορμών Ενσωματωμένων Συστημάτων για Υλοποίηση CPS- HVAC

7.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση ενός κυβερνοφυσικού συστήματος (Cyber-Physical System – CPS) για ενεργειακή διαχείριση HVAC σε οικιακό περιβάλλον απαιτεί την επιλογή κατάλληλης υπολογιστικής πλατφόρμας. Η πλατφόρμα αυτή αποτελεί τον πυρήνα του κυβερνοχώρου του συστήματος, καθώς είναι υπεύθυνη για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, την εκτέλεση αλγορίθμων ελέγχου και την επικοινωνία με ανώτερα επίπεδα δικτύου και cloud.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι απαιτήσεις των CPS περιλαμβάνουν δυνατότητες πραγματικού χρόνου, αξιοπιστία, ενεργειακή αποδοτικότητα, επεκτασιμότητα και ασφαλή διασύνδεση[45].

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τρεις βασικές κατηγορίες πλατφορμών:

- Arduino Uno (ATmega328P)
- ESP32
- Raspberry Pi

Στόχος είναι η συγκριτική αξιολόγηση και η τεκμηριωμένη επιλογή της καταλληλότερης για το προτεινόμενο CPS-HVAC.

7.2 Κριτήρια Επιλογής Πλατφόρμας

Η αξιολόγηση βασίζεται στα εξής τεχνικά και λειτουργικά κριτήρια:

- Υπολογιστική ισχύς
- Δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο
- Ενσωματωμένες δυνατότητες επικοινωνίας
- Κατανάλωση ισχύος
- Κόστος
- Ευκολία ενσωμάτωσης αισθητήρων
- Υποστήριξη IoT πρωτοκόλλων
- Κλιμακωσιμότητα και ασφάλεια

Τα παραπάνω συνάδουν με τα χαρακτηριστικά CPS όπως περιγράφονται στα [43], [46].

7.3 Arduino Uno

Το Arduino Uno, Εικόνα 9, βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P (8-bit AVR, 16 MHz).

Διαθέτει:

- 32 KB Flash
- 2 KB SRAM
- 14 ψηφιακές εισόδους/εξόδους
- 6 αναλογικές εισόδους
- 6 PWM εξόδους

Πλεονεκτήματα:

- Απλότητα σχεδίασης
- Σταθερή λειτουργία πραγματικού χρόνου (bare-metal)
- Χαμηλό κόστος
- Μεγάλο οικοσύστημα βιβλιοθηκών
- Χαμηλή κατανάλωση



Εικόνα 9 Arduino Uno

Η απουσία λειτουργικού συστήματος επιτρέπει ντετερμινιστική συμπεριφορά, κρίσιμη για εφαρμογές ελέγχου [47].

Περιορισμοί:

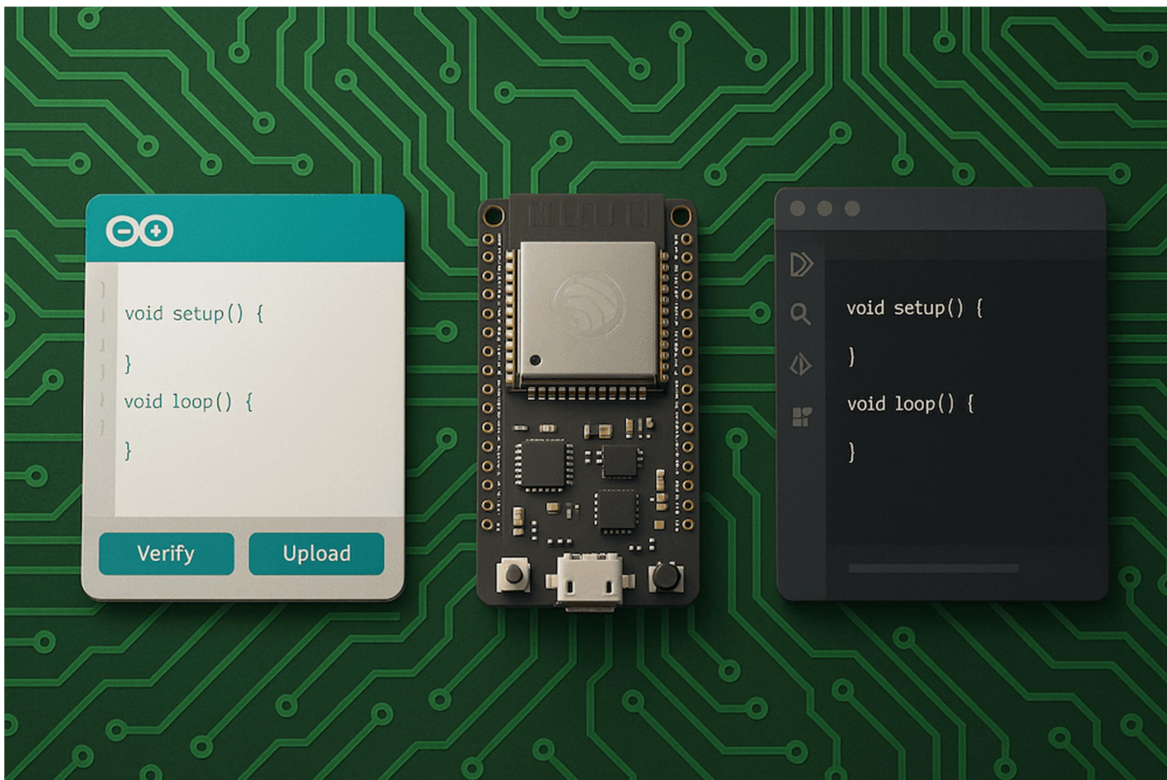
- Περιορισμένη μνήμη
- Έλλειψη ενσωματωμένου WiFi

- Περιορισμένη υποστήριξη TLS
- Χαμηλή επεξεργαστική ισχύς για προηγμένους αλγορίθμους
- Για πλήρη IoT λειτουργία απαιτείται εξωτερικό WiFi module (π.χ. ESP8266), αυξάνοντας την πολυπλοκότητα.

7.4 ESP32

Το ESP32, Εικόνα 10, αποτελεί μικροελεγκτή 32-bit (Tensilica Xtensa dual-core, έως 240 MHz), με:

- 520 KB SRAM
- Ενσωματωμένο WiFi 802.11 b/g/n
- Bluetooth
- Hardware encryption
- ADC, DAC, PWM, SPI, I2C, UART
- Υποστήριξη FreeRTOS



Εικόνα 10 ESP32

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή υπολογιστική ισχύς
- Ενσωματωμένη ασύρματη επικοινωνία

- Πλήρες λειτουργικό σύστημα

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή υπολογιστική ισχύς
- Υποστήριξη Python, AI frameworks
- Ιδανικό για edge computing

Περιορισμοί

- Μη ντετερμινιστική συμπεριφορά λόγω Linux
- Υψηλότερη κατανάλωση
- Υπερβολική πολυπλοκότητα για απλό ελεγκτή HVAC
- Μεγαλύτερο κόστος
- Για CPS ελέγχου πραγματικού χρόνου, η χρήση πλήρους λειτουργικού συστήματος μπορεί να επηρεάσει τη χρονική ακρίβεια [47].

7.6 Συγκριτική Ανάλυση και Τεκμηρίωση Τελικής Επιλογής

Λαμβάνοντας υπόψη:

- Την ανάγκη συνεχούς μέτρησης και ελέγχου θερμοκρασίας
- Την απαίτηση ασύρματης επικοινωνίας (MQTT)
- Τη συλλογή δεδομένων σε cloud
- Την πιθανή υλοποίηση αλγορίθμου PID ή MPC
- Την ανάγκη ασφαλούς επικοινωνίας

η πλατφόρμα ESP32 κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη.

Συνδυάζει:

- Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή (real-time control)
- IoT δυνατότητες
- Χαμηλό κόστος
- Υποστήριξη ασφάλειας
- Επεκτασιμότητα

Η επιλογή αυτή ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες αρχιτεκτονικές IoT-CPS που περιγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία, [44], [46].

7.7 Συμπεράσματα

Η συγκριτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι:

- Το Arduino Uno είναι κατάλληλο για απλές εφαρμογές ελέγχου.
- Το Raspberry Pi ενδείκνυται για edge analytics.

- Το ESP32 αποτελεί την βέλτιστη ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής ισχύος, ενεργειακής απόδοσης και IoT ενσωμάτωσης.

Συνεπώς, για το προτεινόμενο CPS ενεργειακής διαχείρισης HVAC, η υλοποίηση θα βασιστεί στην πλατφόρμα ESP32.

8 Υλοποίηση και Περιγραφή του Αναπτυγμένου Κυβερνοφυσικού Συστήματος Διαχείρισης HVAC

8.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση του προτεινόμενου κυβερνοφυσικού συστήματος HVAC πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης Wokwi, το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη και δοκιμή ενσωματωμένων και IoT συστημάτων χωρίς την ανάγκη φυσικού εξοπλισμού. Μέσω της πλατφόρμας αυτής σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε η ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος, καθώς και το λογισμικό που εκτελείται στον μικροελεγκτή ESP32. Το σύστημα συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ποιότητας αέρα και παρουσίας, ενώ τα δεδομένα αυτά αποστέλλονται μέσω WiFi στην πλατφόρμα ThingsBoard, όπου απεικονίζονται σε μορφή τηλεμετρίας και dashboard για την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη του υλικού (hardware), η λειτουργία των επιμέρους στοιχείων και η λογική ελέγχου του συστήματος.

8.2 Γενική αρχιτεκτονική

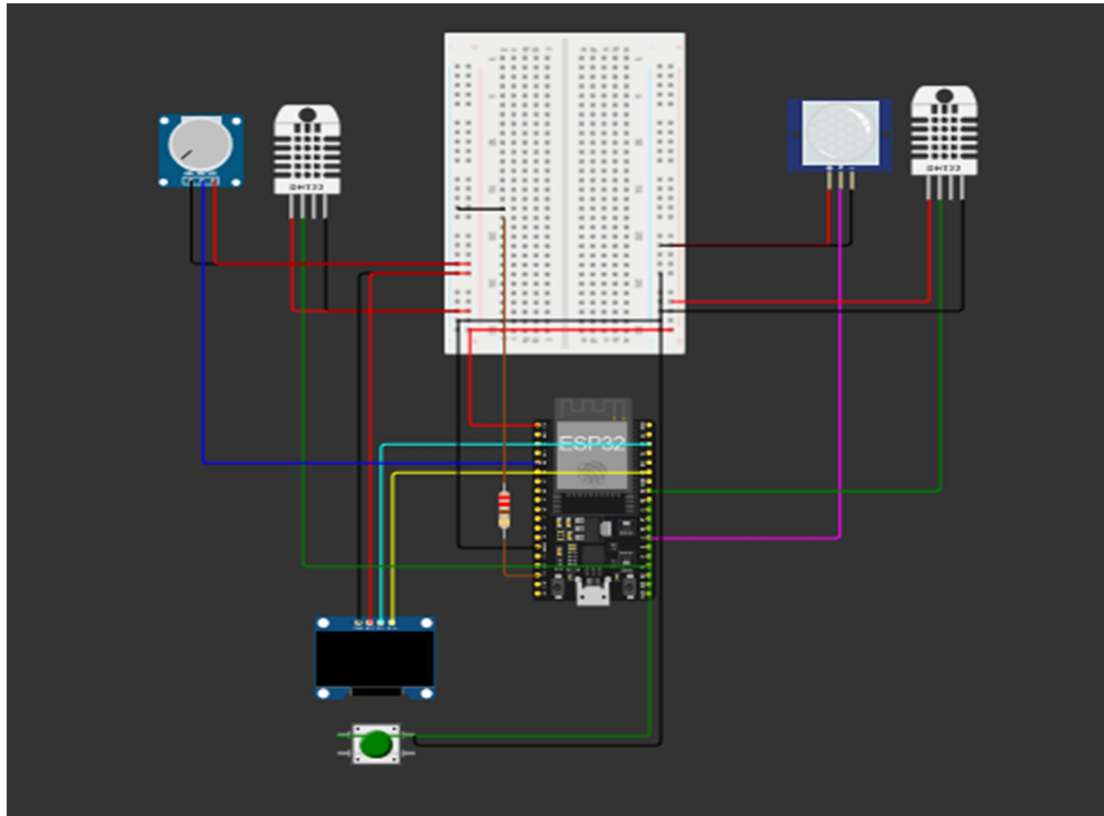
Η υλοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έναν μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρική μονάδα επεξεργασίας του κυβερνοφυσικού συστήματος (CPS). Στον ESP32 συνδέονται διάφοροι αισθητήρες και περιφερειακές συσκευές, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και επιτρέπουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός προσομοιωμένου συστήματος HVAC.

