



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάλυση Τάσεων και Πρόγνωση Μελλοντικής Κατάστασης Συσκευών στα Άκρα του δικτύου με χρήση Digital Twins

Μελέτη και υλοποίηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΗΣΤΟΥ



Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής

Αθήνα, Ιανουάριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάλυση Τάσεων και Πρόγνωση Μελλοντικής Κατάστασης Συσκευών στα Άκρα του δικτύου με χρήση Digital Twins

Μελέτη και υλοποίηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΗΣΤΟΥ

Επιβλέπων: Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8η Ιανουαρίου 2024.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Καθηγητής

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Αθήνα, Ιανουάριος 2024



Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Νικολόπουλος Χρήστος, 2024.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....
Νικολόπουλος Χρήστος

1 Ιανουαρίου 2024

Περίληψη

Το Ψηφιακό δίδυμο (Digital twin) είναι το ψηφιακό μοντέλο ενός φυσικού αντικειμένου που προσφέρει ποικίλες υπηρεσίες και έρχεται να αναβαθμίσει τον τρόπο εργασίας σε πολλούς τομείς, όπως στη βιομηχανία και στο σύστημα υγείας. Σε αυτό το πλαίσιο, στόχος της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη και αναλυτική παρουσίαση μίας ολοκληρωμένης λύσης για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη της επόμενης κατάστασης ενός ορόφου γραφείων που αποτελείται από τέσσερα δωμάτια, με τη βοήθεια συσκευών στα άκρα του δικτύου και μέσω της τεχνικής των Digital twins. Στην εργασία αυτή, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας του Digital twin, που σαν ιδέα με τον τίτλο αυτόν πρωτοεμφανίστηκε το 2010, οι προσπάθειες προτυποποίησης της ιδέας από οργανισμούς και η υπάρχουσα βιβλιογραφία (θεωρητική και από πρακτικές εργασίες). Ύστερα, καταγράφονται υποψήφια τεχνολογίες απαραίτητες για την υλοποίηση, όπως πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη λήψη δεδομένων από τις συσκευές και αλγόριθμοι πρόβλεψης. Πρακτικά, συλλέγονται περιβαλλοντικά δεδομένα από τα σημεία μετρήσεων, τα οποία υλοποιούνται με αισθητήρες συνδεδεμένους σε πλακέτες ανάπτυξης ESP32. Έτσι, με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου MQTT και του λογισμικού Eclipse Ditto, προσφέρεται στον χρήστη μια σειρά υπηρεσιών, όπως οπτική αναπαράσταση των δεδομένων, μέθοδοι πρόβλεψης της κατάστασης του δωματίου και ειδοποιήσεις στην περίπτωση ανίχνευσης ακραίων μετρήσεων. Τα γραφήματα διατίθενται μέσω της χρησιμοποιούμενης βάσης δεδομένων InfluxDB, ενώ για τις προβλέψεις χρησιμοποιείται το μοντέλο Prophet. Επιπροσθέτως, αναλύονται τρόποι βελτίωσης της μεθόδου πρόβλεψης και εξάγονται ποσοτικά (μέση τιμή, διασπορά κτλ) και ποιοτικά συμπεράσματα από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Συμπερασματικά, διαπιστώνεται η πληθώρα επιλογών στην υλοποίηση του Digital twin και επιβεβαιώνονται τα θεωρητικά οφέλη.

Λέξεις Κλειδιά

Διαδίκτυο των αντικειμένων, Μέθοδοι προσομοίωσης, Πρόβλεψη, Χρονοσειρές, Digital twin, Eclipse Ditto, MQTT

Abstract

The Digital Twin is the digital model of a physical object that offers a variety of services and comes to upgrade the working method in a range of sectors, such as the industry and health care. In this context, the aim of this diploma thesis is the development and analytical presentation of an integrated solution for monitoring and predicting the next state of an office floor consisting of four rooms, with the help of devices at the network edge and through the technique of Digital twins. In this thesis, the principles of operation of Digital twin, which as an idea with this title first appeared in 2010, the efforts to standardize the idea by organizations and the existing literature (theoretical and practical work) are analyzed. Then, candidate technologies necessary for implementation are recorded, such as communication protocols for receiving data from devices and prediction algorithms. In practice, environmental data are collected from the measuring points, which are implemented with sensors connected to ESP32 development boards. Thus, with the help of the MQTT protocol and the Eclipse Ditto software, a range of services is offered to the user, such as visual representation of the data, methods for predicting the state of the room and alerts in case of detection of extreme measurements. The graphs are available through the used InfluxDB database, while the Prophet model is used for predictions. In addition, ways to improve the forecasting method are analyzed and quantitative (mean, standard deviation, etc.) and qualitative conclusions are drawn from the collected data. In conclusion, the plethora of options in the implementation of Digital twin is identified and the theoretical benefits are confirmed.

Keywords

Internet of Things, Simulation methods, Forecasting, Time series, Digital twin, Eclipse Ditto, MQTT

στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η καθοδήγηση και υποστήριξή τους συνέβαλε καταλυτικά.

Καταρχάς, ευχαριστώ και εκτιμώ τον επιβλέπων μου, κ. Συμεών Παπαβασιλείου, για το άμεσο ενδιαφέρον του και που μου έδωσε την ευκαιρία να πραγματοποιήσω τη εργασία στο εργαστήριο Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων Τηλεματικής της σχολής. Επίσης, ευχαριστώ τον Κωνσταντίνο Τσιπσεκλή και τον Αναστάσιο Ζαφειρόπουλο, μεταδιδακτορικοί ερευνητές του εργαστηρίου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τις προτάσεις και τη βοήθειά τους κατά τη φάση της έρευνας. Η αφοσίωσή τους συνέβαλε σημαντικά στην επιτυχία του έργου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη συμπαράσταση κάθε επιπέδου που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Ιανουάριος 2024

Νικολόπουλος Χρήστος

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	7
1 Εισαγωγή	17
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	18
1.2 Οργάνωση του τόμου	18
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	19
2.1 Μέθοδοι προσομοίωσης εξοπλισμού	19
2.1.1 Προσομοίωση με μοντέλο	19
2.1.2 Digital Twin	19
Αρχή λειτουργίας	19
Προσπάθειες προτυποποίησης	20
Σύγκριση με τη μέθοδο προσομοίωσης με μοντέλο	22
Σχετική Βιβλιογραφία	23
2.2 Πρωτόκολλα επικοινωνίας	25
2.2.1 AMQP	25
2.2.2 Bluetooth & BLE	25
2.2.3 Κυψελωτή τηλεφωνία	26
2.2.4 CoAP	26
2.2.5 DDS	26
2.2.6 LoRa & LoRaWAN	26
2.2.7 LWM2M	26
2.2.8 MQTT	26
2.2.9 Wi-Fi	26
2.2.10XMPP	27
2.2.11Zigbee	27
2.2.12Z-Wave	27
2.3 Αλγόριθμοι πρόβλεψης	27
2.3.1 Αφελείς μέθοδοι	28
2.3.2 Γραμμική παλινδρόμηση	28
2.3.3 Κλασσικές μέθοδοι	28
Μέθοδοι εκθετικής εξομάλυνσης	29

Αυτοπαλίνδρομος ολοκληρωμένος κινούμενος μέσος όρος - ARIMA . . .	29
Εποχικό ARIMA	30
2.3.4 Prophet	30
2.3.5 LSTM	30
2.3.6 CNN	31
3 Πειράματα και αποτίμηση	33
3.1 Η υλοποίηση: στόχος και περιγραφή	33
3.2 Απαιτούμενο υλικό	33
3.3 Χωρισμός σε δωμάτια	34
3.4 Λογισμικό	34
3.5 Η λειτουργία κάθε σημείου μέτρησης	36
3.6 Η διεπαφή του χρήστη	41
3.7 Η διαδικασία της πρόβλεψης	43
3.7.1 Η μεθοδολογία δημιουργίας των προβλέψεων	43
3.7.2 Η εκπαίδευση του μοντέλου	44
3.7.3 Μειτρικές επίδοσης	45
3.7.4 Βελτίωση της τεχνικής πρόβλεψης	46
3.8 Αποτελέσματα	50
4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις	57
4.1 Συμπεράσματα	57
4.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	57
Παραρτήματα	59
Βιβλιογραφία	63
Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	65
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	67

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Αναπαράσταση μίας συσκευής με Digital Twin [1]	21
2.2	Χρήση περισσότερων συσκευών [1]	21
2.3	Η βασική μορφή ενός RNN	30
3.1	Η αρχιτεκτονική της υλοποίησης. Οι 7 πλακέτες επισημαίνονται στο κάτω μέρος.	36
3.2	Το κύκλωμα για καθένα από τα τέσσερα σημεία του γραφείου.	38
3.3	Το κύκλωμα για το δωμάτιο συναντήσεων. Σημειώνεται ότι τα LEDs έχουν συνδεθεί στα υπόλοιπα κυκλώματα.	39
3.4	Το κύκλωμα στο δωμάτιο της κουζίνας.	40
3.5	Το κύκλωμα για το δωμάτιο με τους servers.	41
3.6	Παράδειγμα πρόβλεψης με το μοντέλο SARIMA.	48
3.7	Η μορφή του συνόλου των συλλεγμένων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση. Ο άξονας y μετράει φωτεινότητα και ο άξονας x ώρας της ημέρας.	49
3.8	Οι σειρές θερμοκρασίας για τα τρία σημεία μέτρησης. Έχουν παραχθεί με εφαρμογή κινούμενου μέσου όρου ανά μία ώρα.	50
3.9	Οι σειρές υγρασίας για τα τρία σημεία μέτρησης. Όμοια με τις σειρές θερμοκρασίας, έχουν παραχθεί με εφαρμογή κινούμενου μέσου όρου ανά μία ώρα.	51
3.10	Οι σειρές θερμοκρασίας και υγρασίας (με μωβ χρώμα) του δωματίου συναντήσεων σε σχέση με το επίπεδο θορύβου (με μπλε χρώμα). Το επίπεδο θορύβου έχει ενισχυθεί για να ταιριάζει στο εύρος τιμών της κάθε ατμοσφαιρικής μέτρησης, για λόγους εύκολης σύγκρισης.	53
3.11	Η σειρά του επιπέδου φωτός (με μπλε) στο δωμάτιο του server σε σχέση με τη θερμοκρασία (με μωβ, σε °C) και την υγρασία (με πορτοκαλί ως RH). Στη σειρά του φωτός έχει εφαρμοστεί παράγοντας εξασθένισης με τιμή 10.	54
3.12	Μεγέθυνση του γραφήματος 3.11 κοντά στην υψηλότερη κορυφή της χρονοσειράς του φωτός.	55

Κατάλογος Εικόνων

3.1	Η κύρια σελίδα του Eclipse Ditto. Έχει επιλεγθεί το δεύτερο σημείο στον χώρο των γραφείων (<code>my.esp32:office_room_sensor2</code>).	35
3.2	Στιγμιότυπο χρήσης των dashboards στη βάση δεδομένων InfluxDB.	35
3.3	Η μορφή του frontend. Η περισσότερη έμφαση έχει δοθεί στη λειτουργικότητά του.	42
3.4	Ο πίνακας ελέγχου "Temperature & Humidity by room".	43
3.5	Παράδειγμα πρόβλεψης του μελλοντικού φωτισμού στο δωμάτιο συναντήσεων από το μοντέλο. Με μπλε χρώμα είναι οι τιμές που καταγράφονται από τον αισθητήρα και με μωβ η πρόβλεψη.	44

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Μέθοδοι εκθετικής εξομάλυνσης, ανάλογα με την αντιμετώπιση της τάσης και της εποχικότητας. Συμβολισμός: "0" = δε λαμβάνεται υπόψη, "+" = προσθετική μέθοδος, "*" = πολλαπλασιαστική μέθοδος.	29
3.1	Η λίστα με τα thingId που χρησιμοποιούνται	37
3.2	Η λίστα των απαιτήσεων από κάθε σημείο μέτρησης.	41
3.3	Οι τελικές ρυθμίσεις για τα μοντέλα πρόβλεψης. Στην τελευταία στήλη, η πρώτη τιμή είναι το κάθε πότε λαμβάνεται ο μέσος όρος και η δεύτερη η μετατόπιση του παραθύρου, σε λεπτά (m).	45
3.4	Το σύνολο τιμών για κάθε παράμετρο που θα δοκιμαστεί εκ νέου μέσω διασταυρούμενης επικύρωσης.	47
3.5	Τα στατιστικά χαρακτηριστικά για κάθε σειρά θερμοκρασίας στα τρία σημεία μέτρησης. Εμφανίζονται η εξάπλωση, η μέση τιμή, η διασπορά και η ασυμμετρία.	51
3.6	Τα στατιστικά χαρακτηριστικά για κάθε σειρά υγρασίας στα τρία σημεία μέτρησης. Όπως και για τη θερμοκρασία, εμφανίζονται η εξάπλωση, η μέση τιμή, η διασπορά και η ασυμμετρία.	51

Εισαγωγή

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things) είναι μία αναδυόμενη τάση εξέλιξης της τεχνολογίας, κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας, που υπόσχεται να φέρει επανάσταση στον τρόπο που εργαζόμαστε [2]. Αντιπροσωπεύει τη διασύνδεση των φυσικών αντικειμένων, όπως προϊόντων, οχημάτων, βιομηχανικών εξαρτημάτων και αντικειμένων καθημερινής χρήσης μέσω του παγκόσμιου ιστού. Παράλληλα, ενσωματώνονται λειτουργίες ανάλυσης στα δεδομένα που συλλέγονται με στόχο την εξυπνότερη διαχείριση. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιείται πλήθος συσκευών στα άκρα του δικτύου, δηλαδή συσκευές ενσωματωμένες στα αντικείμενα που παρακολουθούνται με στόχο τη λήψη των μετρήσεων, συνήθως χαμηλών δυνατοτήτων επεξεργασίας. Προβλέψεις μιλούν για πλήθος συσκευών της τάξης των δισεκατομμυρίων στο μέλλον και παγκόσμια οικονομική επιρροή στα τρισεκατομμύρια δολάρια [2] [3]. Όπως αναγράφεται στο [3], η παγκόσμια αγορά του Internet of Things αναμένεται να αγγίξει τα 3.352,97 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2030, από τα 662,21 δισεκατομμύρια το 2023.

Μέρος της αναδυόμενης τάσης του διαδικτύου των αντικειμένων είναι η μέθοδος προσομοίωσης με Digital Twins. Αυτή η τεχνολογία δημιουργεί μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός ή συλλογής εκ των φυσικών αντικειμένων που αφορά το διαδίκτυο των αντικειμένων, προσφέροντας καταγραφή, ανάλυση, πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης και βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο, με τη διαρκή χρήση των δεδομένων που παράγονται από τους αισθητήρες. Έρχεται κυρίως για να αυτοματοποιήσει την καθιερωμένη μέθοδο σχεδιασμού των αντικειμένων, όπου δοκιμάζεται ένα σύνολο προκαθορισμένων σεναρίων σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικού υπολογιστή, υπό την καθοδήγηση ανθρώπου. Μερικοί τομείς στους οποίους μπορεί να χρησιμεύσει ένα Digital Twin είναι οι εξής:

- Βιομηχανική παραγωγή: Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος, δηλαδή στη φάση σχεδίασης (επαναληπτική βελτιστοποίηση, εξασφάλιση ακέραιων δεδομένων, ψηφιακή αποτίμηση), στη φάση κατασκευής (παρακολούθηση πραγματικού χρόνου, προγραμματισμός παραγωγής, πρόβλεψη απόδοσης κ.α.), στη φάση συντήρησης (προληπτική συντήρηση, ανίχνευση αστοχιών κ.α.) και τέλος στη φάση της απόσυρσης [4]. Για παράδειγμα, σε αυτό το πλαίσιο επωφελείται η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροναυπηγική.
- Σύστημα υγείας: Ο υπέρτατος στόχος είναι η δημιουργία του Digital Twin του ανθρώπου, για να παρακολουθούμε την κατάσταση του ασθενή και να προσομοιώνουμε

την αποτελεσματικότητα των φαρμάκων.

- Ρομποτική: Για τη βελτιστοποίηση των κινήσεων των ρομπότ κάθε σκοπιμότητας, ως προς την απόδοση αλλά και την ασφάλεια, ειδικά σε περιβάλλον με ανθρώπους.
- Παροχή ενέργειας, έξυπνες πόλεις και κτίρια: Αναλυτική παρακολούθηση των δεδομένων στα Smart grids.
- Εφοδιαστική αλυσίδα: Αποτελεσματική ροή των logistics και διαχείριση των αποθεμάτων.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Το βασικό ζήτημα που προκύπτει για τα συστήματα που χρησιμοποιούν Digital Twin είναι η ακριβής διαδικασίας υλοποίησης, η οποία δύσκολα μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία. Συνεπώς, αντικείμενο της διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός Digital Twin με στόχο να προσφέρει στον χρήστη την αίσθηση ότι έχει μπροστά του μια εύχρηστη ψηφιακή αναπαράσταση τον αντικειμένου που θέλει να παρακολουθήσει και, δεύτερον, να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης των συσκευών. Ως αντικείμενο μελέτης, του οποίου το ψηφιακό δίδυμο προσπαθούμε να κατασκευάσουμε, έχουμε έναν όροφο δωματίων στον χώρο του πανεπιστημίου που προσφέρουν μετρήσεις.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε τέσσερα κεφάλαια: Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο των βασικών τεχνολογιών που σχετίζονται με τη διπλωματική αυτή. Αρχικά περιγράφονται μέθοδοι προσομοίωσης εξοπλισμού, όπου αναφέρονται οι αρχές λειτουργίας, οι προσπάθειες προτυποποίησης της ιδέας του Digital Twin και η σχετική βιβλιογραφία. Έπειτα γίνεται συζήτηση για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας με τις συσκευές στα άκρα του δικτύου και τέλος εξετάζονται οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης. Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται οι στόχοι της συγκεκριμένης εργασίας και οι λεπτομέρειες της υλοποίησης. Συγκεκριμένα, περιγράφεται το απαιτούμενο υλικό και λογισμικό, η οργάνωση σε χώρους μέτρησης και των χρησιμοποιούμενων κυκλωμάτων, οι λεπτομέρειες της μεθόδου πρόβλεψης καθώς και η διεπαφή χρήστη (frontend) της εφαρμογής. Στο Κεφάλαιο 4 επισημαίνεται, πρώτον, η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας και, δεύτερον, μελλοντικές επεκτάσεις της υλοποίησης.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι θεμελιώδεις ιδέες και τεχνολογίες σχετικές με την υλοποίηση. Παρουσιάζονται μέθοδοι προσομοίωσης εξοπλισμού, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που μπορούν να βοηθήσουν σε αυτό και τεχνικές προβλέψεων.

2.1 Μέθοδοι προσομοίωσης εξοπλισμού

2.1.1 Προσομοίωση με μοντέλο

Η προσομοίωση με μοντέλο είναι η διαδεδομένη τεχνική προσομοίωσης όπου δημιουργείται ένα θεωρητικό μοντέλο του αντικειμένου και παρακολουθείται με βάση αυτό η υποθετική εξέλιξη της κατάστασης του αντικειμένου στον χρόνο [4]. Με βάση τα αποτελέσματα γίνεται η βελτιστοποίηση στην αρχή της σχεδίασης, μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του φυσικού αντικειμένου κατάλληλα με στόχο να ικανοποιεί τις προδιαγραφές. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο είναι στατικό, δηλαδή δε λαμβάνονται υπόψη οι πληροφορίες που δημιουργεί η πραγματική λειτουργία του αντικειμένου.

2.1.2 Digital Twin

Αρχή λειτουργίας

Η πρώτη αναφορά στη μέθοδο εμφανίζεται σε διάλεξη του Michael Grieves για την διαχείριση του κύκλου ζωής του προϊόντος το 2003, ενώ ο όρος "Digital Twin" προτάθηκε από τον John Vickers στη NASA το 2010 [5]. Παρόλο που η πρώτη αναφορά υπάρχει για μεγάλο χρονικό διάστημα, η έλλειψη μελέτης που θέτει τις αρχές και τον τρόπο λειτουργίας έχει οδηγήσει σε ένα ευρύ φάσμα από χρησιμοποιούμενους ορισμούς. Υπάρχουν επτά βασικά κενά στην κατανόηση της μεθόδου [6]:

1. Ποια είναι τα ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα και οφέλη από τη χρήση της μεθόδου με Digital Twin;
2. Πώς εξελίσσεται το Digital Twin κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος;
3. Ποιες είναι οι περιπτώσεις όπου ταιριάζει η χρήση της μεθόδου;
4. Ποιες είναι οι τεχνολογίες που υλοποιούν το Digital Twin;

5. Πόσο ακριβής είναι ψηφιακή αναπαράσταση σε σχέση με το φυσικό αντικείμενο;
6. Ποιος είναι ο νόμιμος κάτοχος των δεδομένων της ψηφιακή αναπαράστασης;
7. Με ποιες μεθόδους θα μπορέσουν διαφορετικές ψηφιακές αναπαραστάσεις να επικοινωνήσουν μεταξύ τους;

Αυτό το συνολικό κενό είναι ορατό, αν συγκρίνουμε εργασίες μεταξύ τους. Για παράδειγμα, στο [7] αντιμετωπίζεται το Digital Twin απλώς ως μία προχωρημένη προσομοίωση, δηλαδή ως ένα σύνολο από μοντέλα που είναι σε θέση να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του φυσικού αντικειμένου στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Στο [8] η μέθοδος με Digital Twin αντιπροσωπεύει την αυτόματη ροή πληροφορίας μεταξύ φυσικού αντικειμένου και ψηφιακού μοντέλου. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας χρησιμοποιείται ο ορισμός του [9], καθώς διαφοροποιείται περισσότερο από την προσομοίωση με μοντέλο. Συνεπώς, εδώ, το Digital Twin είναι η ψηφιακή αναπαράσταση ενός πραγματικού αντικειμένου (ή συστήματος ή κοινωνίας) που βρίσκεται σε διαρκή επικοινωνία με το πραγματικό αντικείμενο. Η ψηφιακή μορφή τροφοδοτείται διαρκώς με δεδομένα από το αντικείμενο. Έτσι, μιλάμε για προσομοίωση πραγματικού χρόνου, όπου οι προβλέψεις και γενικά οι εικονικές λειτουργίες του δίδυμου μεταβάλλονται ανάλογα με τα συμβάντα στον φυσικό κόσμο.

Προσπάθειες προτυποποίησης

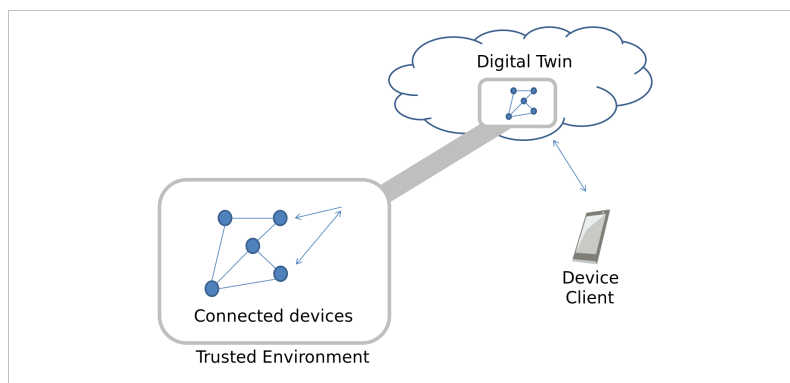
Ενώ το Digital Twin είναι ιδέα που κυκλοφορεί για καιρό, η προτυποποίησή της έχει ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια. Οργανισμοί που έχουν συμβάλει σε αυτό είναι ο ISO με το πρώτο πρότυπο το 2018, ύστερα ο IEEE με το πρώτο το 2019 για την προτυποποίηση της αρχιτεκτονικής σε εργοστασιακό επίπεδο και ο IEC το 2020 [10]. Ακολουθούν ο IRTF, το τμήμα ITU των Ηνωμένων Εθνών και ο CCSA αργότερα.