Η διάταξη του κυκλώματος υλοποιήθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης Wokwi, το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη και δοκιμή IoT συστημάτων χωρίς φυσικό εξοπλισμό.

Το σύστημα αποτελείται από:

- έναν μικροελεγκτή ESP32
- δύο αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας
- έναν αισθητήρα ποιότητας αέρα
- έναν αισθητήρα παρουσίας
- μια οθόνη OLED
- ένα πλήκτρο ελέγχου

Οι συσκευές αυτές συνδέονται μέσω των GPIO του ESP32 και επικοινωνούν με το λογισμικό που εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου του HVAC συστήματος.



Εικόνα 12, Κυβερνοφυσικό σύστημα διαχείρισης κλιματισμού

8.2.1 Μικροελεγκτής ESP32

Ο ESP32 αποτελεί την κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος. Οι βασικές λειτουργίες του είναι:

- συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες
- εκτέλεση του θερμικού μοντέλου του χώρου
- λήψη αποφάσεων για την λειτουργία του HVAC
- αποστολή δεδομένων στο ThingsBoard IoT platform
- απεικόνιση βασικών πληροφοριών στην OLED οθόνη

Ο ESP32 επιλέχθηκε λόγω:

- της ενσωματωμένης WiFi συνδεσιμότητας
- της υψηλής υπολογιστικής ισχύος
- της μεγάλης υποστήριξης σε IoT εφαρμογές.

8.2.2 Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας (DHT22)

Στο σύστημα χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες DHT22:

Εσωτερικός αισθητήρας

- Ο πρώτος αισθητήρας μετρά:
- θερμοκρασία εσωτερικού χώρου
- σχετική υγρασία

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται:

- για την απεικόνιση των συνθηκών στο dashboard
- για την λειτουργία του συστήματος σε manual mode

Εξωτερικός αισθητήρας. Ο δεύτερος αισθητήρας μετρά:

- εξωτερική θερμοκρασία
- εξωτερική υγρασία

Η εξωτερική θερμοκρασία χρησιμοποιείται ως είσοδος στο θερμικό μοντέλο του χώρου, το οποίο υπολογίζει τη δυναμική μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας.

8.2.3 Αισθητήρας ποιότητας αέρα (MQ-135)

Για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας MQ-135, ο οποίος είναι ευαίσθητος σε διάφορα αέρια όπως CO₂, NH₃ και άλλες πτητικές ενώσεις. Στο περιβάλλον προσομοίωσης Wokwi, η μεταβολή της τιμής του αισθητήρα προσομοιώθηκε μέσω ενός ποτενσιόμετρου, το οποίο επιτρέπει τη χειροκίνητη μεταβολή της αναλογικής τιμής που διαβάζει ο ESP32. Η τιμή αυτή μετατρέπεται σε έναν δείκτη ποιότητας αέρα (Air Quality Index – AQI), ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση της λειτουργίας αερισμού του συστήματος.

8.2.4 Αισθητήρας παρουσίας (PIR)

Ο αισθητήρας PIR (Passive Infrared Sensor) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση παρουσίας ανθρώπου στον χώρο.

Η πληροφορία παρουσίας χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μιας πολιτικής λειτουργίας με ενεργειακή επίγνωση του HVAC:

- όταν υπάρχει παρουσία → comfort mode
- όταν δεν υπάρχει παρουσία → eco mode

Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας όταν ο χώρος δεν χρησιμοποιείται.

8.2.5 Οθόνη OLED

Στο σύστημα χρησιμοποιείται μια OLED οθόνη 128×64 (SSD1306) η οποία επικοινωνεί με τον ESP32 μέσω διαύλου I2C.

- Η οθόνη εμφανίζει βασικές πληροφορίες λειτουργίας όπως:
- θερμοκρασία εσωτερικού χώρου
- θερμοκρασία εξωτερικού χώρου
- κατάσταση HVAC
- ποιότητα αέρα
- κατάσταση παρουσίας

Η πληροφορία εμφανίζεται σε διαφορετικές σελίδες (pages) οι οποίες εναλλάσσονται αυτόματα ή μέσω πλήκτρου.

8.2.6 Πλήκτρο ελέγχου

Στο κύκλωμα υπάρχει ένα push button, το οποίο χρησιμοποιείται για την εναλλαγή των σελίδων της OLED οθόνης.

Με κάθε πάτημα του πλήκτρου εμφανίζεται διαφορετική σελίδα πληροφοριών του συστήματος.

8.2.7 Breadboard και διασυνδέσεις

Η συνδεσμολογία των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε σε breadboard, το οποίο επιτρέπει την εύκολη υλοποίηση και τροποποίηση του κυκλώματος χωρίς μόνιμες συγκολλήσεις.

Οι αισθητήρες συνδέονται στους αντίστοιχους ακροδέκτες GPIO του ESP32, ενώ χρησιμοποιούνται επίσης αντιστάσεις pull-up όπου απαιτείται για τη σωστή λειτουργία των αισθητήρων.

8.3 Συνοπτική λειτουργία της διάταξης

Η λειτουργία της διάταξης συνοψίζεται ως εξής:

- Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον.
- Ο ESP32 επεξεργάζεται τα δεδομένα και εκτελεί το θερμικό μοντέλο του χώρου.
- Ο αλγόριθμος ελέγχου αποφασίζει την κατάσταση λειτουργίας του HVAC.
- Τα δεδομένα αποστέλλονται στο ThingsBoard dashboard για απομακρυσμένη παρακολούθηση.
- Τα βασικά δεδομένα εμφανίζονται επίσης στην OLED οθόνη.
- Λογική λειτουργίας του συστήματος HVAC

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες και στην επεξεργασία τους από τον μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου του συστήματος HVAC. Το σύστημα λειτουργεί ως κυβερνοφυσικό σύστημα (Cyber-Physical System), στο οποίο τα δεδομένα του φυσικού περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται για την λήψη αποφάσεων σχετικά με τη λειτουργία της θέρμανσης, της ψύξης και του αερισμού του χώρου.

Η βασική λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες
- υπολογισμό της θερμοκρασίας μέσω του θερμικού μοντέλου
- εφαρμογή πολιτικής λειτουργίας (eco ή comfort)
- απόφαση ενεργοποίησης του συστήματος HVAC
- αποστολή των δεδομένων στην πλατφόρμα ThingsBoard
- Συλλογή δεδομένων αισθητήρων

Ο μικροελεγκτής ESP32 συλλέγει περιοδικά δεδομένα από τους αισθητήρες του συστήματος. Οι βασικές μετρήσεις που λαμβάνονται είναι:

- θερμοκρασία και υγρασία εσωτερικού χώρου από τον αισθητήρα DHT22
- θερμοκρασία και υγρασία εξωτερικού χώρου από τον δεύτερο DHT22
- τιμή ποιότητας αέρα από τον αισθητήρα MQ-135
- πληροφορία παρουσίας από τον αισθητήρα PIR

Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στον αλγόριθμο ελέγχου του συστήματος.

8.4 Θερμικό μοντέλο του χώρου

Για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του χώρου χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο μοντέλο θερμικής δυναμικής πρώτης τάξης.

Το θερμικό μοντέλο RC αποτελεί μια απλή αλλά ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός χώρου. Στο μοντέλο αυτό η θερμική αντίσταση R αναπαριστά την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ η θερμική χωρητικότητα C εκφράζει την ικανότητα του χώρου να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Παρότι πρόκειται για απλοποιημένη αναπαράσταση, το μοντέλο RC χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές ελέγχου HVAC λόγω της απλότητας και της επαρκούς ακρίβειας που παρέχει.

Το μοντέλο αυτό περιγράφει τη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου ως συνάρτηση της εξωτερικής θερμοκρασίας και της ισχύος του συστήματος HVAC.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{out}-T}{R \cdot C} + \frac{Q_{hvac}}{C}, [48]$$

όπου:

- T είναι η θερμοκρασία του χώρου
- Tout είναι η εξωτερική θερμοκρασία
- R είναι η θερμική αντίσταση του κτιρίου
- C είναι η θερμική χωρητικότητα του χώρου
- Qhvac είναι η θερμική ισχύς του συστήματος HVAC
- T είναι ο χρόνος

Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του χώρου χωρίς την ανάγκη πραγματικού συστήματος θέρμανσης ή ψύξης.

8.5 Λειτουργία Comfort και Eco

Το σύστημα εφαρμόζει μια πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας βασισμένη στην ανίχνευση παρουσίας στον χώρο.

Όταν ανιχνεύεται παρουσία από τον αισθητήρα PIR, το σύστημα λειτουργεί σε comfort mode, στο οποίο η επιθυμητή θερμοκρασία του χώρου είναι υψηλότερη και μπορεί να αλλαχθεί από την πλατφόρμα ThingsBoard (π.χ. 25°C).

Όταν δεν ανιχνεύεται παρουσία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα μεταβαίνει σε eco mode, στο οποίο η επιθυμητή θερμοκρασία μειώνεται και μπορεί να αλλαχθεί από την πλατφόρμα ThingsBoard (π.χ. 20°C), με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Η μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων πραγματοποιείται αυτόματα, ανάλογα με την πληροφορία παρουσίας.

8.6 Απόφαση λειτουργίας του HVAC

Η απόφαση ενεργοποίησης του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης λαμβάνεται συγκρίνοντας τη θερμοκρασία ελέγχου με την επιθυμητή θερμοκρασία.

Για την αποφυγή συνεχών ενεργοποιήσεων και απενεργοποιήσεων του συστήματος χρησιμοποιείται μια ζώνη υστέρησης (hysteresis) γύρω από την επιθυμητή θερμοκρασία.

Αν η θερμοκρασία του χώρου είναι μικρότερη από το κατώτερο όριο της ζώνης υστέρησης, ενεργοποιείται η θέρμανση.

Αν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από το ανώτερο όριο, ενεργοποιείται η ψύξη.

Όταν η θερμοκρασία βρίσκεται εντός της ζώνης υστέρησης, το σύστημα HVAC παραμένει απενεργοποιημένο.

8.7 Λειτουργία αερισμού

Η λειτουργία του συστήματος αερισμού βασίζεται στις μετρήσεις του αισθητήρα ποιότητας αέρα MQ-135. Όταν η τιμή του δείκτη ποιότητας αέρα υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο, ενεργοποιείται η λειτουργία εξαερισμού του χώρου. Η λειτουργία αυτή απενεργοποιείται όταν η ποιότητα του αέρα επανέλθει σε αποδεκτά επίπεδα.

8.8 Αποστολή δεδομένων στο ThingsBoard

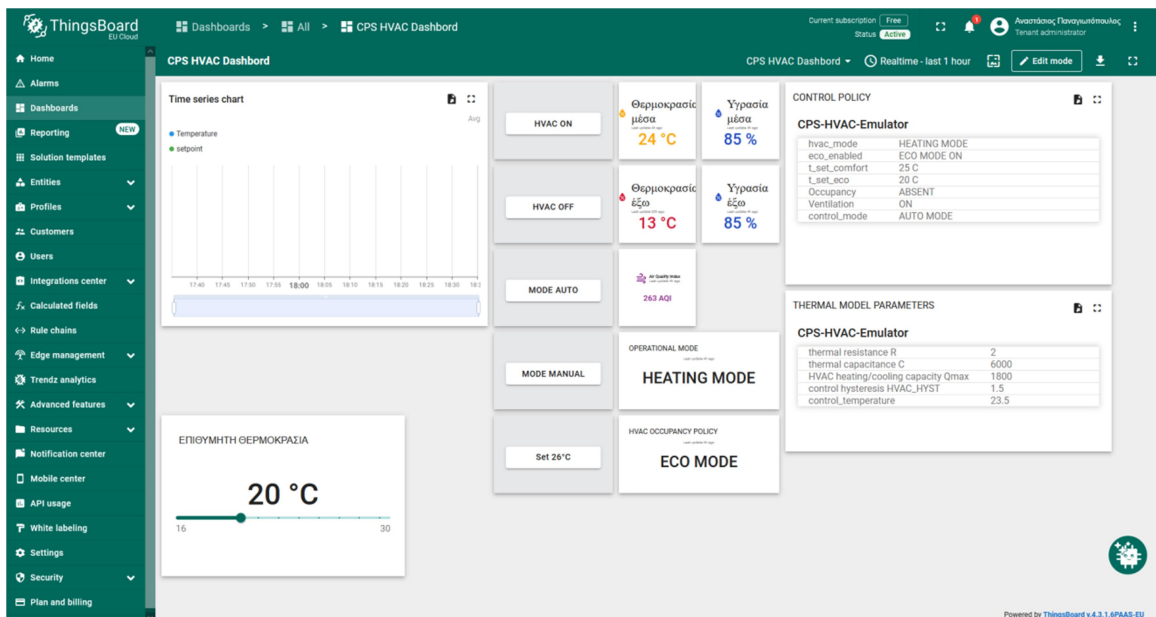
Τα δεδομένα λειτουργίας του συστήματος αποστέλλονται περιοδικά μέσω WiFi στην πλατφόρμα ThingsBoard χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο MQTT.

Οι πληροφορίες που αποστέλλονται περιλαμβάνουν:

- θερμοκρασία χώρου
- εξωτερική θερμοκρασία

- κατάσταση παρουσίας
- κατάσταση HVAC
- ποιότητα αέρα
- ενεργό setpoint

Τα δεδομένα αυτά απεικονίζονται σε μορφή dashboard, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 13, Άποψη του dashboard

8.9 Απεικόνιση δεδομένων στην OLED

Παράλληλα με την αποστολή δεδομένων στο cloud, το σύστημα εμφανίζει βασικές πληροφορίες λειτουργίας στην οθόνη OLED. Οι πληροφορίες οργανώνονται σε πολλαπλές σελίδες οι οποίες εναλλάσσονται είτε αυτόματα είτε μέσω ενός πλήκτρου ελέγχου.

Με τον τρόπο αυτό παρέχεται τοπική παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος.

9 Πειραματική αξιολόγηση συστήματος

9.1 Εισαγωγή

Η πειραματική αξιολόγηση του αναπτυγμένου κυβερνοφυσικού συστήματος HVAC πραγματοποιήθηκε με στόχο την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων, καθώς και της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε τόσο στο επίπεδο της συλλογής και απεικόνισης δεδομένων, όσο και στο επίπεδο της λογικής ελέγχου, της ενεργειακής διαχείρισης και της απόκρισης του θερμικού μοντέλου.

Το πειραματικό περιβάλλον υλοποιήθηκε στην πλατφόρμα προσομοίωσης Wokwi, όπου αναπτύχθηκε το κύκλωμα με μικροελεγκτή ESP32, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22 για εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες, αισθητήρα παρουσίας PIR, αισθητήρα ποιότητας αέρα MQ135 — ο οποίος στην προσομοίωση υλοποιήθηκε μέσω ποτενσιόμετρου — καθώς και οθόνη OLED SSD1306 για τοπική εποπτεία. Παράλληλα, η διασύνδεση με την πλατφόρμα ThingsBoard επέτρεψε την απομακρυσμένη παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος και την οπτικοποίηση κρίσιμων μεταβλητών λειτουργίας.

Η θερμική συμπεριφορά του χώρου δεν βασίστηκε αποκλειστικά στις μετρήσεις του αισθητήρα εσωτερικής θερμοκρασίας, αλλά ενσωμάτωσε ένα απλοποιημένο δυναμικό θερμικό μοντέλο τύπου RC. Το μοντέλο αυτό περιγράφει την εξέλιξη της εσωτερικής θερμοκρασίας ως συνάρτηση της εξωτερικής θερμοκρασίας, της θερμικής αδράνειας του χώρου και της επίδρασης του συστήματος HVAC. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η προσομοίωση μιας πιο ρεαλιστικής θερμικής απόκρισης, η οποία επιτρέπει την αξιολόγηση στρατηγικών ελέγχου χωρίς να απαιτείται πραγματικός θερμικός θάλαμος ή φυσικός χώρος δοκιμών.

9.2 Στόχοι της πειραματικής αξιολόγησης

Η πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε ώστε να εξετάσει τους ακόλουθους βασικούς στόχους:

- την ορθή ανάγνωση και επεξεργασία των μετρήσεων από τους αισθητήρες,
- την αξιόπιστη λειτουργία του θερμικού μοντέλου RC,
- την ορθή εναλλαγή μεταξύ χειροκίνητης και αυτόματης λειτουργίας,
- την εφαρμογή της πολιτικής comfort/eco ανάλογα με την παρουσία χρήστη,
- την απόκριση του συστήματος σε μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας,
- τη σωστή αποστολή τηλεμετρίας προς το ThingsBoard,

- και τη συνεπή τοπική απεικόνιση της κατάστασης του συστήματος μέσω της OLED οθόνης.

9.3 Μεθοδολογία δοκιμών

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά σενάρια λειτουργίας, κατά τα οποία μεταβάλλονταν ελεγχόμενα οι τιμές των εισόδων της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, μεταβλήθηκαν οι τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας, της ένδειξης παρουσίας και της προσομοιωμένης ποιότητας αέρα, ενώ παρατηρήθηκε η αντίδραση του συστήματος ως προς:

- την εσωτερική θερμοκρασία που υπολογίζεται από το θερμικό μοντέλο,
- την κατάσταση ενεργοποίησης του HVAC,
- την κατάσταση αερισμού,
- την επιλεγμένη θερμοκρασία αναφοράς,
- και την αποτύπωση όλων των παραπάνω στο dashboard.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε πραγματικό χρόνο μέσα από την προσομοίωση, με τον ESP32 να εκτελεί τον κώδικα ελέγχου σε επαναλαμβανόμενο βρόχο. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας γινόταν ανάγνωση αισθητήρων, ενημέρωση του θερμικού μοντέλου, λήψη αποφάσεων ελέγχου και δημοσίευση των σχετικών δεδομένων στην πλατφόρμα ThingsBoard μέσω MQTT.

Πείραμα	Στόχος
1	Έλεγχος παρουσίας
2	Έλεγχος ποιότητας αέρα
3	Tracking θερμοκρασίας

Πίνακας 5, πειράματα

9.4 Πειραματικά σενάρια

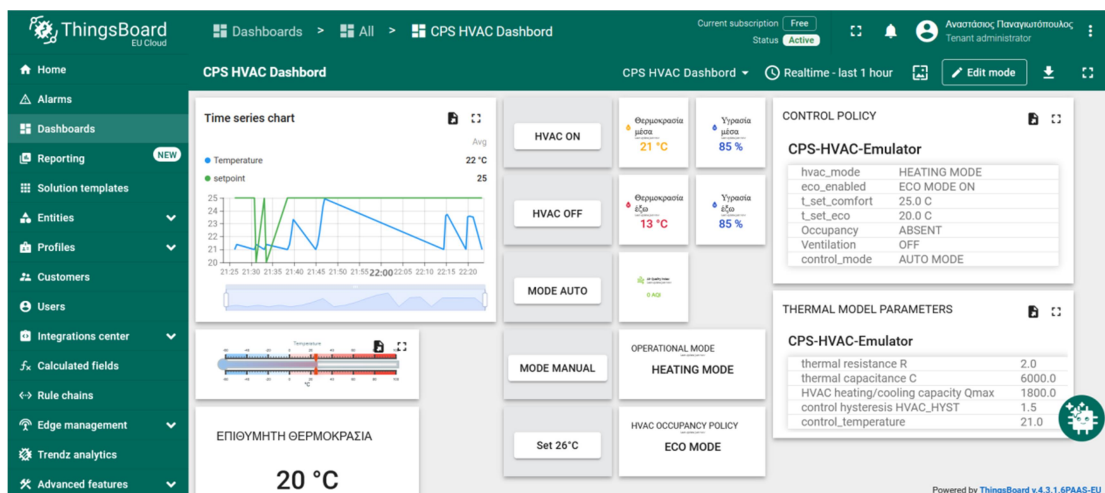
9.4.1 Σενάριο 1: Μετάβαση λειτουργίας HVAC βάσει παρουσίας χρήστη

Στο πρώτο πειραματικό σενάριο εξετάστηκε η συμπεριφορά του συστήματος κατά την εκκίνηση λειτουργίας του HVAC και η αυτόματη εναλλαγή μεταξύ των καταστάσεων comfort και eco, η οποία βασίζεται στην ανίχνευση παρουσίας μέσω του αισθητήρα PIR. Στόχος του σεναρίου ήταν να επιβεβαιωθεί ότι το σύστημα μπορεί να προσαρμόζει δυναμικά τη στρατηγική λειτουργίας του, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική χρήση του χώρου.

Κατά την αρχική εκκίνηση του συστήματος, το HVAC τίθεται σε λειτουργία με ενεργοποιημένο τον μηχανισμό ελέγχου θερμοκρασίας. Στην πρώτη χρονική στιγμή της δοκιμής, ο αισθητήρας PIR δεν ανιχνεύει παρουσία στον χώρο, γεγονός που οφείλεται και στη φυσική καθυστέρηση

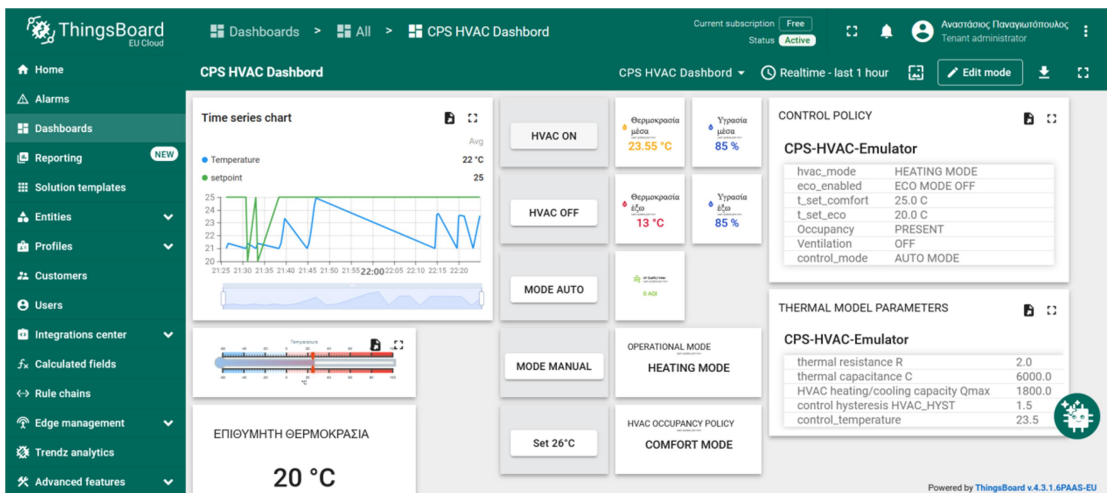
ενεργοποίησης που εμφανίζουν οι αισθητήρες υπέρυθρης ανίχνευσης κίνησης κατά την εκκίνηση. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα θεωρεί ότι ο χώρος είναι κενός και ενεργοποιεί τη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (eco mode).