Ο οργανισμός W3C (World Wide Web Consortium) στο [1] περιγράφει την αρχιτεκτονική στον Ιστό των Πραγμάτων (Web of Things - WoT) με στόχο να είναι εφικτή η διαλειτουργικότητα μέσα σε ένα σύνολο εφαρμογών IoT. Στο πλαίσιο αυτό ορίζεται το Ψηφιακό Αντικείμενο (Virtual Thing) ως η υπηρεσία που αντιπροσωπεύει ένα η περισσότερα φυσικά αντικείμενα - ή και πολλά ψηφιακά αντικείμενα - προσφέροντας διεπαφή για τη χρήση των αντικειμένων αυτών. Συνήθως τα Virtual Things λειτουργούν ως μεσάζοντες, δηλαδή προσφέρουν μία νέα ενδιάμεση εικόνα για το υποκείμενο αντικείμενο αντί να δείχνουν κατ' ευθείαν σε αυτό, όπως συμβαίνει με το Digital Twin. Ειδικότερα, ο W3C ορίζει το Digital Twin απευθείας: είναι μία ψηφιακή αναπαράσταση, δηλαδή ένα μοντέλο, που διατηρείται στον εξυπηρετητή του cloud ή σε συσκευή στα άκρα του δικτύου και χρησιμοποιείται για δύο σκοπούς:

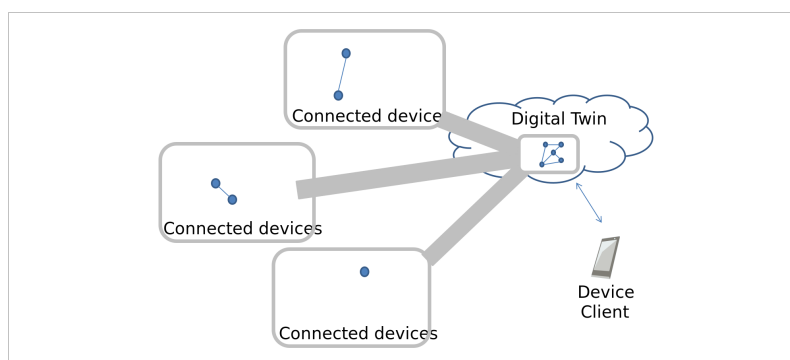
1. για την εκπροσώπηση φυσικών συσκευών (οι οποίες δεν είναι αναγκαίο να είναι συνεχώς συνδεδεμένες στο δίκτυο για επικοινωνία).
2. για τη δοκιμή νέων εφαρμογών πριν φορτωθούν για εκτέλεση στις πραγματικές συσκευές.

Ένα Digital Twin χρησιμεύει για μία (Σχήμα 2.1) ή περισσότερες συσκευές (Σχήμα 2.2).

Ο οργανισμός ETSI (European Telecommunications Standards Institute) εργάζεται για τον ορισμό της πρότυπης αρχιτεκτονικής των Digital Twins, καθώς και για τον προσδιορισμό



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση μίας συσκευής με Digital Twin [1]



Σχήμα 2.2: Χρήση περισσότερων συσκευών [1]

των λεπτομερειών για τη έξυπνη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών [11]. Ειδικότερα, στο [12] εξετάζεται η υλοποίηση του Digital Twin με το NGSI-LD και πιθανές επεκτάσεις του που μπορούν να διευκολύνουν την υλοποίηση αυτή. Σημειώνεται ότι το NGSI-LD είναι ένα πρότυπο σχέδιο από διεπαφές για την έκδοση πληροφοριών και την εγγραφή (Publish-subscribe model), καθώς και την δημιουργία επερωτήσεων.

Ο oneM2M, ο οποίος είναι οργανισμός με χώρες μέλη πρωτοπόρες στην τεχνολογία από όλον τον κόσμο, λειτουργώντας σαν κοινοπραξία για τη δημιουργία προτύπων για τη διαλειτουργικότητα της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών IoT, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των μελών, έχει αναγνωρίσει τη μέθοδο με Digital Twin [13]. Στα πλαίσια μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας των IoT εφαρμογών, χρησιμοποιεί 8 τρόπους, μεταξύ των οποίων είναι η χρήση Digital Twin. Συγκεκριμένα, επιτρέπει στις συσκευές να αποσυνδεθούν και να βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (δηλαδή σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας), διότι τα δεδομένα της συσκευής βρίσκονται διαθέσιμα για ανάγνωση στο Digital Twin. Επίσης, μειώνεται το πλήθος των μηνυμάτων δικτύου που πρέπει να στείλει η συσκευή, καθώς χρειάζεται να επικοινωνήσει μόνο με μία οντότητα αντί να πρέπει να ικανοποιεί τα αιτήματα κάθε τρίτης συσκευής που επιθυμεί να αλληλεπιδράσει μαζί της. Η συσκευή, λοιπόν, χρειάζεται να είναι ενεργή για πρόσβαση μόνο για να στείλει τις ενημερώσεις της στο Digital Twin της. Αυτό λειτουργεί και στην περίπτωση όπου πρέπει να στείλουμε εντολές στη συσκευή: Η συσκευή ξυπνάει περιοδικά σε προγραμματισμένο χρόνο, ελέγχει για εντολές, ενημερώνοντας παράλληλα το Digital Twin για νέα συμβάντα και επιστρέφει στην κατάσταση ύπνου.

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί η Ευρωπαϊκή κοινοπραξία Change2Twin, όπου έχουν καταγραφεί πρότυπα για την εύκολη υιοθέτηση της χρήσης Digital Twin από τις εταιρίες [14].

Σύγκριση με τη μέθοδο προσομοίωσης με μοντέλο

Παρόλο που η μέθοδος προσομοίωσης με μοντέλο μοιάζει με τη χρήση Digital Twin, λόγω του ότι και οι δύο χρησιμοποιούν ένα μοντέλο το οποίο κάνει τις απαραίτητες αφαιρέσεις από τον πραγματικό κόσμο, είναι διαφορετικές μέθοδοι μεταξύ τους [15]. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι η χρήση Digital Twin αποτελεί την εξέλιξη της προσομοίωσης με μοντέλο. Υπάρχουν τρεις βασικές διαφορές, που ταυτόχρονα αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα και ξεχωρίζουν την πρώτη μέθοδο από τη δεύτερη [16]:

1. Δυναμική προσομοίωση (Digital Twin) αντί για στατική: Ο συνηθισμένος τρόπος προσομοίωσης με μοντέλο είναι μέσω του προγράμματος CAD όπου οι σχεδιαστές μπορούν να ρυθμίσουν διάφορες παραμέτρους, όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τη γεωμετρία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας του προϊόντος και να ελέγξουν την τελική συμπεριφορά του. Μια τέτοια σχεδίαση είναι στατική, αφού οι ικανότητες προσομοίωσης περιορίζονται από το πλήθος των προσομοιώσεων που εκτελούνται από τον σχεδιαστή και τις παραμέτρους που θα αποφασίσει να ελέγξει. Μόνο τη στιγμή που αλλάζει ο σχεδιαστής κάποια παράμετρο μεταβάλλεται το μοντέλο. Αντιθέτως, το μοντέλο που αναπαριστά το Digital Twin ξεκινά, εξ ορισμού, με την επεξεργασία δεδομένων προερχόμενα από τη λειτουργία του φυσικού αντικείμενου στον πραγματικό κόσμο. Για τον λόγο της αδιάκοπης ενημέρωσης του μοντέλου από τη συμπερίληψη πραγματικών δεδομένων, η προσομοίωση είναι δυναμική, με το πλεονέκτημα ότι παράγονται συμπεράσματα που δε μπορούν να παραχθούν από την κλασική προσομοίωση μέσα από το CAD.
2. Επίκαιρη προσομοίωση αντί για μελέτη πιθανών σεναρίων: Η μέθοδος προσομοίωσης με μοντέλο πληροφορεί για τις επιπτώσεις που θα προκαλέσουν στο τελικό προϊόν οι δεδομένες από τον σχεδιαστή αλλαγές στο μοντέλο. Βασίζεται στη φαντασία και εμπειρία του σχεδιαστή να τρέξει τις κατάλληλες ρεαλιστικές προσομοιώσεις. Όμως, είναι πρακτικά αδύνατο να προβλέψει κανείς όλα τα πραγματικά σενάρια και τις συνθήκες χρήσης, γεγονός που κάνει τη μέθοδο με μοντέλο μία υποθετική μελέτη των πιθανών συνθηκών που θα αντιμετωπίσει το προϊόν. Ένα αντικείμενο με Digital Twin, από την άλλη, μαθαίνει από τα τρέχοντα δεδομένα του πραγματικού κόσμου. Ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτά τα δεδομένα για την περαιτέρω βελτίωση του προϊόντος, βασιζόμενος στη σύγκριση μεταξύ της αναμενόμενης από αυτόν χρήσης και της πραγματικής, από τον πελάτη, χρήσης. Η προσομοίωση γίνεται επίκαιρη και ο σχεδιαστής λαμβάνει άμεση ανατροφοδότηση. Έτσι, η επιχείρηση συνολικά γίνεται πιο ευέλικτη και γρήγορα κινούμενη, άρα αποκτά καλύτερη δυνατότητα ανταπόκρισης στις γρήγορα μεταβαλλόμενες και αυξανόμενες απαιτήσεις των πελατών της.
3. Εστίαση στην στρατηγική αντί για εστίαση στο προϊόν: Η προσομοίωση με μοντέλο γίνεται παραδοσιακά από τους σχεδιαστές του προϊόντος, οι οποίοι εξετάζουν μονάχα

φυσικές παραμέτρους του τελικού προϊόντος και όχι οικονομικούς ή άλλους παράγοντες, καθώς δεν είναι εφικτό να ενσωματωθούν στην προσομοίωση. Με άλλα λόγια, η προσομοίωση με μοντέλο αφορά μόνο το τμήμα έρευνας και ανάπτυξης (τμήμα R&D). Όμως, με τη χρήση Digital Twin μπορεί, μέσω ανατροφοδότησης, να ενσωματωθεί οποιαδήποτε παράμετρος στο μοντέλο από τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Συνεπώς, οι σχεδιαστές και managers έχουν στη διάθεσή τους όλη την πληροφορία που χαρακτηρίζει το προϊόν, άρα γίνεται άμεση και με μεγαλύτερη ευκολία η σχεδίαση της επιχειρησιακής στρατηγικής.

Με όλα αυτά τα προτερήματα της μεθόδου με Digital Twin κατά νου, αξίζει να σημειωθεί ότι πρέπει να προτιμάται από την προσομοίωση με μοντέλο κυρίως για προϊόντα μεγάλης αξίας για την επιχείρηση, όπου είναι αναγκαία η στενή παρακολούθηση. Αυτό γίνεται κατανοητό αν αναλογιστούμε τις απαιτήσεις των Digital Twins ως προς το υλικό και την ανάγκη ένταξής τους στις υπόλοιπες μεθόδους εργασίας. Μπορεί να κοστίζει η εύρεση και η εγκατάσταση όλων των απαραίτητων αισθητήρων, η ενσωμάτωσή τους με το λογισμικό που θα αναλύσει τα δεδομένα τους και η δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος για τον χρήστη. Σαφώς, πρέπει επίσης να εκπαιδευτεί το προσωπικό για τον χειρισμό του Digital Twin.

Σχετική Βιβλιογραφία

Ένα μη αμελητέο πλήθος ερευνών έχει πραγματοποιηθεί γύρω από την ιδέα των Digital Twins στο παρελθόν.