Σύμφωνα με τα δεδομένα τηλεμετρίας που μεταδόθηκαν στην πλατφόρμα παρακολούθησης, η κατάσταση παρουσίας καταγράφεται ως $presence = 0$, ενώ το σύστημα ενεργοποιεί το HVAC με σκοπό να αυξήσει τη θερμοκρασία του χώρου προς το καθορισμένο σημείο αναφοράς. Η θερμοκρασία που υπολογίζεται από το θερμικό μοντέλο είναι περίπου 21.03°C , ενώ το επιθυμητό σημείο αναφοράς έχει οριστεί στα 25°C . Η ενεργοποίηση του συστήματος κλιματισμού επιβεβαιώνεται από τη μεταβλητή $hvac_on = 1$, ενώ η παρεχόμενη θερμική ισχύς του συστήματος αποτυπώνεται στην τιμή $q_hvac = 180\text{ W}$.



Εικόνα 14, 1^ο Screenshot Dashboard για το πρώτο πείραμα

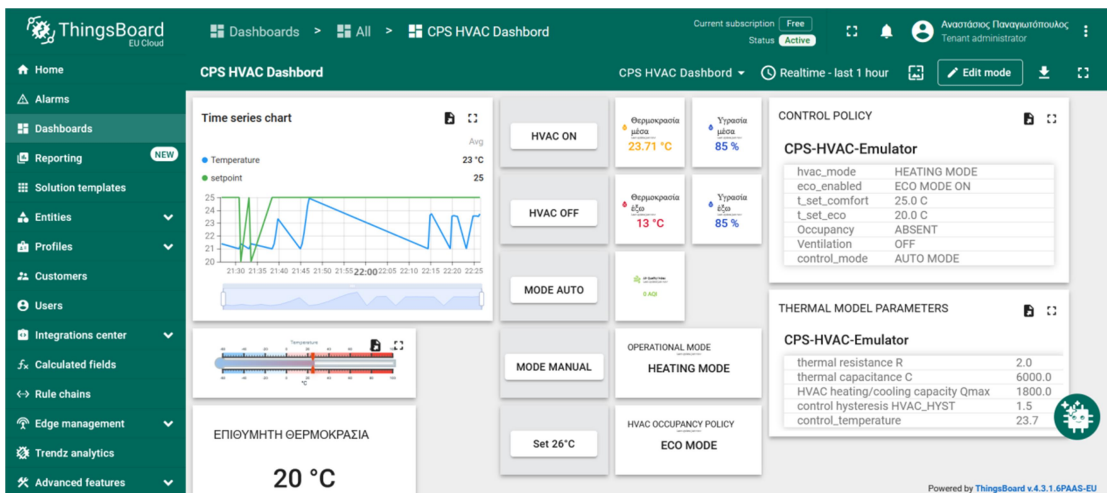
Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η ανίχνευση παρουσίας στον χώρο μέσω ενεργοποίησης του αισθητήρα PIR. Με την ανίχνευση παρουσίας, η μεταβλητή παρουσίας μεταβάλλεται σε $presence = 1$, γεγονός που οδηγεί το σύστημα σε μετάβαση από τη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας στη λειτουργία comfort mode. Στο στάδιο αυτό η θερμοκρασία του χώρου έχει ήδη αυξηθεί σημαντικά, με το θερμικό μοντέλο να υπολογίζει τιμή περίπου 23.54°C , πολύ κοντά στο επιθυμητό setpoint. Εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας και της εφαρμογής υστέρησης ελέγχου ($HVAC_HYST = 1.5^{\circ}\text{C}$), το σύστημα απενεργοποιεί προσωρινά τη μονάδα HVAC ($hvac_on = 0$), αποφεύγοντας περιττές ενεργοποιήσεις και συμβάλλοντας στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.



Εικόνα 15, 2^ο Screenshot Dashboard για το πρώτο πείραμα

Στο τελευταίο στάδιο του σεναρίου η παρουσία παύει να ανιχνεύεται, με αποτέλεσμα η μεταβλητή παρουσίας να επανέρχεται στην κατάσταση $presence = 0$. Το σύστημα μεταβαίνει ξανά στη λειτουργία eco mode, προσαρμόζοντας τη στρατηγική ελέγχου ώστε να περιοριστεί η κατανάλωση ενέργειας όταν ο χώρος δεν χρησιμοποιείται. Η θερμοκρασία του χώρου παραμένει σχετικά υψηλή, περίπου 23.7°C , και το HVAC παραμένει ανενεργό ($hvac_on = 0$), ενώ η επίδραση του θερμικού μοντέλου αποτυπώνεται στην μικρή υπολειπόμενη θερμική συνεισφορά ($q_{hvac} \approx 45.8 \text{ W}$), η οποία αντιπροσωπεύει τη σταδιακή εξισορρόπηση του συστήματος.

Η εξέλιξη των παραπάνω καταστάσεων απεικονίζεται στο dashboard της πλατφόρμας παρακολούθησης, όπου φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του χώρου και η δυναμική απόκριση του συστήματος HVAC σε σχέση με την κατάσταση ανίχνευσης παρουσίας. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει ότι η υλοποιημένη λογική ελέγχου λειτουργεί σωστά, επιτρέποντας στο σύστημα να προσαρμόζει τη λειτουργία του ανάλογα με τις πραγματικές συνθήκες χρήσης του χώρου και να επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ θερμικής άνεσης και ενεργειακής εξοικονόμησης.



Εικόνα 16, 3^ο Screenshot Dashboard για το πρώτο πείραμα

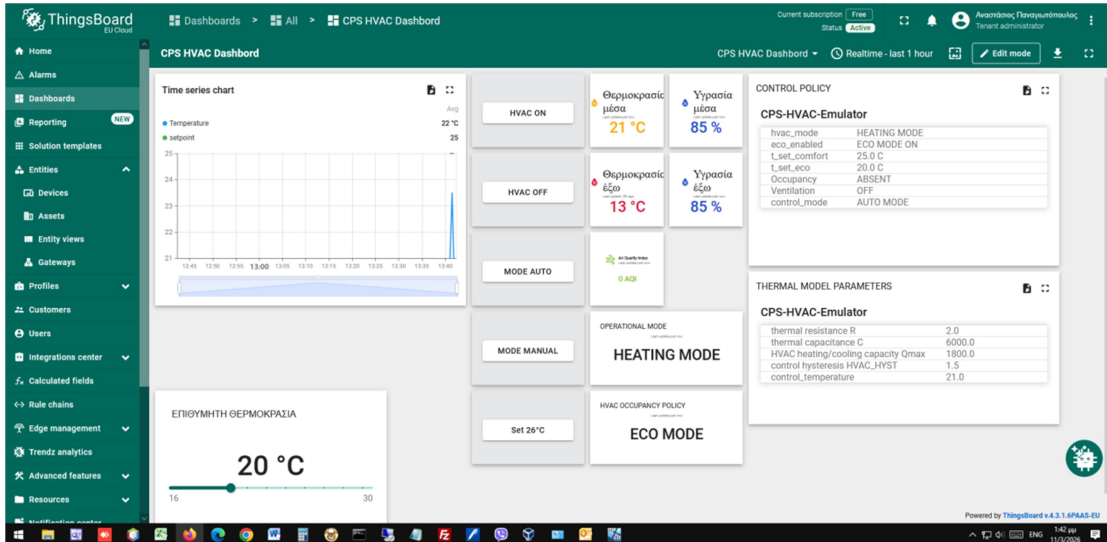
Συνολικά, το σενάριο αυτό αποδεικνύει την ορθή λειτουργία της πολιτικής ελέγχου βάσει παρουσίας (occupancy-based control policy), η οποία αποτελεί βασικό στοιχείο των σύγχρονων κυβερνοφυσικών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας σε έξυπνα κτίρια.

9.4.2 Σενάριο 2: Ανίχνευση υποβάθμισης ποιότητας αέρα και ενεργοποίηση αερισμού

Στο δεύτερο πειραματικό σενάριο εξετάστηκε η λειτουργία του υποσυστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα και η αντίδραση του συστήματος μέσω ενεργοποίησης του μηχανισμού αερισμού (ventilation). Στόχος του σεναρίου ήταν να επαληθευθεί ότι το σύστημα μπορεί να ανιχνεύει υποβάθμιση των συνθηκών αέρα στον εσωτερικό χώρο και να ενεργοποιεί αυτόματα κατάλληλη στρατηγική αντιμετώπισης.

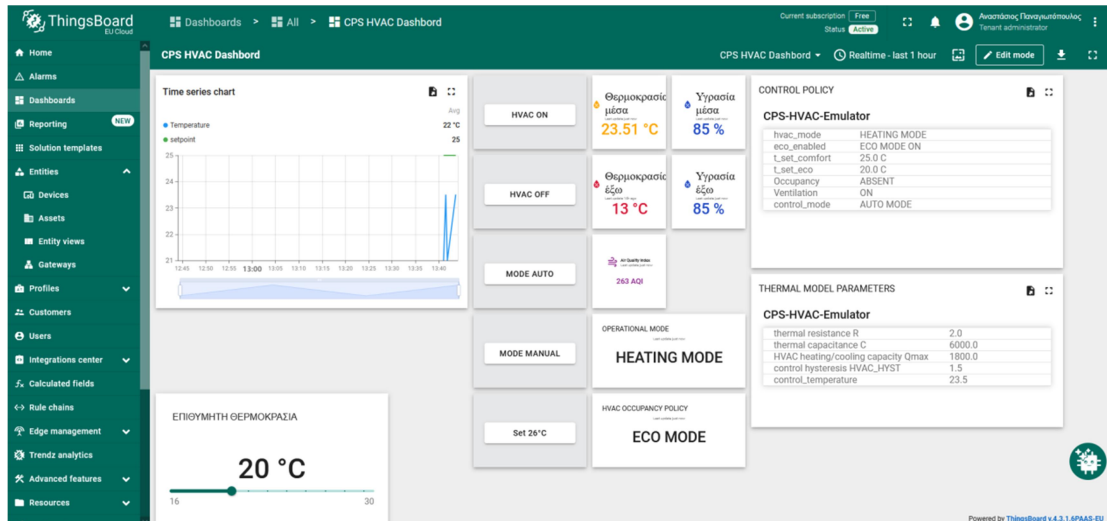
Κατά την αρχική φάση του πειράματος το σύστημα τίθεται σε λειτουργία με άριστη ποιότητα αέρα, η οποία στην προσομοίωση αντιστοιχεί σε τιμή $air_quality = 0$. Στην κατάσταση αυτή δεν υπάρχει λόγος ενεργοποίησης του μηχανισμού αερισμού και επομένως η μεταβλητή $vent_on = 0$. Παράλληλα το σύστημα HVAC λειτουργεί κανονικά, καθώς η θερμοκρασία του χώρου που υπολογίζεται από το θερμικό μοντέλο είναι περίπου 21.03°C , ενώ το επιθυμητό σημείο αναφοράς παραμένει 25°C . Για τον λόγο αυτό το σύστημα κλιματισμού βρίσκεται σε κατάσταση ενεργοποίησης ($hvac_on = 1$), παρέχοντας

Θερμική ισχύ $q_{hvac} = 180 \text{ W}$, ώστε να αυξηθεί σταδιακά η θερμοκρασία του χώρου.



Εικόνα 17, 1^ο Screenshot Dashboard για το δεύτερο πείραμα

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, μεταβάλλοντας την τιμή του ποτενσιόμετρου που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση του αισθητήρα MQ135. Η μεταβολή αυτή οδήγησε σε σημαντική αύξηση της μεταβλητής `air_quality`, η οποία έφτασε σε τιμή περίπου 263. Η τιμή αυτή υπερβαίνει το καθορισμένο όριο ποιότητας αέρα που χρησιμοποιείται από τη λογική ελέγχου του συστήματος. Ως αποτέλεσμα της ανίχνευσης αυξημένων συγκεντρώσεων ρύπων στον αέρα, ενεργοποιείται ο μηχανισμός αερισμού και η μεταβλητή `vent_on` μεταβάλλεται σε 1, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα προσπαθεί να βελτιώσει τις συνθήκες αέρα στον χώρο μέσω ανανέωσης του αέρα. Την ίδια χρονική στιγμή η θερμοκρασία του χώρου έχει ήδη αυξηθεί σε περίπου 23.51°C , τιμή κοντά στο επιθυμητό σημείο αναφοράς. Εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας και της εφαρμογής υστέρησης ελέγχου ($\text{HVAC_HYST} = 1.5^{\circ}\text{C}$), το σύστημα HVAC παραμένει ανενεργό ($\text{hvac_on} = 0$), αποφεύγοντας περιττές ενεργοποιήσεις.



Εικόνα 18, 2^ο Screenshot Dashboard για το δεύτερο πείραμα

Η λειτουργία αυτή αποτυπώνεται στο dashboard της πλατφόρμας παρακολούθησης, όπου παρατηρείται η αλλαγή στην ένδειξη ποιότητας αέρα και η ταυτόχρονη ενεργοποίηση του μηχανισμού αερισμού. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα επιδεικνύει ικανότητα αυτόματης αντίδρασης σε μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, ενσωματώνοντας στοιχεία διαχείρισης ποιότητας αέρα στην ευρύτερη λειτουργία του HVAC.

Συνολικά, το πείραμα αυτό επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του μηχανισμού air-quality-aware ventilation control, σύμφωνα με τον οποίο το σύστημα μπορεί να ενεργοποιεί αυτόματα διαδικασίες αερισμού όταν ανιχνεύονται αυξημένα επίπεδα ρύπων. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων κυβερνοφυσικών συστημάτων διαχείρισης κτιρίων, καθώς συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και στην προστασία της υγείας των χρηστών του χώρου.

9.4.3 Σενάριο 3: Πείραμα παρακολούθησης σημείου αναφοράς (Tracking Experiment)

Στο τρίτο πειραματικό σενάριο εξετάστηκε η ικανότητα του προτεινόμενου συστήματος να παρακολουθεί μεταβολές της επιθυμητής θερμοκρασίας αναφοράς (setpoint tracking). Σκοπός του πειράματος ήταν να αξιολογηθεί κατά πόσο το θερμικό μοντέλο του χώρου και η λογική ελέγχου του HVAC επιτρέπουν στο σύστημα να προσαρμόζει δυναμικά τη θερμοκρασία του χώρου προς μια νέα επιθυμητή τιμή.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, στα οποία το σύστημα λειτουργούσε κυρίως με βάση την πολιτική παρουσίας και τις συνθήκες ποιότητας αέρα, στο παρόν πείραμα δόθηκε έμφαση στη

δυναμική συμπεριφορά του θερμικού μοντέλου και στην απόκριση του ελεγκτή σε βηματική μεταβολή του setpoint.

9.4.3.1 Παραδοχές και τροποποιήσεις για το πείραμα

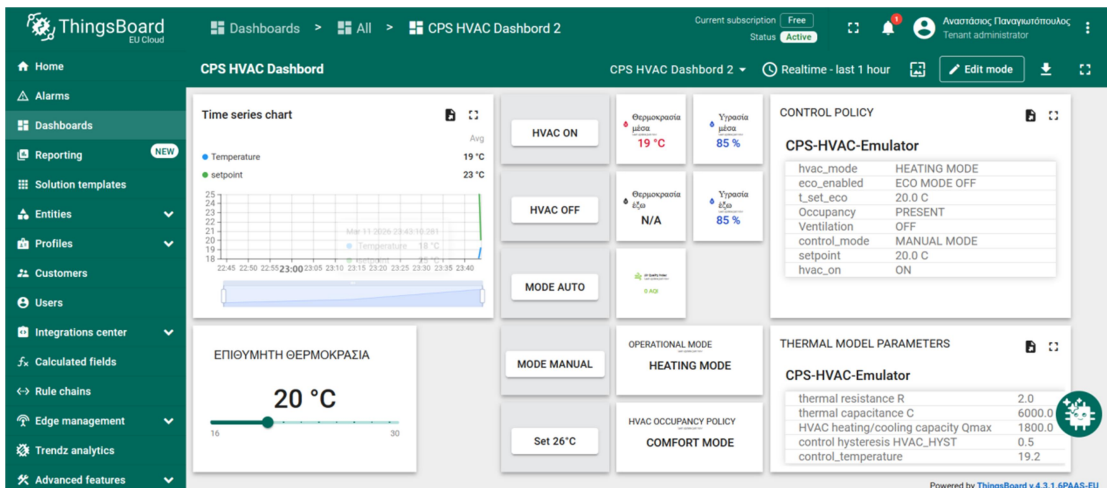
Για την εκτέλεση του πειράματος πραγματοποιήθηκαν ορισμένες ελεγχόμενες τροποποιήσεις στη διαμόρφωση του συστήματος, με σκοπό την καθαρή παρατήρηση της δυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου:

- Αρχικά, το σύστημα τέθηκε σε χειροκίνητη λειτουργία (Manual Mode) μέσω της διεπαφής του dashboard. Με τον τρόπο αυτό απενεργοποιείται η αυτόματη επιλογή θερμοκρασίας που προκύπτει από την πολιτική comfort/eco και επιτρέπεται στον χρήστη να ορίζει απευθείας το επιθυμητό setpoint μέσω του slider της εφαρμογής.
- Επιπλέον, η μεταβλητή παρουσίας διατηρήθηκε μόνιμα ενεργή, ώστε να αποφευχθεί η ενεργοποίηση της λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας (eco mode) κατά τη διάρκεια του πειράματος. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται αποκλειστικά από την αλλαγή του setpoint και όχι από τη λογική παρουσίας.
- Μία ακόμη σημαντική προσαρμογή αφορούσε την τιμή της υστέρησης του ελεγκτή HVAC. Συγκεκριμένα, η παράμετρος υστέρησης μειώθηκε από: HVAC_HYST=1.5°C σε HVAC_HYST=0.5°C. Η αλλαγή αυτή πραγματοποιήθηκε προκειμένου να καταστεί πιο ευδιάκριτη η απόκριση του συστήματος σε μικρότερες αποκλίσεις θερμοκρασίας και να παρατηρηθεί καθαρότερα η διαδικασία σύγκλισης προς το νέο σημείο αναφοράς.
- Τέλος, για λόγους πειραματικής συνέπειας, η θερμοκρασία που χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή για τη λήψη αποφάσεων βασίστηκε αποκλειστικά στη μεταβλητή temperature_model, δηλαδή στην εσωτερική θερμοκρασία που υπολογίζεται από το θερμικό μοντέλο του χώρου. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την καθαρή μελέτη της δυναμικής του μοντέλου χωρίς να επηρεάζεται από πιθανό θόρυβο ή καθυστερήσεις των αισθητήρων.

9.4.3.2 Διαδικασία πειράματος

Το πείραμα εκτελέστηκε σε δύο βασικά στάδια.

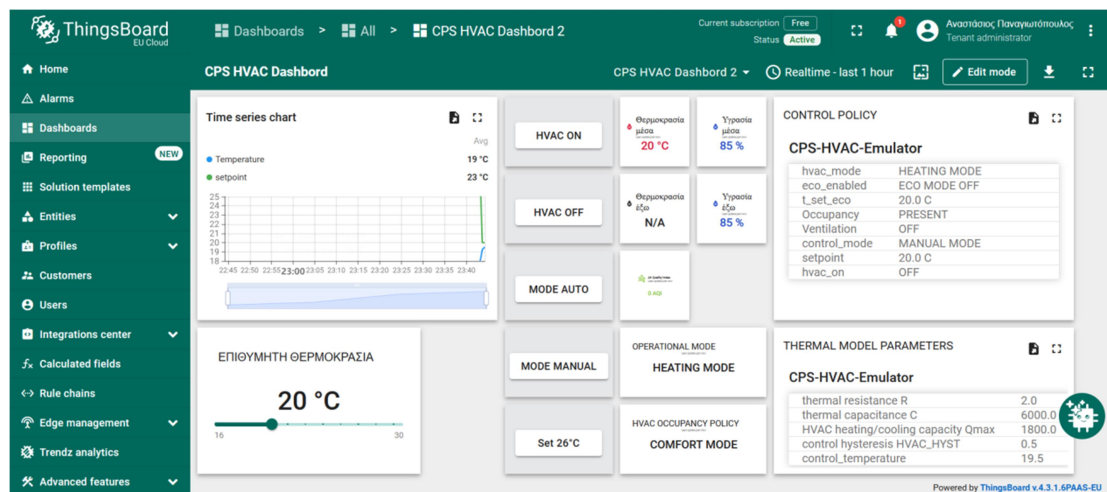
Αρχικά, μετά την εκκίνηση του συστήματος, η θερμοκρασία του μοντέλου βρισκόταν περίπου στους 18°C, δηλαδή σημαντικά χαμηλότερα από την επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης. Το σύστημα τέθηκε σε χειροκίνητη λειτουργία και το αρχικό σημείο αναφοράς ορίστηκε στα 20°C μέσω του dashboard. Με την ενεργοποίηση του HVAC, η μεταβλητή θερμικής ισχύος q_{hvac} αυξήθηκε και η θερμοκρασία του μοντέλου άρχισε να αυξάνεται σταδιακά προς τη νέα τιμή.



Εικόνα 19, 1^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα

Καθώς η θερμοκρασία προσέγγισε το πρώτο σημείο αναφοράς, ο ελεγκτής απενεργοποίησε το HVAC, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία της υστέρησης του ελέγχου.