Στο [17] ερευνώνται οι δυνατότητες του Digital Twin. Πρώτα, παρουσιάζεται η χρονική σειρά στην εξέλιξη της ιδέας του Digital Twin και ορίζεται το ψηφιακό-φυσικό σύστημα, το Digital Twin και το δίκτυο των Digital Twins. Στόχος της συνεργασίας στο δίκτυο αυτό είναι η αύξηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας στις προσφερόμενες λειτουργίες (ανάλυση πραγματικού χρόνου, εκτέλεση εντολών κ.α.). Αναλύονται, έπειτα, οι πιο σημαντικές τεχνολογίες του δικτύου: η επικοινωνία, η επεξεργασία των δεδομένων, ο τρόπος μοντελοποίησης του Digital Twin, οι υπολογισμοί στο cloud και οι υπολογισμοί στα άκρα του δικτύου. Οι επικοινωνίες και η φύση τους έχουν θεμελιώδη αξία και κατηγοριοποιούνται ως εξής: φυσική προς ψηφιακή επικοινωνία (P2V), φυσική προς φυσική (P2P) και ψηφιακή προς ψηφιακή (V2V). Μερικές από τις πιο σημαντικές προκλήσεις είναι η πολυπλοκότητα και ετερογένεια του δικτύου και η απαίτηση χαμηλού χρόνου ανταπόκρισης από τις τις συνδέσεις P2P, P2V. Επισημαίνεται ότι η τεχνολογία του δικτύου των Digital Twins μπορεί να εφαρμοστεί σε τομείς όπως τη βιομηχανία, την αεροπορία, το σύστημα υγείας, τα δίκτυα 6G και σε έξυπνα συστήματα μαζικής μεταφοράς. Όσον αφορά νέες τάσεις στην τεχνολογία, το δίκτυο μπορεί να εφαρμοστεί στην κατανεμημένη μηχανική μάθηση με στόχο την αύξηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας, στην τεχνολογία Blockchain και στη διαχείριση της τεχνητής νοημοσύνης στα άκρα του δικτύου. Βέβαια, υπάρχουν πολλά θέματα προς επίλυση που αποτελούν εμπόδια στην υλοποίηση του δικτύου των Digital Twins, όπως η ασφάλεια του συστήματος, ο κίνδυνος διαρροής των ιδιωτικών δεδομένων, η ανάγκη για εύρεση οικονομικών λύσεων υλοποίησης και η διασφάλιση της ποιότητας στην αμφίδρομη και πραγματικού χρόνου επικοινωνία.

Στο [9] γίνεται μια ολοκληρωμένη εισαγωγή στον τρόπο με τον οποίο μπορούν τα Dig-

ital Twins να αναβαθμίσουν τη βιομηχανία. Αρχικά, αναφέρεται η τρέχουσα διαδικασία κατασκευής υλικού για να επισημανθούν οι αδυναμίες της, καταλήγοντας στην ανάγκη για υλικό που διαρκώς ενημερώνεται. Ορίζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η τεχνική του Digital Twin, καθορίζονται οι λειτουργίες, ο τρόπος κατασκευής και τα πρόσθετα οφέλη που δίνει. Επισημαίνονται σύγχρονες τάσεις που δίνουν ώθηση στην αύξηση της χρήσης Digital Twins, όπως η ανάγκη μοντελοποίησης με βάση τα δεδομένα και η άνοδος της μηχανικής όρασης (Machine vision). Ακόμη, δίνονται τρία παραδείγματα υλοποίησης, για την παρακολούθηση υδραυλικών εξαρτημάτων (π.χ. βαλβίδων), για τη βελτιστοποίηση της κίνησης των μηχανών CNC και για την παρακολούθηση των εξόδων σε όλο το εργοστάσιο. Στο πρώτο παράδειγμα χρησιμοποιείται ένα FPGA στο οποίο εκτελούνται PHP scripts για την επικοινωνία με τα εξαρτήματα και ο Apache web server για την ενημέρωση των Digital Twins και την εξυπηρέτηση του χειριστή. Ο χειριστής με γυαλιά εικονικής πραγματικότητας εποπτεύει τις λειτουργία του εργοστασίου και δίνει εντολές στις βαλβίδες μέσω χειρονομιών. Στο τρίτο παράδειγμα εξετάζονται 125 τουρμπίνες που λειτουργούν στην Νότια Καλιφόρνια. Το Digital Twin δίνει προβλέψεις για το κόστος της συνολικής ενέργειας και προειδοποιήσεις για την πρόωρη αποτυχία των μηχανών, μειώνοντας έτσι το κόστος για καύσιμα κατά 40%.

Στο [18] αναλύονται οι δυσκολίες υλοποίησης του συνολικού οράματος, δηλαδή της υλοποίησης ενός εκτεταμένου και διαλειτουργικού διαδικτύου των αντικειμένων. Το Digital Twin είναι μέρος του διαδικτύου των αντικειμένων και θα επωφελείτο η διαδικασία ανάπτυξης του από τη διαλειτουργικότητα. Το διαδίκτυο αυτή τη στιγμή διασυνδέει ανθρώπους (Internet of people) και η ιδέα του Internet of Things μπορεί να προσφέρει διαχείριση συσκευών από απόσταση. Όπως επισημαίνεται, το 40% από την αξία του Internet of Things δεν είναι αξιοποιήσιμο εξαιτίας της περιορισμένης διαλειτουργικότητας. Αυτή οφείλεται στο ότι είναι ανέφικτο να υιοθετηθεί από όλους ένα μοναδικό πρωτόκολλο, μιας και καθένα από τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι εξειδικευμένο και ταιριάζει καλύτερα από τα υπόλοιπα σε δεδομένη εφαρμογή. Έτσι, προτείνουν οι συγγραφείς τη λύση όπου ένας εξυπηρετητής (Web of Virtual Things server) προσφέρει με ενιαία διεπαφή πρόσβαση στις πληροφορίες των διαφορετικών συσκευών. Είναι βελτίωση παλαιότερης εργασίας και σημειώνουν λίγες δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) καθυστέρηση ανά μήνυμα και περίπου δέκα μηνύματα ανά δευτερόλεπτο.

Ωστόσο, οι λεπτομερείς υλοποιήσεις είναι περιορισμένες. Στο [19] επισημαίνεται ότι η χρήση κλειστών συστημάτων αποτελεί εμπόδιο για την πλήρη υλοποίηση της έξυπνης παραγωγής (smart manufacturing) και καταγράφονται εργαλεία ανοιχτού κώδικα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση. Συγκεκριμένα, προτείνεται μία λίστα από ανοιχτά πρωτόκολλα επικοινωνίας, πλατφόρμες μεσαζόντων (middleware platforms), εργαλεία επεξεργασίας ροής δεδομένων, δομής δεδομένων, εργαλεία διαχείρισης χρονοσειρών καθώς και εργαλεία για εφαρμογή μηχανικής μάθησης και αρχιτεκτονική υλοποίησης με μικρουπηρεσίες (microservices).

Στο [20] προτείνεται μία αρχιτεκτονική τριών επιπέδων που χρησιμοποιεί τα Eclipse Hono και Eclipse Ditto και επικοινωνία μέσω AMQP 1.0 και HTTP αντίστοιχα. Στο φυσικό επίπεδο βρίσκονται όλες οι συσκευές, στο επίπεδο συνδεσιμότητας λειτουργεί το Eclipse Hono το οποίο προσφέρει ομοιόμορφη σύνδεση μέσω AMQP 1.0 στο επόμενο επίπεδο, ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί κάθε συσκευή. Το επόμενο επίπεδο είναι το ψηφιακό

επίπεδο, όπου το Eclipse Ditto διατηρεί την τρέχουσα κατάσταση των αντικειμένων, ενημερώνει τη βάση δεδομένων και προσφέρει δεδομένα με διεπαφή HTTP στο δίκτυο υπηρεσιών που χρησιμοποιούν οι χρήστες.

Στο [21] σχεδιάζεται και δοκιμάζεται ένα καταναμεμημένο σύστημα φωτοβολταϊκών όπου το Digital Twin εξυπηρετεί στην ανίχνευση και στην κατηγοριοποίηση των ανωμαλιών που προκύπτουν κατά τη λειτουργία. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που δίνει η αντιμετώπιση με Digital Twin είναι η ταχύτητα και η ακρίβεια εντοπισμού των ανωμαλιών (για τον μετατροπέα ισχύος, ανίχνευση σε λιγότερο από 290 μ s και αναγνώριση σε 4 ms, ενώ για το φωτοβολταϊκό στοιχείο 80 ms και 1,2 s), η ανεξαρτησία από την αρχιτεκτονική της ηλεκτρικής εγκατάστασης και η μειωμένη πολυπλοκότητα.

2.2 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Για την υλοποίηση των Digital Twins είναι κρίσιμη η επιλογή της αρχιτεκτονικής και των πρωτοκόλλων, διότι πρέπει να ικανοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα από απαιτήσεις, τόσο η ανάγκη χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας στα άκρα όσο και η δυνατότητα διαρκούς επαφής του φυσικού με το ψηφιακό αντικείμενο. Χρειάζονται πρωτόκολλα που επιτρέπουν την αποδοτική μεταφορά πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, δίνουν εγγύηση για τη διαθεσιμότητα επικοινωνίας και είναι κλιμακώσιμα.

Μια ποικιλία από μεθόδους είναι διαθέσιμη για την επικοινωνία με τις συσκευές στα άκρα του δικτύου. Για την επιλογή λαμβάνεται υπόψη τόσο η επιθυμητή εμβέλεια όσο και οι υπολογιστικές ικανότητες της συσκευής. Τα πιο χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα είναι: AMQP, Bluetooth & BLE, κυψελωτή τηλεφωνία, CoAP, DDS, LoRa & LoRaWAN, LWM2M, MQTT, Wi-Fi, XMPP, Zigbee, Z-Wave [22].

2.2.1 AMQP

Το AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) είναι πρωτόκολλο-πρότυπο στο στρώμα εφαρμογής που υποστηρίζει την ανταλλαγή μηνυμάτων. Λειτουργεί ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική του συστήματος και, για αυτό τον λόγο, προσφέρει διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα για ασφαλείς συνδέσεις και την αποστολή μηνυμάτων μεταξύ δύο συσκευών που δεν είναι ταυτόχρονα διαθέσιμες.

2.2.2 Bluetooth & BLE

Το Bluetooth είναι ένα πρότυπο ασύρματης ανταλλαγής πληροφοριών για μικρές αποστάσεις, μέχρι 10 μέτρα. Λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων UHF με συχνότητα περίπου 2,4 GHz και είναι σχεδιασμένο για μικρή κατανάλωση ενέργειας. Χρησιμοποιείται κυρίως για προσωπικά δίκτυα, για παράδειγμα για την ασύρματη σύνδεση ακουστικών. Μία δεύτερη έκδοση του Bluetooth σχεδιασμένη για IoT εφαρμογές είναι το BLE (Bluetooth Low Energy), το οποίο καταναλώνει λιγότερη ισχύ από το από Bluetooth.

2.2.3 Κυψελωτή τηλεφωνία

Η επικοινωνία μέσω κυψελωτής τηλεφωνίας είναι η κατάλληλη λύση για ζεύξη μεγάλης απόστασης. Προσφέρει υψηλό ρυθμό μετάδοσης και αξιοπιστία. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα αυτά έρχονται με το μειονέκτημα της υψηλότερης κατανάλωσης ισχύος, σε σχέση με τις άλλες μεθόδους.

2.2.4 CoAP

Το CoAP (Constrained Application Protocol) είναι πρωτόκολλο στο στρώμα εφαρμογής σχεδιασμένο για συσκευές περιορισμένων δυνατοτήτων. Βασίζεται στο UDP και χρησιμοποιείται συνήθως για την απευθείας επικοινωνία συσκευών, δηλαδή χωρίς την ανάγκη για διαμεσολαβητή.

2.2.5 DDS

Το DDS (Data Distribution Service) είναι πρότυπο σχεδιασμένο για υψηλή επίδοση στη μεταφορά των δεδομένων πραγματικού χρόνου και κλιμακωσιμότητα. Βασίζεται στο μοντέλο publish-subscribe.

2.2.6 LoRa & LoRaWAN

Το LoRa (LONg RANge) είναι τεχνική ασύρματης σύνδεσης για μακρινές αποστάσεις. Η τεχνική είναι κλειστή στο κοινό. Το LoRaWAN είναι ο αντίστοιχος ορισμός του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου.

2.2.7 LWM2M

Το πρωτόκολλο LWM2M (LightWeight M2M) χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της επικοινωνίας σε ένα σενάριο απευθείας επικοινωνία μεταξύ των συσκευών (Machine 2 Machine) ή σε ένα οικοσύστημα IoT.