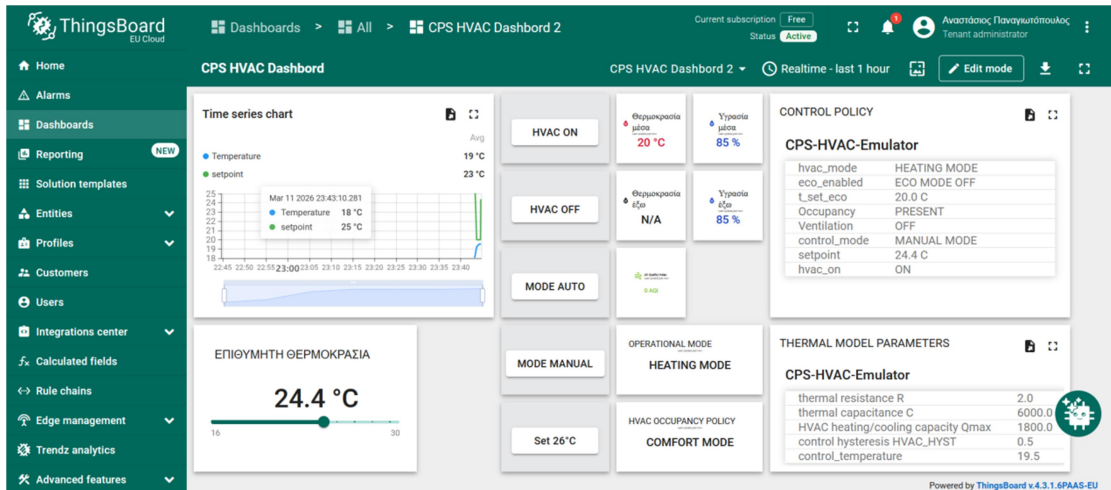
Στο δεύτερο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκε βηματική μεταβολή του setpoint, από



Εικόνα 20, 2^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα

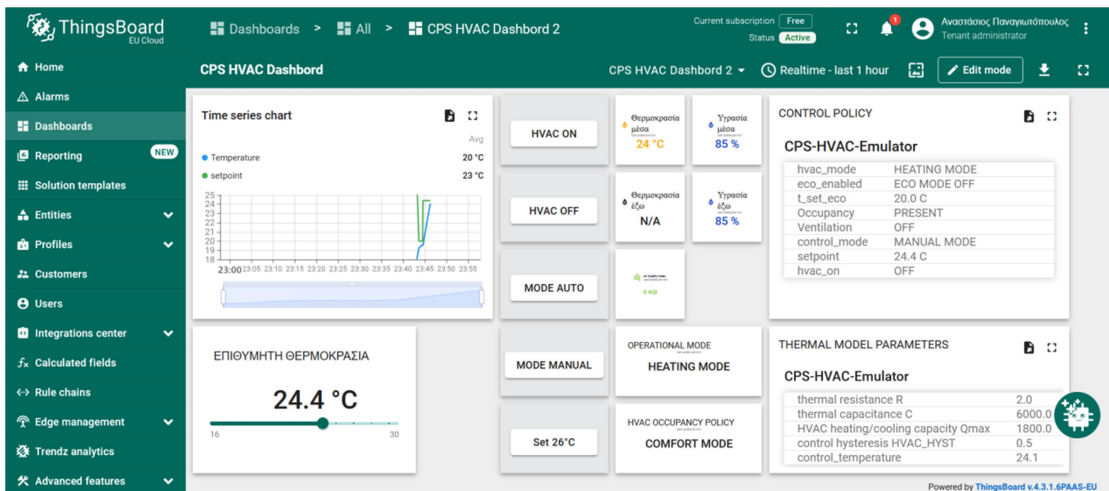
περίπου 20°C σε 24.4°C, μέσω της διεπαφής του dashboard. Η μεταβολή αυτή προκάλεσε άμεση

ενεργοποίηση του HVAC, όπως φαίνεται από την αλλαγή της μεταβλητής hvac_on σε ενεργή κατάσταση και την αύξηση της θερμικής ισχύος q_hvac.



Εικόνα 21, 3^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα

Μετά την αλλαγή του σημείου αναφοράς, η θερμοκρασία του θερμικού μοντέλου παρουσίασε σταδιακή αύξηση από περίπου 19.5°C σε 21.1°C στη συνέχεια σε 22.6°C και



Εικόνα 22, 4^ο Screenshot Dashboard για το τρίτο πείραμα

τελικά σε τιμές κοντά στους 24°C.

Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει ότι το σύστημα ανταποκρίνεται δυναμικά στη μεταβολή του setpoint και οδηγεί τη θερμοκρασία του χώρου προς τη νέα επιθυμητή τιμή.

Όταν η θερμοκρασία του μοντέλου πλησίασε επαρκώς το νέο setpoint, το HVAC απενεργοποιήθηκε ξανά, όπως υποδεικνύεται από τη μεταβλητή hvac_on. Παράλληλα, η θερμική ισχύς q_hvac μειώθηκε σταδιακά λόγω του φίλτρου πρώτης τάξης που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της θερμικής ισχύος του συστήματος.

9.4.3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν ότι το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να παρακολουθεί αποτελεσματικά μεταβολές του σημείου αναφοράς θερμοκρασίας. Η ενεργοποίηση του HVAC πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία του μοντέλου αποκλίνει επαρκώς από το setpoint, ενώ η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας αποτυπώνει τη δυναμική συμπεριφορά του θερμικού μοντέλου RC.

Η μείωση της υστέρησης του ελεγκτή συνέβαλε στη σαφέστερη απεικόνιση της απόκρισης του συστήματος, ενώ η χρήση της μεταβλητής temperature_model ως μεταβλητής ελέγχου επέτρεψε την ακριβέστερη μελέτη της θερμικής δυναμικής του μοντέλου.

Στα γραφήματα του dashboard παρατηρείται καθαρά ότι η καμπύλη της θερμοκρασίας ακολουθεί την αλλαγή του setpoint με μια ομαλή δυναμική συμπεριφορά, χαρακτηριστική ενός συστήματος πρώτης τάξης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι το θερμικό μοντέλο και η λογική ελέγχου συνεργάζονται αποτελεσματικά για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του χώρου.

9.4.3.4 Συμπέρασμα πειράματος

Το πείραμα παρακολούθησης σημείου αναφοράς κατέδειξε ότι το προτεινόμενο κυβερνοφυσικό σύστημα HVAC είναι σε θέση να προσαρμόζει τη λειτουργία του δυναμικά σε μεταβολές της επιθυμητής θερμοκρασίας. Η απόκριση του συστήματος παρουσιάζει ομαλή και σταθερή συμπεριφορά, ενώ η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του HVAC πραγματοποιείται με τρόπο που αποφεύγει έντονες ταλαντώσεις της θερμοκρασίας.

Η επιτυχής εκτέλεση του πειράματος επιβεβαιώνει τη λειτουργικότητα της υλοποιημένης αρχιτεκτονικής και την καταλληλότητα του θερμικού μοντέλου για την προσομοίωση και αξιολόγηση στρατηγικών ελέγχου σε εφαρμογές έξυπνων κτιρίων.

Συνολικά, τα πειραματικά σενάρια επιβεβαιώνουν ότι το προτεινόμενο σύστημα CPS HVAC λειτουργεί σωστά ως προς την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών, την εφαρμογή πολιτικών λειτουργίας και την προσαρμογή της θερμικής συμπεριφοράς του χώρου μέσω του μοντέλου RC. Η ενσωμάτωση αισθητήρων, μικροελεγκτή και cloud πλατφόρμας επιτρέπει την

ολοκληρωμένη εποπτεία και τον έλεγχο του συστήματος, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες των κυβερνοφυσικών συστημάτων σε εφαρμογές έξυπνων κτιρίων.

10 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

10.1 Συμπεράσματα

Από την πειραματική αξιολόγηση του συστήματος προκύπτει ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική κυβερνοφυσικού συστήματος μπορεί να υποστηρίξει βασικές λειτουργίες έξυπνης διαχείρισης ενός συστήματος HVAC. Στο πρώτο πειραματικό σενάριο επιβεβαιώθηκε η ορθή λειτουργία του μηχανισμού ανίχνευσης παρουσίας, καθώς το σύστημα προσαρμόζει δυναμικά το θερμοκρασιακό σημείο αναφοράς μεταξύ των καταστάσεων comfort και eco, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Στο δεύτερο σενάριο αποδείχθηκε η δυνατότητα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και η αυτόματη ενεργοποίηση της λειτουργίας αερισμού όταν οι συνθήκες υποβαθμίζονται, γεγονός που ενισχύει τη συνολική περιβαλλοντική ποιότητα του χώρου. Τέλος, στο τρίτο πειραματικό σενάριο εξετάστηκε η δυναμική απόκριση του συστήματος σε μεταβολές του σημείου αναφοράς θερμοκρασίας, όπου το θερμικό μοντέλο RC και ο ελεγκτής HVAC οδήγησαν σταδιακά τη θερμοκρασία του χώρου προς τη νέα επιθυμητή τιμή. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η ενσωμάτωση αισθητήρων, υπολογιστικού ελέγχου και cloud πλατφόρμας μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική βάση για την ανάπτυξη συστημάτων έξυπνης διαχείρισης κτιρίων, επιβεβαιώνοντας τον ρόλο των κυβερνοφυσικών συστημάτων στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της άνεσης των ατόμων που χρησιμοποιούν το σύστημα.

Συνολικά, η εργασία παρουσιάζει ένα λειτουργικό πρωτότυπο κυβερνοφυσικού συστήματος που συνδυάζει αισθητήρες, υπολογιστικό έλεγχο και υπηρεσίες IoT για την έξυπνη διαχείριση των εσωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών ενός χώρου.

10.2 Μελλοντική εργασία

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία ανέδειξε τη δυνατότητα υλοποίησης ενός απλού αλλά λειτουργικού κυβερνοφυσικού συστήματος για την παρακολούθηση και τον έλεγχο ενός συστήματος HVAC σε περιβάλλον έξυπνου κτιρίου. Μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων περιβάλλοντος, ενός μικροελεγκτή ESP32 και μιας πλατφόρμας Internet of Things κατέστη δυνατή η συλλογή, επεξεργασία και απομακρυσμένη εποπτεία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η εφαρμογή βασικών στρατηγικών ελέγχου της θερμοκρασίας και της ποιότητας αέρα. Τα πειραματικά σενάρια που παρουσιάστηκαν επιβεβαίωσαν τη λειτουργικότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και ανέδειξαν τις δυνατότητες των κυβερνοφυσικών συστημάτων στην ενεργειακή διαχείριση κτιρίων. Στο μέλλον, η έρευνα στον συγκεκριμένο τομέα θα μπορούσε να επεκταθεί προς την ενσωμάτωση πιο σύνθετων θερμικών μοντέλων, την εφαρμογή προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου και τη διασύνδεση με πραγματικές μονάδες HVAC. Παράλληλα, η

αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης και η ανάλυση ιστορικών δεδομένων θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πιο αποδοτικές και προσαρμοστικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας στα έξυπνα κτίρια.

11 Βιβλιογραφία

- [1] Noor Ul Huda, Ijaz Ahmed, Muhammad Adnan, Mansoor Ali, Faisal Naeem, 2024, “Experts and intelligent systems for smart homes’ Transformation to Sustainable Smart Cities: A comprehensive review”, *Expert Systems with Applications*, Volume 238, Part F, 122380.
- [2] Badis Hammi, Sherali Zeadally, Rida Khatoun, Jamel Nebhen, 2022, “Survey on smart homes: Vulnerabilities, risks, and countermeasures”, *Computers & Security*, Volume 117, 102677.
- [3] Mckoy DR, Tesiero RC, Acquaah YT, Gokaraju B., 2023, “Review of HVAC Systems History and Future Applications”, *Energies*, Volume 16, 6109.
- [4] Yixin Chen, Cheng Qian, Adamu Hussaini, Wei Yu, 2025, “Edge Intelligence in Cyber-Physical Systems”, (Academic Press)
- [5] Arindom Chakraborty, Monirul Islam, Fahim Shahriyar, Sharnali Islam, Hasan U. Zaman, Mehedi Hasan, 2023, “Smart Home System: A Comprehensive Review”, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7616683.
- [6] Orfanos V.A., Kaminaris S.D., Papageorgas, P., Piromalis D., Kandris, D., 2023, “A Comprehensive Review of IoT Networking Technologies for Smart Home Automation Applications”, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 12020030.
- [7] Alem Čolaković, Mesud Hadžialić, 2018, “Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues”, *Computer Networks*, 144.
- [8] Choudhary A., 2024, “A. Internet of Things: a comprehensive overview, architectures, applications, simulation tools, challenges and future directions”, Springer, 4.
- [9] Bellini P., Nesi P., Pantaleo G., 2022, “IoT-Enabled Smart Cities: A Review of Concepts, Frameworks and Key Technologies”, *Applied Sciences*, 12.
- [10] Md. Ohirul Qays, Iftekhhar Ahmad, Ahmed Abu-Siada, Md. Liton Hossain, Farhana Yasmin, 2023, “Key communication technologies, applications, protocols and future guides for IoT-assisted smart grid systems: A review”, *Energy Reports*, 9.
- [11] Chataut R., Phoummalayvane A., Akl R., 2023, “Unleashing the Power of IoT: A Comprehensive Review of IoT Applications and Future Prospects in Healthcare, Agriculture, Smart Homes, Smart Cities, and Industry 4.0”, *Sensors*, 23.
- [12] Nižetić S, Šolić P, López-de-Ipiña González-de-Artaza D, Patrono L, 2020, “Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future”, *PMC*, 274.
- [14] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao and Z. Liu, 2017, "Review on cyber-physical systems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4.
- [15] Oks S.J., Jalowski M., Lechner M., 2024, “Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook”, *Inf Syst Front*, 26.