2.2.8 MQTT

Αναπτύχθηκε το 1999 και τα αρχικά προέρχονται από τη φράση MQ Telemetry Transport. Το MQ σήμαινε Message Queueing αλλά δε χρησιμοποιούνται ουρές αναμονής στο πρωτόκολλο. Το MQTT, όπως και το DDS, λειτουργεί με βάση το μοντέλο publish-subscribe και είναι κατάλληλο για επικοινωνία συσκευών περιορισμένων δυνατοτήτων (για παράδειγμα, χαμηλό εύρος ζώνης). Ενώ ξεκίνησε ως κλειστό πρότυπο, σήμερα είναι ανοιχτού κώδικα και μία από τις πιο δημοφιλείς επιλογές για επικοινωνία σε ένα δίκτυο IoT. Μάλιστα, αυτό είναι το πρωτόκολλο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, στο πειραματικό μέρος.

2.2.9 Wi-Fi

Το Wi-Fi είναι μία οικογένεια πρωτοκόλλων όπου το πιο γνωστό είναι το 802.11n που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την ασύρματη σύνδεση υπολογιστών σε σπίτια και επιχειρήσεις. Το μεγάλο πλεονέκτημά του είναι η ευρεία υιοθέτησή του, επιτρέποντας εύκολη

σύνδεση με υπάρχοντα μέσα. Όμως, δεν είναι η βέλτιστη επιλογή για μια εφαρμογή δικτύου των αντικειμένων, δηλαδή για συσκευές όπου η χαμηλή κατανάλωση ισχύος είναι απαραίτητη προϋπόθεση. Εκτός αυτού, είναι χαμηλής έως και μέτριας εμβέλειας η κάλυψη και δεν κλιμακώνει καλά η επίδοση με τη μεγάλη αύξηση του πλήθους των συσκευών στο δίκτυο.

2.2.10 XMPP

Το XMPP (eXtensible Messaging and Presence Protocol) είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο σχεδιασμένο για να είναι επεκτάσιμο και για ανταλλαγή δεδομένων πραγματικού χρόνου. Χρησιμοποιείται συχνά στη σύνδεση των έξυπνων οικιακών συσκευών.

2.2.11 Zigbee

Το Zigbee είναι μια συλλογή από πρωτόκολλα για την εύκολη δημιουργία προσωπικών δικτύων (Personal Area Networks) από συσκευές. Είναι αυτοοργανούμενο και έχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Συγκριτικά με το BLE, έχει μεγαλύτερη εμβέλεια αλλά χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης.

2.2.12 Z-Wave

Το Z-Wave είναι ένα κλειστό πρωτόκολλο που υποστηρίζεται από την Z-Wave Alliance για ασύρματα δίκτυα συσκευών. Χρησιμοποιείται κυρίως για αυτοματισμούς σε οικιακό και επιχειρησιακό επίπεδο. Δίνει έμφαση στη χαμηλή ισχύ και, όπως και πολλά από τα παραπάνω, προσφέρει ασφαλείς μεταφορές δεδομένων.

2.3 Αλγόριθμοι πρόβλεψης

Το Digital Twin επικοινωνεί διαρκώς με το φυσικό αντικείμενο που αντιπροσωπεύει, λαμβάνοντας δεδομένα πραγματικού χρόνου, με στόχο την παροχή προχωρημένων υπηρεσιών προς τον χρήστη. Μία από αυτές τις υπηρεσίες είναι αδιαμφισβήτητη η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των χρονοσειρών που κατασκευάζονται από τα δεδομένα, στην οποία στηρίζονται λειτουργίες όπως η προληπτική συντήρηση, η ανίχνευση ανωμαλιών κ.α.. Συνεπώς, η ποιότητα των υπηρεσιών είναι ανάλογη της ποιότητας των προβλέψεων, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται άμεσα από την καταλληλότητα του αλγορίθμου πρόβλεψης που χρησιμοποιείται. Είναι επιθυμητές τεχνικές ανθεκτικές σε έλλειψη σημείων (που προκαλεί κενό γνώσης) στα δεδομένα, που μπορούν να διαχειριστούν τον ενσωματωμένο θόρυβο που προκαλείται από τους αισθητήρες και που είναι σχετικά γρήγορες στην εκτέλεση, διότι η πρόβλεψη πρέπει να προσαρμόζεται γρήγορα, δεδομένου ότι τα δεδομένα συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο.

Σε παλαιότερες εργασίες δοκιμάζεται η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, στην [23] δοκιμάζονται αφελείς μέθοδοι, γραμμική παλινδρόμηση, LSTM (Long short-term memory) και η μέθοδος Prophet για την πρόβλεψη της επόμενης κατάστασης του διδύμου, το οποίο αναπαριστά (την ενεργειακή κατανάλωση σε) ένα κτήριο. Για τη

σύγκριση των τεχνικών χρησιμοποιείται το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα, δηλαδή:

$$\frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \quad (2.1)$$

όπου A_i η πραγματική τιμή και F_i η τιμή που προβλέφθηκε. Στην [24] δοκιμάζονται κλασικές τεχνικές προβλέψεων, LSTM, η μέθοδος Prophet και συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (CNN) για την πρόβλεψη των πωλήσεων επίπλων. Προκύπτει σαν αποτέλεσμα ότι η μέθοδος LSTM και Prophet, αντίστοιχα σε κάθε μελέτη, παράγουν τις βέλτιστες προβλέψεις. Στη συνέχεια αναλύονται μερικές από αυτές τις μεθόδους.

2.3.1 Αφελείς μέθοδοι

Μία αφελής μέθοδος πρόβλεψης κάνει την πιο απλή πρόβλεψη και λειτουργεί σαν βάση σύγκρισης για τις πιο πολύπλοκες μεθόδους. Δεν είναι σε θέση να διακρίνει μοτίβα και για αυτόν τον λόγο συνήθως δεν αρκεί. Για παράδειγμα, στο [23], η αφελής μέθοδος δίνει σαν πρόβλεψη για μία μελλοντική χρονική στιγμή την τιμή (της ενεργειακής κατανάλωσης) που παρατηρήθηκε ακριβώς μία εβδομάδα πριν.

2.3.2 Γραμμική παλινδρόμηση

Το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης προβλέπει με βάση την υπόθεση ότι η σχέση μεταξύ χαρακτηριστικών εισόδου και της εξόδου είναι γραμμική. Δοθέντος ενός συνόλου δεδομένων το οποίο αποτελείται από N ζευγάρια y_i και $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, όπου n οι διαστάσεις της εισόδου, βρίσκουμε τα $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ της ευθείας

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (2.2)$$

που ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων από κάθε ζευγάρι. Δηλαδή, βρίσκουμε το σύνολο των $\{\beta_i\}_{i=1}^n$ που ελαχιστοποιεί το άθροισμα $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2$ στο ακόλουθο σύνολο των εξισώσεων

$$y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_n x_{in} + \varepsilon_i, i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

Για την εξαγωγή της πρόβλεψης εισάγουμε τα επιθυμητά x_1, x_2, \dots, x_n στην εξίσωση (2.2).

Σαν πραγματικό παράδειγμα, στο [23], χρησιμοποιούνται τέσσερα μοντέλα, με δεδομένα εκπαίδευσης σε 30 ημέρες, 2 εβδομάδες, 1 εβδομάδα και 4 ημέρες αντίστοιχα.

2.3.3 Κλασσικές μέθοδοι

Μερικές κλασσικές τεχνικές προβλέψεων είναι οι μέθοδοι Εκθετικής Εξομάλυνσης (Exponential smoothing), ο αυτοπαλίνδρομος ολοκληρωμένος κινούμενος μέσος όρος (Autoregressive Integrated Moving Average - ARIMA) και, σαν επέκταση του τελευταίου, το εποχικό ARIMA (Seasonal ARIMA - SARIMA) [25].

Μέθοδοι εκθετικής εξομάλυνσης

Στις μεθόδους εκθετικής εξομάλυνσης (Exponential smoothing) η πρόβλεψη αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο όρο των προηγούμενων τιμών, όπου το βάρος κάθε όρου μειώνεται εκθετικά με την ηλικία της παρατήρησης. Με άλλα λόγια, η επίδραση των παλαιότερων τιμών μειώνεται εκθετικά στις νέες προβλέψεις. Η βασική μέθοδος αυτής της κατηγορίας ονομάζεται απλή εκθετική εξομάλυνση και ταιριάζει για χρονοσειρές χωρίς εποχικότητα. Έστω ότι έχουμε T το πλήθος παρατηρήσεις y_t . Τότε η μέθοδος προβλέπει την τιμή y_{T+1} ίση με

$$\hat{y}_{T+1} = ay_T + a(1-a)y_{T-1} + a(1-a)^2y_{T-2} + \dots + a(1-a)^{T-1}y_1 \quad (2.4)$$

Το a ονομάζεται παράμετρος εξομάλυνσης και παίρνει τιμές στο εύρος $0 \leq a \leq 1$. Όσο μεγαλύτερο είναι το a τόσο πιο γρήγορα μειώνεται η σημασία των προηγούμενων τιμών.

Υπάρχουν πιο προχωρημένες τεχνικές εκθετικής εξομάλυνσης, οι οποίες μπορούν να αναγνωρίσουν την τάση (δηλαδή την συνολική πορεία) και την εποχικότητα (τις περιοδικές μεταβολές). Ανάλογα με τον τρόπο μεταβολής της τάσης και της εποχικότητας στη χρονοσειρά έχουμε την προσθετική μέθοδο, όπου υποθέτουμε ότι οι εποχικές μεταβολές είναι περίπου σταθερές, και την πολλαπλασιαστική μέθοδο, όπου υποθέτουμε ότι το μέγεθος των εποχικών μεταβολών είναι ανάλογο του επιπέδου της χρονοσειράς. Έτσι, διακρίνουμε τέσσερις σημαντικές μεθόδους:

Τάση	Εποχικότητα	Μέθοδος
0	0	Απλή εκθετική εξομάλυνση
+	0	Γραμμική μέθοδος Holt
+	+	Προσθετική μέθοδος Holt-Winters
+	*	Πολλαπλασιαστική μέθοδος Holt-Winters

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι εκθετικής εξομάλυνσης, ανάλογα με την αντιμετώπιση της τάσης και της εποχικότητας. Συμβολισμός: "0" = δε λαμβάνεται υπόψη, "+" = προσθετική μέθοδος, "*" = πολλαπλασιαστική μέθοδος.

Αυτοπαλίνδρομος ολοκληρωμένος κινούμενος μέσος όρος - ARIMA

Το μοντέλο ARIMA συνδυάζει την αυτοπαλινδρόμηση (AR) με το μοντέλο κινητού μέσου όρου (MA). Το γράμμα "I" (Integrated) υποδηλώνει τη χρήση των διαφορών στο μοντέλο αντί για τις αρχικές τιμές, δηλαδή αντί για y_t χρησιμοποιούμε τις y'_t :

$$y'_t = y_t - y_{t-1} \quad (2.5)$$

Χρησιμοποιούνται διαφορές οσοδήποτε μεγάλης τάξης ώστε η τελική χρονοσειρά, $y_t^{(n)}$, να είναι στάσιμη. Συγκεκριμένα, το μοντέλο ARIMA(p,d,q) περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$y'_t = c + (\phi_1 y'_{t-1} + \dots + \phi_p y'_{t-p}) + (\theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}) + \varepsilon_t \quad (2.6)$$

όπου p είναι η τάξη της αυτοπαλινδρόμησης (AR(p)), d η τάξη της διαφοράς y'_t και q η τάξη του κινητού μέσου όρου (MA(q)). Το μέρος AR(p) αναπαριστά τη σχέση της τρέχουσας τιμής

με τις προηγούμενες p τιμές, με την υπόθεση ότι ισχύει γραμμική εξάρτηση (συν κάποιος θόρυβος). Το μέρος $MA(q)$ μοντελοποιεί τη σχέση της τρέχουσας τιμής με το σφάλμα των προηγούμενων προβλέψεων/τιμών.

Εποχικό ARIMA

Με την ενσωμάτωση της εποχικότητας στο μοντέλο ARIMA παίρνουμε το μοντέλο που ονομάζεται Εποχικό ARIMA. Εκφράζεται με επτά παραμέτρους και συμβολίζεται ως

$$SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_m \quad (2.7)$$

Τα P, D, Q είναι τα αντίστοιχα των p, d, q για το εποχικό κομμάτι της χρονοσειράς και το m δηλώνει το πλήθος των σημείων που αποτελούν τη μία περίοδο του εποχικού κομματιού. Για παράδειγμα, αν τα δεδομένα μας αφορούν τις μονάδες προϊόντος που παράχθηκαν κάθε μήνα και εμφανίζεται παρόμοιο μοτίβο κάθε έτος τότε έχουμε $m = 12$.

2.3.4 Prophet

Η μέθοδος Prophet είναι μία βιβλιοθήκη πρόβλεψης χρονοσειρών που δημιουργήθηκε από τη Facebook το 2017 και είναι ανοιχτού κώδικα. Λαμβάνει υπόψη τις τάσεις, την εποχικότητα (π.χ. εβδομαδιαία) και τις μεταβολές από τις διακοπές, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση.

$$y(t) = \tau(t) + \varepsilon(t) + \delta(t) + error(t) \quad (2.8)$$

Το πλεονέκτημα της βιβλιοθήκης είναι ότι δεν απαιτείται ο προσδιορισμός παραμέτρων για την παραγωγή αποτελεσμάτων, αν και είναι εφικτό την τροποποιηθεί η μέθοδος [23]. Επίσης, παράγεται πληροφορία για την αυτοπεποίθηση του μοντέλου στην πρόβλεψη.

2.3.5 LSTM

Το νευρωνικό δίκτυο LSTM (Long short-term memory) είναι μία δομή πρόβλεψης που ανήκει στην οικογένεια των επαναλαμβανόμενων νευρωνικών δικτύων (RNN - Recurrent Neural Networks).



Σχήμα 2.3: Η βασική μορφή ενός RNN

Το LSTM παίρνει τη θέση του RNN στο παραπάνω διάγραμμα και υλοποιεί την πρόβλεψη της εξόδου. Χρησιμοποιεί τρεις πύλες [26]:

1. Πύλη λησμόνησης (forget gate): Καθορίζει το μέρος της προηγούμενης κατάστασης που θα χρησιμοποιηθεί για τις επόμενες προβλέψεις.

2. Πύλη εισόδου (input gate): Ενσωματώνει το κατάλληλο μέρος από τη νέα πληροφορία στην κατάσταση.
3. Πύλη εξόδου (output gate): Επιλέγει τα μέρη της κατάστασης που θα δώσουν την τρέχουσα πρόβλεψη.

2.3.6 CNN

Τα συνελκτικικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNN) είναι αποτελεσματικά στον χειρισμό πινάκων από τιμές, όπως είναι οι εικόνες. Η κύρια εφαρμογή τους είναι στην όραση υπολογιστών, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για επεξεργασία φυσικής γλώσσας [27]. Λειτουργούν με τη χρήση πυρήνων σε κάθε επίπεδο (συνελκτικό στρώμα), δηλαδή με τον πολλαπλασιασμό της εισόδου με πίνακες που στοχεύουν στην εξαγωγή χαρακτηριστικών, και ύστερα με κανονικοποίηση της εξόδου μέσα από ένα στρώμα ενεργοποίησης, όπου συνήθως χρησιμοποιείται η συνάρτηση ReLU:

$$f(x) = \max\{0, x\} \quad (2.9)$$

Ανάμεσα σε αυτά τα επίπεδα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα στρώμα δειγματοληψίας, το οποίο μειώνει τη διάσταση των πινάκων με τα χαρακτηριστικά μέσω υποδειγματοληψίας.

Κεφάλαιο **3**

Πειράματα και αποτίμηση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται, αρχικά, ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας, τα οφέλη και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μελέτη για την υλοποίηση του συστήματος με Digital Twins.

3.1 Η υλοποίηση: στόχος και περιγραφή

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η κατασκευή ενός συστήματος αισθητήρων με Digital Twin, ώστε να αποδειχθεί στην πράξη το εφικτό της ιδέας των Digital Twins, να αποτιμηθούν τα οφέλη που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2 και να ληφθούν συμπεράσματα κοντά στην πραγματικότητα. Παράλληλα, πρέπει να γίνει κριτική στις αδυναμίες που μπορούν να παρατηρηθούν για το συνολικό σύστημα και να σημειωθούν οι πρακτικές δυσκολίες που προκύπτουν κατά την υλοποίηση.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα που πρόκειται να υλοποιηθεί είναι ένα σύστημα αισθητήρων, με 7 σημεία λήψης μετρήσεων και αφορά την παρακολούθηση και προσομοίωση του ορόφου όπου στεγάζεται το Εργαστήριο Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων στον χώρο της σχολής. Κύριο μέλημα είναι η παρακολούθηση περιβαλλοντολογικών μετρήσεων (θερμοκρασία, υγρασία κ.α.) στον χώρο για τη δημιουργία προτάσεων βελτίωσης της κατάστασης, όπως "άναψε/σβήσε τον κλιματισμό στον χώρο". Απώτερος στόχος είναι να μπορεί να προβλεφθούν οι συνθήκες του χώρου, όχι μόνο για λόγους ασφαλείας αλλά και για να μπορούν να εργαστεί με άνεση το προσωπικό. Στο πλαίσιο της ασφάλειας του χώρου, τοποθετούνται αισθητήρες στο δωμάτιο όπου βρίσκονται οι servers, για την ανίχνευση υπερθέρμανσης, νερού ή πυρκαγιάς, και στην κουζίνα, έχοντας κατά νου την προειδοποίηση για ηλεκτρικές συσκευές που δεν πρέπει να βρίσκονται κοντά μεταξύ τους.

3.2 Απαιτούμενο υλικό

Σε τελική ανάλυση, για την υλοποίηση όλων των κυκλωμάτων που ακολουθούν, χρησιμοποιούνται τα εξής ηλεκτρονικά στοιχεία:

1. 7 ESP32 Development Board DEVKIT V1: Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αποτελεσματικής διεπαφής για την επικοινωνία με το υλικό των αισθητήρων. Είναι το κέντρο σύνδεσης των περιφερειακών για κάθε σημείο δειγματοληψίας

στον χώρο. Είναι πλακέτες οικονομικές, με δυνατότητα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και τροφοδοτούνται εύκολα, με φορτιστή κινητού τηλεφώνου ή μπαταρίες (ιόντων λιθίου, για παράδειγμα). Ωστόσο, έχουν περιορισμένη εμβέλεια στη σύνδεση Wi-Fi. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν καταλήξουμε στη χρήση αυτής της πλακέτας ξεκίνησε η υλοποίηση με πλακέτα Arduino UNO. Η ανάγκη αλλαγής προέκυψε από την ανάγκη σύνδεσης στο διαδίκτυο για την ανακοίνωση των αποτελεσμάτων στο υπόλοιπο σύστημα.

2. 7 καλώδια USB προς micro USB, για την τροφοδοσία των πλακετών.
3. 7 αισθητήρες DHT11, για τη μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας. Είναι το κύριο είδος αισθητήρα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.
4. 2 αισθητήρες φωτός.
5. 2 αισθητήρες ήχου.
6. 1 αισθητήρας απόστασης (HC-SR04).
7. 3 LEDs.
8. 2 ηχεία (buzzer) 3.3V.
9. 3 αντιστάτες 1 kΩ και 2 ποτενσιόμετρα.

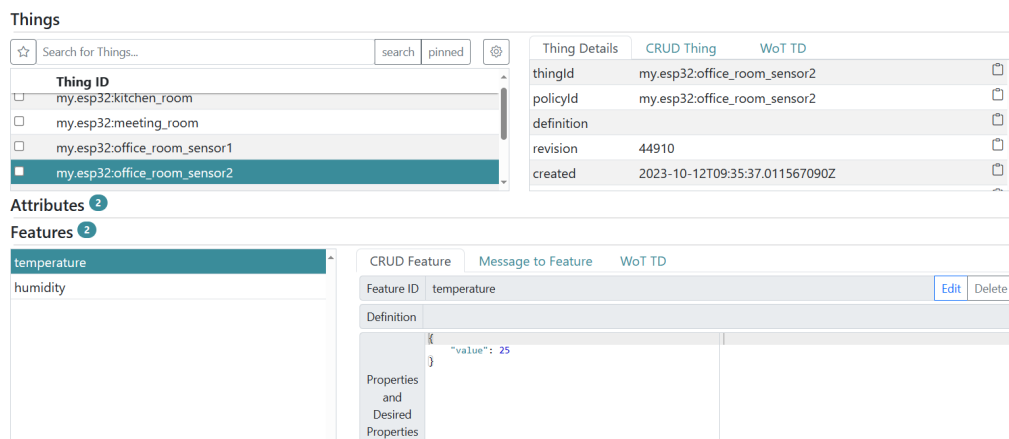
3.3 Χωρισμός σε δωμάτια

Υπάρχουν τέσσερις χώροι για την εγκατάσταση του εξοπλισμού: Ο χώρος του γραφείου, το δωμάτιο συναντήσεων, το δωμάτιο της κουζίνας και το δωμάτιο με τους servers. Εγκαθιστούμε τέσσερα σημεία μέτρησης στον χώρο του γραφείου επειδή είναι ο μεγαλύτερος και στους υπόλοιπους χώρους αρκεί ένα σημείο μέτρησης στον καθέναν. Τα σημεία μέτρησης αντιστοιχούν ένα προς ένα στις πλακέτες, δηλαδή ένα σημείο μέτρησης είναι μία πλακέτα ESP32 με συνδεδεμένους αισθητήρες.

3.4 Λογισμικό

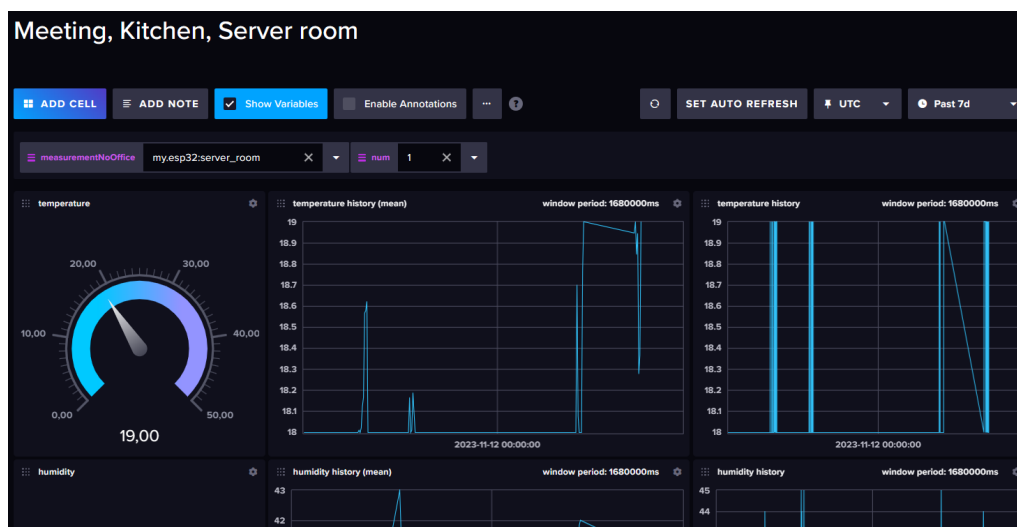
Το κεντρικό λογισμικό για τη διαχείριση των Digital Twins είναι το Eclipse Ditto [28], το οποίο είναι ανοιχτού κώδικα. Χρησιμοποιεί στην παρακολούθηση της τρέχουσας κατάστασης κάθε σημείου μέτρησης, για τη διεπαφή στην πρόσβαση των δεδομένων τους που προσφέρει και για τη δημιουργία σύνδεσης με τον διαμεσολαβητή (broker) με χρήση MQTT. Παράδειγμα χρήσης του Eclipse Ditto φαίνεται στην εικόνα 3.1. Στο πάνω αριστερό τμήμα έχουμε επιλέξει το επιθυμητό thing / σημείο μέτρησης, στα δεξιά βλέπουμε πόσες φορές έχουν εισαχθεί μετρήσεις (στο πεδίο revision), κάτω αριστερά βρίσκονται οι μετρούμενες ποσότητες και δεξιά οι αντίστοιχες τιμές τους.