- [16] Sita Rani, Aman Kataria, Sachin Kumar, Vinod Karar, 2025, “A new generation cyber-physical system: A comprehensive review from security perspective”, *Computers & Security*, Volume 148.
- [17] Nounou, A., Jaber, H., & Aydin, R., 2022, “A cyber-physical system architecture based on lean principles for managing industry 4.0 setups”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35.
- [18] Awseef Ayoub Shaikh, Tabasum Rasool, Prabal Verma, 2023, “Machine intelligence and medical cyber-physical system architectures for smart healthcare: Taxonomy, challenges, opportunities, and possible solutions”, *Artificial Intelligence in Medicine*, 146.
- [19] Werner Damm, David Hess, Mark Schweda, Janos Sztipanovits, Klaus Bengler, Bianca Biebl, Martin Fränzle, Willem Hagemann, Moritz Held, Klas Ihme, 2024, “A Reference Architecture of Human Cyber-Physical Systems – Fundamental Concepts”, *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 8.
- [20] B. A. Salau, A. Rawal and D. B. Rawat, 2022, "Recent Advances in Artificial Intelligence for Wireless Internet of Things and Cyber-Physical Systems: A Comprehensive Survey," *Internet of Things Journal*, vol. 9.
- [21] Z. Yu, H. Gao, X. Cong, N. Wu and H. H. Song, 2023, “A Survey on Cyber-Physical Systems Security”, *Internet of Things Journal*, 10.
- [22] Mariana Segovia-Ferreira, Jose Rubio-Hernan, Ana Cavalli, Joaquin Garcia-Alfaro, 2024, “A Survey on Cyber-Resilience Approaches for Cyber-Physical Systems”, *ACM Computing Surveys*, 8.
- [23] Lu C., Zou Q., Zhou, J., 2025, “Toward a modeling and analysis method of cyber-physical systems architecture evolution based on bigraph”, *scientific reports*, 15.
- [24] Dragos Mocrii, Yuxiang Chen, Petr Musilek, 2018, “IoT-based smart homes: A review of system architecture, software, communications, privacy and security”, *Internet of Things*, 1–2.
- [25] Rijah Muhammed, Mohamed Riyath, Mohamed Ismail, “IoT Application in Smart Home: A Systematic Literature Review”, Sri Lanka German Training Institute.
- [26] R. Sivapriyan, Rao, K, Harijyothi M., 2020, “Literature Review of IoT based Home Automation System”, *IEEE Fourth International Conference on Onventive Systems and Control*, 101-105.
- [27] Davit Marikyan, Savvas Papagiannidis, Eleftherios Alamanos, 2019, “A systematic review of the smart home literature: A user perspective”, *Technological Forecasting and Social Change*, 138.
- [28] Vardakis G., Hatzivasilis G., Koutsaki E., Papadakis N., 2024, “Review of Smart-Home Security Using the Internet of Things”. *Electronics*, 13.

- [29] A. Hasan, S. Hasanuzzaman et al., 2018, “Energy consumption and thermal comfort analysis of HVAC systems in residential buildings”, *Energy and Buildings*, 171.
- [30] M. Santamouris, 2021, “Advances in HVAC technologies for buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140.
- [31] J. B. Heywood, , 2018 “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill.
- [32] O. Heiselberg et al., 2017, “Ventilation and Indoor Climate”, *Energy and Buildings*, 154.
- [33] D. Mumovic, A. Santamouris, , 2018 “Air Conditioning Systems”, Springer.
- [34] A. E. Kabeel et al., 2020, “Performance analysis of heat pump systems”, *Renewable Energy*, 145.
- [35] X. Zhou, B. Dong, 2020, “Innovative heat recovery HVAC systems: A review”, *Energy Reports*, 6.
- [36] R. Zmeureanu, 2015, “Zoning control strategies in HVAC systems,” *Building Services Engineering Research and Technology*, 36.
- [37] M. Wetter et al., 2018, “Model Predictive Control for HVAC systems”, *Journal of Building Performance Simulation*, 11.
- [38] X. Liu, 2017, “Intelligent control strategies for HVAC systems” *Applied Energy*, 190.
- [39] Z. Ma, M. Wang, 2020, “Sensors in HVAC control: review and outlook” *Sensors*, 20.
- [40] P. Andersen, H. Zhang, 2019, “Energy savings of smart HVAC systems”, *Applied Thermal Engineering*, 162.
- [41] C. Koliass et al., 2020, “Cyber-security challenges in IoT HVAC systems”, *IEEE Access*, 8.
- [41] G. Fortino et al., , 2018 “IoT interoperability in smart buildings,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 116, pp. 1-15.
- [42] Y. Zhang, 2020, “Edge computing for HVAC real-time control”, *IEEE Internet of Things Journal*, 7.
- [43] Baheti R., Gill H., 2011, “The Impact of Control Technology”, “*Cyber-physical systems*, 12(1).
- [44] Gungor V. C., Hancke G. P., et al., 2010, “Smart grid technologies: Communication technologies and standards”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4).
- [45] Lee E. A., 2008, “Cyber Physical Systems: Design challenges”. 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing, 363–369.
- [46] Lee E. A., Seshia S. A., 2017, “Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach”, MIT Press.
- [47] Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic J., 2010, “Cyber-physical systems: The next computing revolution”, 731–736.

[48] Mathews E.H., Richards P.G., Lombard C., 1994, “A first-order thermal model for building design”, “Energy and Buildings”, 21, 133-145.

Παράρτημα Α: «Κώδικας προσομοίωσης»

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include "DHT.h"
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#define MQ135_PIN 34
#define DHTPIN_IN 15
#define DHTPIN_OUT 19
#define DHTTYPE DHT22
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define PIR_PIN 4
#define OLED_BTN_PIN 18
// WiFi
const char* WIFI_SSID = "Wokwi-GUEST";
const char* WIFI_PASS = "";
// ThingsBoard MQTT
const char* TB_HOST = "eu.thingsboard.cloud";
const int TB_PORT = 1883;
const char* TB_TOKEN = "yq45t62fHMxGOFwAI026";
const unsigned long STARTUP_IGNORE_PRESENCE_MS = 10000; // 10 s

// Thermal model
float T = 21.0; // room temperature model (indoor)
float T_out = 25.0; // active outside temperature used by the model
float T_set = 25.0; // active setpoint
float R = 2.0;
float C = 6000.0;
float Qmax = 1800.0;
float Q_hvac = 0.0;
bool hvac_on = false;
float air_quality = 0.0;
unsigned long lastStep = 0;
```

```
unsigned long lastSend = 0;
unsigned long lastOled = 0;
volatile bool forceSend = false;
enum ControlMode { MODE_AUTO, MODE_MANUAL };
ControlMode mode = MODE_AUTO;
// Eco mode
bool eco_enabled = true;
float T_set_comfort = 25.0;
float T_set_eco = 20.0;
unsigned long lastMotionMs = 0;
//const unsigned long PRESENCE_HOLD_MS = 30000;
const unsigned long PRESENCE_HOLD_MS = 10000;
bool presence_logic = false;
enum HvacMode { HVAC_HEAT, HVAC_COOL };
HvacMode hvac_mode = HVAC_HEAT;
float T_set_comfort_heat = 25.0;
float T_set_eco_heat = 20.0;
float T_set_comfort_cool = 25.0;
float T_set_eco_cool = 28.0;
bool vent_on = false;
// Ventilation thresholds with hysteresis
const float AIR_QUALITY_VENT_ON = 200.0;
const float AIR_QUALITY_VENT_OFF = 150.0;
// Hysteresis for AUTO logic
const float HVAC_HYST = 1.5;
//αρχικές τιμές από εξωτερικής εσωτερικής θερμοκρασίας υγρασίας
float humidity_in = -1;
float temperature_in = -1000;
float humidity_out = -1;
float temperature_out_sensor = -1000;
float T_ctrl;
//oled παράμετροι για απεικόνιση σε περισσότερες από μια οθόνες
int oledPage = 0;
unsigned long lastOledPageChange = 0;
const unsigned long OLED_PAGE_INTERVAL = 3000;
const int OLED_PAGE_COUNT = 3;
```

```
bool oledAutoRotate = true;
bool lastButtonState = HIGH;
unsigned long lastDebounceTime = 0;
const unsigned long debounceDelay = 50;

WiFiClient espClient;
PubSubClient mqtt(espClient);
// Two DHT sensors
DHT dhtIn(DHTPIN_IN, DHTTYPE);
DHT dhtOut(DHTPIN_OUT, DHTTYPE);
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);
void connectWiFi() {
  Serial.print("Connecting to WiFi");
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nWiFi connected!");
  Serial.print("IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}
void connectThingsBoard() {
  while (!mqtt.connected()) {
    Serial.print("Connecting to ThingsBoard MQTT...");
    if (mqtt.connect("ESP32EmuClient", TB_TOKEN, NULL)) {
      mqtt.subscribe("v1/devices/me/rpc/request/+");
      Serial.println("OK!");
    } else {
      Serial.print("FAILED, rc=");
      Serial.print(mqtt.state());
      Serial.println(" retry in 2s");
      delay(2000);
    }
  }
}
```

```
void updateOLED(float temperature_in, float temperature_out_sensor, float T_show, float hum_in,
float T_set, bool hvac_on, bool vent_on, bool presence, float T_out_active, ControlMode mode) {
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0,0);
    if (oledPage == 0) {
        // ===== SCREEN 1 : ENVIRONMENT =====
        display.println("ENVIRONMENT");
        display.print("Tin : ");
        display.print(temperature_in,1);
        display.println(" C");
        display.print("Tout: ");
        display.print(temperature_out_sensor,1);
        display.println(" C");
        display.print("Hum : ");
        display.print(hum_in,0);
        display.println(" %");
        display.print(" AirQ: ");
        display.println(air_quality,0);
        display.print("PIR : ");
        display.println(presence ? "1" : "0");
    }
    else if (oledPage == 1) {
        // ===== SCREEN 2 : HVAC =====
        display.println("HVAC STATUS");
        display.print("Setpoint: ");
        display.println(T_set,1);
        display.print("HVAC: ");
        display.println(hvac_on ? "ON" : "OFF");
        display.print("Mode: ");
        display.println(mode == MODE_AUTO ? "AUTO" : "MANUAL");
        display.print("HMode: ");
        display.println(hvac_mode == HVAC_HEAT ? "HEAT" : "COOL");
        display.print("Vent: ");
        display.println(vent_on ? "ON" : "OFF");
    }
    else if (oledPage == 2) {
```