Για τη διατήρηση των δεδομένων σε βάθος χρόνου χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων χρονοσειρών InfluxDB, καθώς ειδικεύεται στη διαχείριση δεδομένων πραγματικού χρόνου.



Εικόνα 3.1: Η κύρια σελίδα του Eclipse Ditto. Έχει επιλεγεί το δεύτερο σημείο στον χώρο των γραφείων (`my.esp32:office_room_sensor2`).

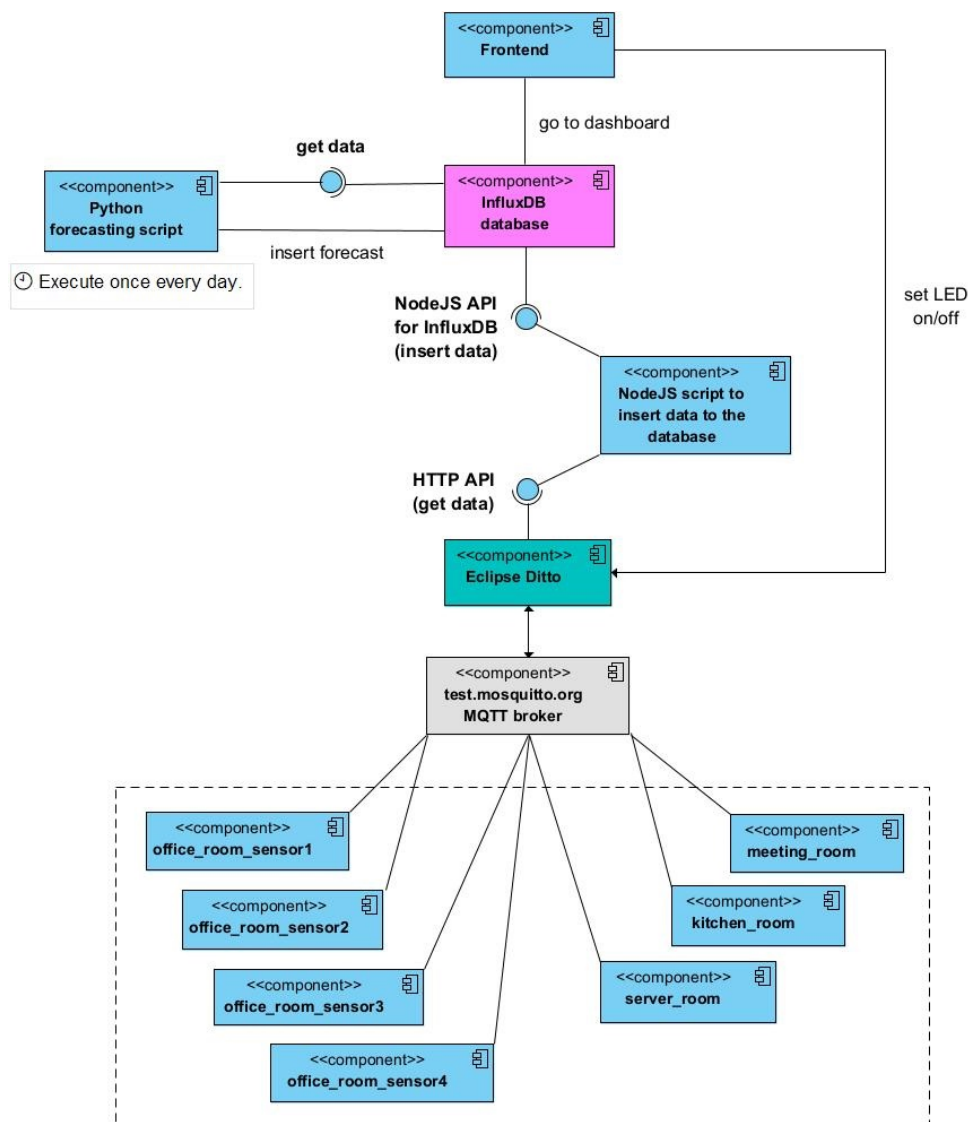
Επίσης, η απεικόνιση των δεδομένων και η προσφορά ενός περιβάλλοντος φιλικού προς τον χρήστη στήνεται με τη βοήθεια της ενσωματωμένης λειτουργίας των πινάκων ελέγχου (dashboards) της βάσης (εικόνα 3.2). Οι επερωτήσεις προς τη βάση δεδομένων για την απεικόνιση και τον συνδυασμό των χρονοσειρών για τις προβλέψεις γράφονται στην προσφερόμενη Flux query language.



Εικόνα 3.2: Στιγμιότυπο χρήσης των dashboards στη βάση δεδομένων InfluxDB.

Ακόμη, χρησιμοποιείται NodeJS script για την περιοδική μεταφορά της τρέχουσας κατάστασης κάθε σημείου μέτρησης, από το Eclipse Ditto στη βάση δεδομένων και η γλώσσα Python για τη εξαγωγή προβλέψεων. Η μελλοντική κατάσταση προβλέπεται με το μοντέλο Prophet. Έγινε αυτή η επιλογή σαν μέθοδος πρόβλεψης αφού, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, είναι δημοφιλής και επιτυχημένη επιλογή, σύμφωνα με προηγούμενες εργασίες. Φυσικά, για τη δημιουργία προγραμμάτων στις πλακέτες ανάπτυξης, γίνεται χρήση της γλώσσας C++ στο περιβάλλον του PlatformIO. Επιπλέον, η βασική σελίδα διεπαφής με τον χρήστη γράφηκε σε HTML και Javascript. Τέλος, με τη βοήθεια μερικών σεναρίων σε Bash αυτοματοποιούνται λειτουργίες όπως η μαζική δημιουργία των αντικειμένων στο Eclipse Ditto και

η μαζική εισαγωγή προβλέψεων. Η αρχιτεκτονική συνολικά παρατίθεται στην εικόνα 3.1. Όλα τα στοιχεία τρέχουν και προσφέρονται από τον τοπικά στημένο Ubuntu server (χωρίς φυσικά τις 7 πλακέτες, που φαίνονται εντός του πλαισίου με τη διακεκομμένη γραμμή), με εξαίρεση τον MQTT broker, που προέρχεται από το διαδίκτυο.



Σχήμα 3.1: Η αρχιτεκτονική της υλοποίησης. Οι 7 πλακέτες επισημαίνονται στο κάτω μέρος.

3.5 Η λειτουργία κάθε σημείου μέτρησης

Τα σημεία μέτρησης σε κάθε χώρο έχουν διαφορετικό πλήθος αισθητήρων και εκτελούν εξειδικευμένο κώδικα όπου είναι απαραίτητο. Καταρχάς, κάθε σημείο ακούει σε MQTT κανάλι της μορφής ditto-channel-1742/{thingId}/command για τη λήψη εντολών και στέλνει τις μετρήσεις στο κανάλι ditto-channel-1742/{thingId}/result. Ως MQTT server χρησιμοποιείται ο test.mosquitto.org στη θύρα 1883, δηλαδή η επικοινωνία γίνεται χωρίς κρυπτογράφηση και χωρίς ταυτοποίηση χρήστη. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος server υποστηρίζει μια πληθώρα επιλογών και, έτσι, αν η κρυπτογράφηση και η ταυτοποίηση χρήστη είναι επιθυ-

μητά χαρακτηριστικά, τότε αρκεί η επικοινωνία να γίνει μέσω της θύρας 8885. Ακόμη, το thingId είναι το αναγνωριστικό της κάθε πλακέτας και παίρνει τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα 3.1.

thingId	χώρος
my.esp32:office_room_sensor{1, 2, 3, 4}	για τα τέσσερα σημεία στο χώρο του γραφείου
my.esp32:meeting_room	δωμάτιο συναντήσεων
my.esp32:kitchen_room	το δωμάτιο της κουζίνας
my.esp32:server_room	το δωμάτιο με τους servers

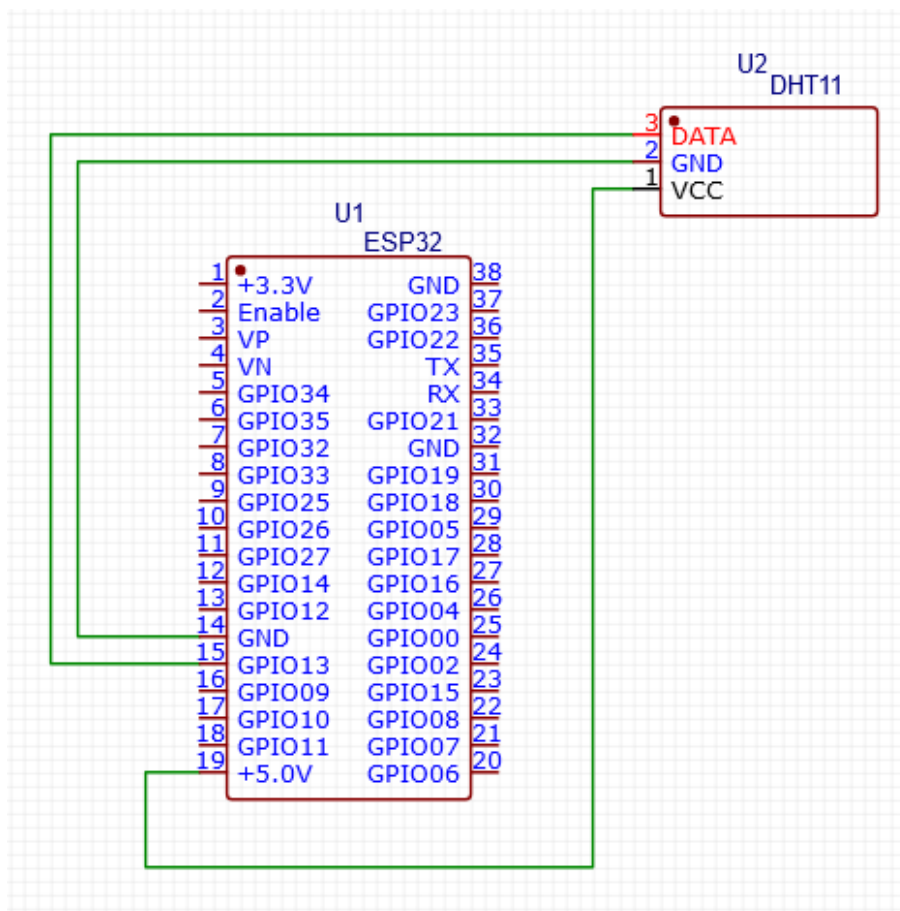
Πίνακας 3.1: Η λίστα με τα thingId που χρησιμοποιούνται