```
display.println("MODEL STATE");
display.print("Tmod : ");
display.print(T_show,1);
display.println(" C");
display.print("ToutA: ");
display.print(T_out_active,1);
display.println(" C");

display.print("Qhvac: ");
display.println(Q_hvac,0);
display.print("Eco : ");
display.println(eco_enabled ? "ON" : "OFF");
display.print("Pg : 3/3");
display.println(oledAutoRotate ? " A" : " M");
}
display.display();
}
void rpcCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
String msg;
for (int i = 0; i < length; i++) {
msg += (char)payload[i];
}
Serial.print("RPC received: ");
Serial.println(msg);
if (msg.indexOf("mode") >= 0) {
if (msg.indexOf("AUTO") >= 0) mode = MODE_AUTO;
if (msg.indexOf("MANUAL") >= 0) mode = MODE_MANUAL;
}
if (msg.indexOf("\method\":"setpoint\")== 0) {
float newSet = NAN;

int vPos = msg.indexOf("\value\");
if (vPos >= 0) {
int colon = msg.indexOf(":", vPos);
int end1 = msg.indexOf("}", colon);
int end2 = msg.indexOf(",", colon);
```

```
int end = (end2 > 0 && end2 < end1) ? end2 : end1;
String valueStr = msg.substring(colon + 1, end);
valueStr.trim();
newSet = valueStr.toFloat();
} else {
int pPos = msg.indexOf("\"params\"");
if (pPos >= 0) {
int colon = msg.indexOf(":", pPos);
int end1 = msg.indexOf("}", colon);
int end2 = msg.indexOf(",", colon);
int end = (end2 > 0 && end2 < end1) ? end2 : end1;
String valueStr = msg.substring(colon + 1, end);
valueStr.trim();
newSet = valueStr.toFloat();
}
}
if (!isnan(newSet) && newSet > 0.0f) {
if (mode == MODE_MANUAL) {
T_set = newSet;
Serial.print("Manual setpoint updated: ");
Serial.println(T_set);
} else {
Serial.println("Ignored slider setpoint in AUTO mode");
}
forceSend = true;
}
if (msg.indexOf("hvac_on") >= 0) {
if (msg.indexOf("true") >= 0) {
mode = MODE_MANUAL;
hvac_on = true;
} else {
hvac_on = false;
}
Serial.print("Manual HVAC: ");
Serial.println(hvac_on);
}
```

```
forceSend = true;
}
}
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  connectWiFi();
  mqtt.setServer(TB_HOST, TB_PORT);
  mqtt.setBufferSize(512);
  mqtt.setCallback(rpcCallback);
  connectThingsBoard();
  dhtIn.begin();
  dhtOut.begin();
  pinMode(PIR_PIN, INPUT_PULLDOWN);
  pinMode(OLED_BTN_PIN, INPUT_PULLUP);
  Wire.begin(21, 22);
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println("SSD1306 allocation failed");
    for (;;) delay(10);
  }
  lastMotionMs = millis() - PRESENCE_HOLD_MS;
  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(1);
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setCursor(0, 0);
  display.println("CPS HVAC Demo");
  display.display();
  delay(800);
}
void loop() {
  int mq_raw = analogRead(MQ135_PIN);
  bool pirRaw = digitalRead(PIR_PIN);
  if (pirRaw) {
    lastMotionMs = millis();
  }

  presence_logic = (millis() - lastMotionMs) < PRESENCE_HOLD_MS;
```

```
if (!mqtt.connected()) connectThingsBoard();
mqtt.loop();
// ===== OLED button handling =====
bool reading = digitalRead(OLED_BTN_PIN);
if (reading != lastButtonState) {
  lastDebounceTime = millis();
}
if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay) {
  static bool buttonHandled = false;
  if (reading == LOW && !buttonHandled) {
    buttonHandled = true;
    oledPage++;
    if (oledPage >= OLED_PAGE_COUNT) oledPage = 0;
    oledAutoRotate = false;
    lastOledPageChange = millis();
    Serial.print("OLED page changed to: ");
    Serial.println(oledPage);
  }
  if (reading == HIGH) {
    buttonHandled = false;
  }
}
lastButtonState = reading;
// ===== Sensor reads =====
humidity_in = dhtIn.readHumidity();
if (isnan(humidity_in)) humidity_in = -1;
temperature_in = dhtIn.readTemperature();
if (isnan(temperature_in)) temperature_in = -1000;
// στο AUTO mode χρησιμοποιούμε το μοντέλο
if (mode == MODE_AUTO) {
  temperature_in = T;
}
humidity_out = dhtOut.readHumidity();
if (isnan(humidity_out)) humidity_out = -1;
temperature_out_sensor = dhtOut.readTemperature();
if (isnan(temperature_out_sensor)) temperature_out_sensor = -1000;
```

```
// Fallback: update T_out only if outdoor DHT is valid
if (temperature_out_sensor > -100.0) {
    T_out = temperature_out_sensor;
} else {
    Serial.println("Outdoor DHT invalid, keeping previous T_out");
}
// ===== Eco logic =====
if (mode == MODE_AUTO) {
    if (!presence_logic) {
        eco_enabled = false;
    } else {
        eco_enabled = true;
        // eco_enabled = true;
    }
    if (eco_enabled) {
        T_set = presence_logic ? T_set_comfort : T_set_eco;
    }
}
// ===== AUTO / MANUAL control temperature =====
if (mode == MODE_AUTO) {
    T_ctrl = T; // thermal model
} else {
    T_ctrl = temperature_in; // πραγματικός αισθητήρας
}
// ===== HVAC decision =====
if (T_ctrl < T_set - HVAC_HYST) {
    hvac_mode = HVAC_HEAT;
    hvac_on = true;
} else if (T_ctrl > T_set + HVAC_HYST) {
    hvac_mode = HVAC_COOL;
    hvac_on = true;
} else {
    hvac_on = false;
}
float Q_cmd = 0.0;
if (hvac_on) {
```

```
Q_cmd = (hvac_mode == HVAC_HEAT) ? +Qmax : -Qmax;
}

air_quality = (float)map(mq_raw, 0, 4095, 0, 500);
if (!vent_on && air_quality > AIR_QUALITY_VENT_ON) {
    vent_on = true;
} else if (vent_on && air_quality < AIR_QUALITY_VENT_OFF) {
    vent_on = false;
}
float alpha = 0.10;
Q_hvac = Q_hvac + alpha * (Q_cmd - Q_hvac);
float dt = 1.0;
float dT = (((T_out - T) / R) + Q_hvac) / C;
T = T + dt * dT;
// ===== OLED update =====
if (millis() - lastOled >= 1000) {
    lastOled = millis();
    if (oledAutoRotate && (millis() - lastOledPageChange > OLED_PAGE_INTERVAL)) {
        lastOledPageChange = millis();
        oledPage++;
        if (oledPage >= OLED_PAGE_COUNT) oledPage = 0;
    }
    updateOLED(temperature_in, temperature_out_sensor, T, humidity_in, T_set, hvac_on,
    vent_on, presence_logic, T_out, mode);
}
// ===== Telemetry send =====
if (forceSend || (millis() - lastSend >= 5000)) {
    forceSend = false;
    lastSend = millis();
    String payload = "{}";
    payload += "\"presence\": " + String(presence_logic ? 1 : 0) + ",";
    payload += "\"eco_enabled\": " + String(eco_enabled ? 1 : 0) + ",";
    payload += "\"t_set_comfort\": " + String(T_set_comfort, 1) + ",";
    payload += "\"t_set_eco\": " + String(T_set_eco, 1) + ",";
    payload += "\"temperature_model\": " + String(T, 2) + ",";
    payload += "\"temperature_indoor\": " + String(temperature_in, 2) + ",";
```

```
payload += "\"humidity_indoor\":" + String(humidity_in, 2) + ",";
payload += "\"temperature_out_sensor\":" + String(temperature_out_sensor, 2) + ",";
payload += "\"humidity_outdoor\":" + String(humidity_out, 2) + ",";
payload += "\"t_out_active\":" + String(T_out, 2) + ",";
payload += "\"setpoint\":" + String(T_set, 2) + ",";
payload += "\"hvac_on\":" + String(hvac_on ? 1 : 0) + ",";
payload += "\"vent_on\":" + String(vent_on ? 1 : 0) + ",";
payload += "\"air_quality\":" + String(air_quality, 1) + ",";
payload += "\"hvac_mode\":" + String(hvac_mode == HVAC_HEAT ? 0 : 1) + ",";
payload += "\"control_mode\":" + String(mode == MODE_AUTO ? 0 : 1) + ",";
payload += "\"control_temperature\":" + String(T_ctrl, 1) + ",";
payload += "\"R\":" + String(R, 1) + ",";
payload += "\"C\":" + String(C, 1) + ",";
payload += "\"Qmax\":" + String(Qmax, 1) + ",";
payload += "\"HVAC_HYST\":" + String(HVAC_HYST, 1) + ",";
payload += "\"q_hvac\":" + String(Q_hvac, 1);
payload += "}\"";
mqtt.publish("v1/devices/me/telemetry", payload.c_str());
Serial.println(payload);
}
}
```

Παράρτημα Β: «dataset πειραματικών αξιολογήσεων»

Πείραμα 1

1^ο dataset πειράματος 1

```
{"presence":0,"eco_enabled":0,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":21.03,  
"temperature_indoor":21.00,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":1,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":0,"control_temperature":21.0,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":1.5,"q_hvac":180.0}
```

2^ο dataset πειράματος 1

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":23.54,  
"temperature_indoor":23.55,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":0,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":0,"control_temperature":23.5,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":1.5,"q_hvac":0.0}
```

3^ο dataset πειράματος 1

```
{"presence":0,"eco_enabled":0,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":23.72,  
"temperature_indoor":23.71,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":0,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":0,"control_temperature":23.7,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":1.5,"q_hvac":45.8}
```

Πείραμα 2

1^ο dataset πειράματος 2

```
{"presence":0,"eco_enabled":0,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":21.03,  
"temperature_indoor":21.00,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":1,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":0,"control_temperature":21.0,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":1.5,"q_hvac":180.0}
```

2^ο dataset πειράματος 2

```
{"presence":0,"eco_enabled":0,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":23.51,  
"temperature_indoor":23.51,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":0,"vent_on":1,"air_quality":263.0}
```

```
,"hvac_mode":0,"control_mode":0,"control_temperature":23.5,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0  
,"HVAC_HYST":1.5,"q_hvac":0.0}
```

Πείραμα 3

1ο dataset πειράματος 3

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":18.03,  
"temperature_indoor":18.00,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":1,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":0,"control_temperature":18.0,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":0.5,"q_hvac":180.0}
```

Mode set to MANUAL

2ο dataset πειράματος 3

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":18.33,  
"temperature_indoor":19.50,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":25.00,"hvac_on":1,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":1,"control_temperature":18.3,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":0.5,"q_hvac":1800.0}
```

2ο dataset πειράματος 3

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":19.23,  
"temperature_indoor":19.50,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":20.00,"hvac_on":1,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":1,"control_temperature":19.2,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":0.5,"q_hvac":1800.0}
```

3ο dataset πειράματος 3

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":19.52,  
"temperature_indoor":19.50,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":20.00,"hvac_on":0,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":1,"control_temperature":19.5,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":0.5,"q_hvac":0.0}
```

4ο dataset πειράματος 3

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":19.52,  
"temperature_indoor":19.50,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":24.40,"hvac_on":1,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h
```

```
vac_mode":0,"control_mode":1,"control_temperature":19.5,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":0.5,"q_hvac":180.0}
```

5ο dataset πειράματος 3

```
{"presence":1,"eco_enabled":1,"t_set_comfort":25.0,"t_set_eco":20.0,"temperature_model":24.07,  
"temperature_indoor":19.50,"humidity_indoor":85.00,"temperature_out_sensor":12.70,"humidity_  
outdoor":85.00,"t_out_active":12.70,"setpoint":24.40,"hvac_on":0,"vent_on":0,"air_quality":0.0,"h  
vac_mode":0,"control_mode":1,"control_temperature":24.1,"R":2.0,"C":6000.0,"Qmax":1800.0,"  
HVAC_HYST":0.5,"q_hvac":1620.0}
```

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.