Όλες οι πλακέτες εκτελούν τα εξής βασικά βήματα: Ορίζονται πρώτα οι απαραίτητες σταθερές, δηλαδή το thingId που αναμένει το Eclipse Ditto και αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο σημείο, τα χρησιμοποιούμενα pins (για τους αισθητήρες και τα LEDs), ο ρυθμός μεταφοράς της σειριακής επικοινωνίας, μεγέθη σε bytes διάφορων ενδιάμεσων buffers που χρησιμοποιούνται για την αποστολή και λήψη των MQTT μηνυμάτων, ο ρυθμός δημοσίευσης των αποτελεσμάτων στο διαδίκτυο (ίσος με κάθε 10 δευτερόλεπτα), τα στοιχεία σύνδεσης στο Wi-Fi, το όνομα του MQTT server και τα σχετικά κανάλια MQTT. Τα κανάλια MQTT είναι δύο για κάθε πλακέτα, το ένα αντιστοιχεί στη λήψη εντολών και το άλλο στη δημοσίευση των μετρήσεων των αισθητήρων. Έχουμε 7 πλακέτες, έτσι συνολικά τα κανάλια είναι $2 \times 7 = 14$ στο πλήθος. Όσον αφορά την εκτέλεση, εκκινείται η σειριακή επικοινωνία για την καταγραφή των γεγονότων (σφάλματα, μετρήσεις κτλ) και γίνεται αρχικοποίηση του αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας. Συγκεκριμένα, ανιχνεύεται ο τύπος του αισθητήρα και τυπώνονται, μέσω σειριακής επικοινωνίας, οι πληροφορίες για την ανάλυση και τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή μέτρησης. Στη δική μας περίπτωση, έχουμε ανάλυση έως 1°C και το εύρος είναι από 0°C έως 50°C . Στη συνέχεια, επιχειρείται η σύνδεση με το δίκτυο Wi-Fi και επαναλαμβάνεται η προσπάθεια σύνδεσης επ' αόριστον, μέχρι να επιτύχει. Αυτό γίνεται επειδή είναι απαραίτητη για το σημείο μέτρησης η σύνδεση στο διαδίκτυο, καθώς δε στέλνουν τα δεδομένα μέσω σύνδεσης καλωδίου αλλά μέσω κεραίας. Περιμένουμε λοιπόν μέχρι να εγκατασταθεί η σύνδεση στο διαδίκτυο, καθώς οι μετρήσεις δεν είναι χρήσιμες αν δε μπορούν να δημοσιευθούν. Τονίζεται ότι κάθε σημείο ανακοινώνει στο αντίστοιχο κανάλι όλες τις μετρήσεις που παράγει μέσω δομής JSON, με σκοπό την ενημέρωση του Eclipse Ditto. Τότε γίνεται έλεγχος ότι ο MQTT server απαντά με τη βοήθεια ενός ping και, από εκείνη τη στιγμή, δημοσιεύονται κάθε 10 δευτερόλεπτα οι μετρήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι καθορίζεται η συνάρτηση που θα καλείται μόλις λαμβάνεται εντολή από το κανάλι εντολών. Όπως ορίζεται, τυπώνει το μήνυμα (JSON) που λαμβάνεται, μετατρέπει το μήνυμα σε αντικείμενο ισοδύναμο με JSON και, ύστερα από μερικούς ελέγχους που επιβεβαιώνουν τη σωστή μορφή του μηνύματος που ελήφθη, εξάγεται η τιμή που θέλει να θέσει ο χρήστης. Αυτή είναι οι κύρια λειτουργία των σημείων μέτρησης στον χώρο του γραφείου (εικόνα 3.2) και μετράται θερμοκρασία και υγρασία. Όσον αφορά το σύνολο των υποστηριζόμενων εντολών, ο χρήστης μπορεί να στείλει στο κανάλι εντολών το ακόλουθο αντικείμενο JSON σε μορφή κειμένου, για να ανάψει το συνδεδεμένο LED:

```
{"path":"/inbox/messages/LED", "value":"1"}
```

Για να σβήσει το LED στέλνουμε "0" στο πεδίο value, αντίστοιχα. Στο παρασκήνιο, ο κώδικας

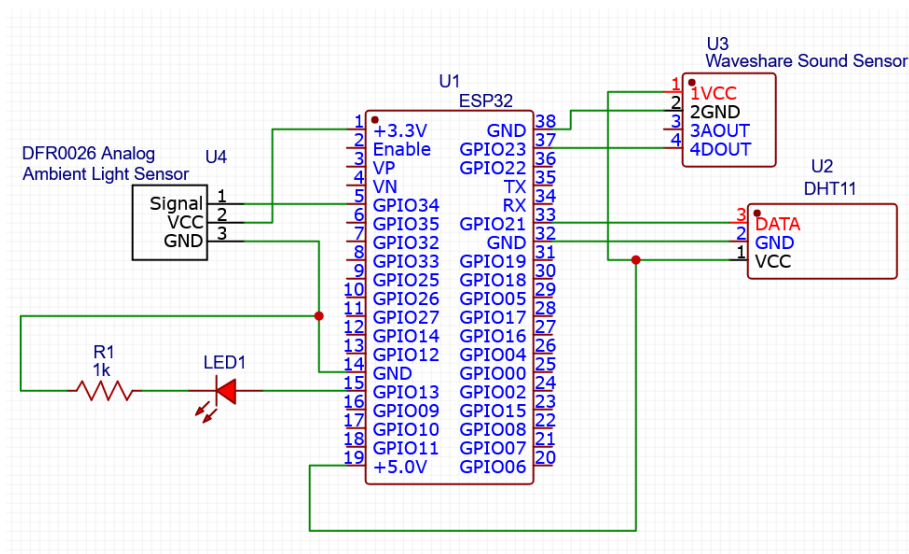
της πλακέτας, μόλις διαβάσει "0", θέτει χαμηλή τάση στο pin που αντιστοιχεί το LED και μόλις διαβάσει "1" θέτει υψηλή τάση. Αυτό αντιπροσωπεύει την αποστολή εντολής στις συσκευές στα άκρα.



Σχήμα 3.2: Το κύκλωμα για καθένα από τα τέσσερα σημεία του γραφείου.

Όσον αφορά το σημείο μέτρησης στο δωμάτιο συναντήσεων (εικόνα 3.3), μετράται επιπλέον το επίπεδο του ήχου και της φωτεινότητας. Αν επικρατεί ησυχία στο δωμάτιο ανακοινώνεται από την πλακέτα η τιμή 0 στο πεδίο `isNoisy`, διαφορετικά εκπέμπεται 1. Υποθέτουμε ότι το δωμάτιο έχει ησυχία εφόσον έχουν περάσει 30 δευτερόλεπτα χωρίς να ανιχνεύσει ο αισθητήρας δυνατό ήχο. Αυτή η λειτουργία υλοποιείται με την προσάρτηση διακοπής (`interrupt`) στο ψηφιακό pin του αισθητήρα ήχου και με δύο μεταβλητές, την `is_noisy`, που κρατά την τιμή που πρέπει να εκπεμφθεί, και την `last_noise_ms` που κρατά τη χρονική στιγμή που ανιχνεύθηκε ο τελευταίος ήχος. Η `is_noisy` αρχικοποιείται στο 0 και η `last_noise_ms` στην ώρα έναρξης του προγράμματος σε `millisecond`. Το ψηφιακό pin του αισθητήρα ήχου μετρά εάν το επίπεδο της έντασης ξεπερνά μία ορισμένη τιμή. Η τιμή αυτή καθώς και η ευαισθησία του αισθητήρα μεταβάλλεται από δύο ποτενσιόμετρα που βρίσκονται πάνω του. Τα ρυθμίζουμε ώστε να ταιριάζουν στο επίπεδο του ήχου που θέλουμε να ανιχνεύσουμε και στην ακουστική του χώρου. Εφόσον ο αισθητήρας δίνει απ' ευθείας την ένταση του ήχου, η διακοπή ρυθμίζεται ώστε να καλείται μόλις ανέβει το επίπεδο ήχου, δηλαδή κατά τη μετάβαση από το λογικό 1 στο λογικό 0. Κατά την εκτέλεσή της τίθεται `is_noisy = 1` και το `last_noise_ms` ίσο με την τρέχουσα χρονική στιγμή. Για να ανιχνεύσουμε πότε έχουν περάσει

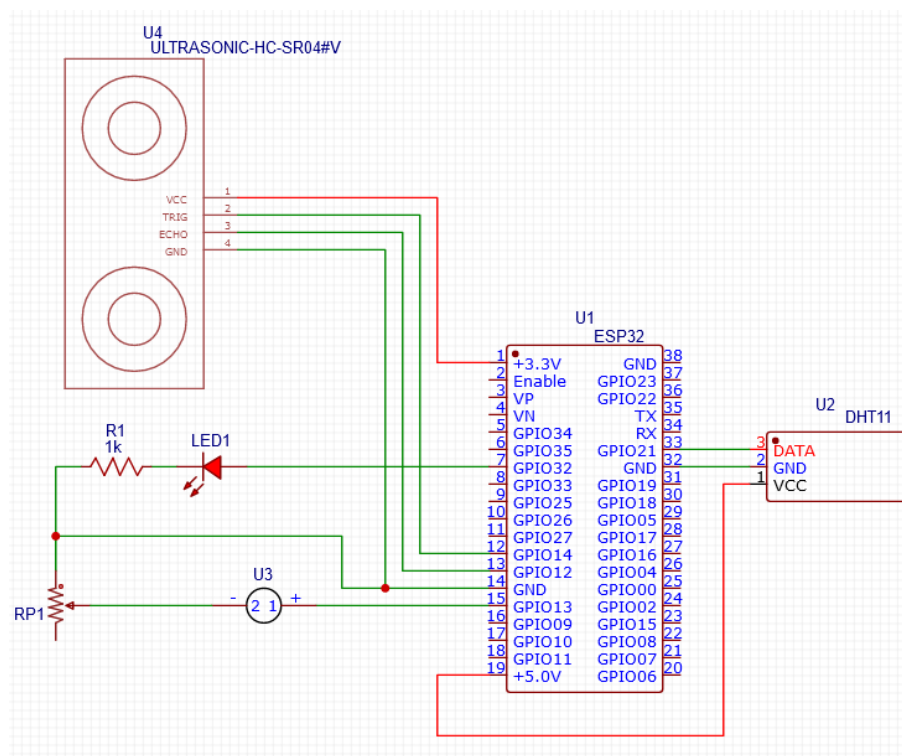
τα 30 δευτερόλεπτα χωρίς ήχο και, κατά συνέπεια, τότε έχει επικρατήσει η ησυχία ελέγχουμε κάθε φορά στον βρόχο επανάληψης, προτού στείλουμε την τιμή της έντασης, εάν η τωρινή ώρα διαφέρει περισσότερο από 30 δευτερόλεπτα από την `last_noise.ms`. Εάν ισχύει, θέτουμε πάλι `is_noisy = 0`. Για τη μέτρηση του επιπέδου φωτεινότητας χρησιμοποιείται αναλογικός αισθητήρας. Για αυτόν τον λόγο, πρέπει ο αισθητήρας να συνδεθεί με pin μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC pin). Η έξοδος της αναλογικής ανάγνωσης βρίσκεται στο εύρος από 0 έως 4095. Έτσι δημιουργούμε την κλίμακα φωτεινότητας αντιστοιχίζοντας το 0 στο σκοτάδι και το 4095 στην πολύ φωτεινή ένταση φωτός. Αυτές είναι και οι τιμές που εισάγονται στη βάση δεδομένων.



Σχήμα 3.3: Το κύκλωμα για το δωμάτιο συναντήσεων. Σημειώνεται ότι τα LEDs έχουν συνδεθεί στα υπόλοιπα κυκλώματα.

Στο σημείο της κουζίνας (εικόνα 3.4) γίνεται, επιπλέον, σε σχέση με τον χώρο του γραφείου, μέτρηση της απόστασης της πλησιέστερης οικιακής συσκευής από την πλακέτα, σε εκατοστά του μέτρου. Έχει προσαρτηθεί ηχείο (buzzer) για να ακούγεται ήχος στην περίπτωση όπου η απόσταση γίνει επικίνδυνα μικρή, συγκεκριμένα μόλις γίνει μικρότερη από 7 εκατοστά. Από την πλευρά του υλικού, αυτό το σκεπτικό γίνεται εφικτό με τον αισθητήρα HC-SR04, ο οποίος έχει δύο τύμπανα, το πρώτο για την εκπομπή ήχου και το δεύτερο για να ανιχνευθεί η ηχώ (συγκεκριμένα, η χρονική διαφορά μεταξύ εκπομπής και λήψης) που προκαλεί η ανάκλαση του ήχου από το αντικείμενο που βρίσκεται μπροστά από τον αισθητήρα. Το τύμπανο διέγερσης αντιστοιχεί στο TRIG pin και το τύμπανο λήψης στο ECHO pin. Όσον αφορά το buzzer, έχουμε συνδέσει ένα ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της έντασης. Από την πλευρά του λογισμικού, στον κώδικα, ενεργοποιούμε τη λειτουργία PWM για το pin του buzzer, καθώς το buzzer είναι παθητικό, δηλαδή πρέπει εμείς να δημιουργήσουμε την κυματομορφή που ακούγεται από το ηχείο και δεν αρκεί απλώς να δώσουμε υψηλή τάση. Ύστερα, αρχικοποιούμε τον αισθητήρα απόστασης, και ελέγχουμε σε κάθε επανάληψη του κύριου βρόχου εάν η απόσταση είναι μικρότερη από την κρίσιμη απόσταση, περίπτωση στην οποία ενεργοποιείται το ηχείο με τη βοήθεια τη συνάρτησης `tone(BUZZER_PIN, BUZZER_FREQUENCY)`; , διαφορετικά απενεργοποιείται. Η συχνότητα που ακούγεται, `BUZZER_FREQUENCY`,

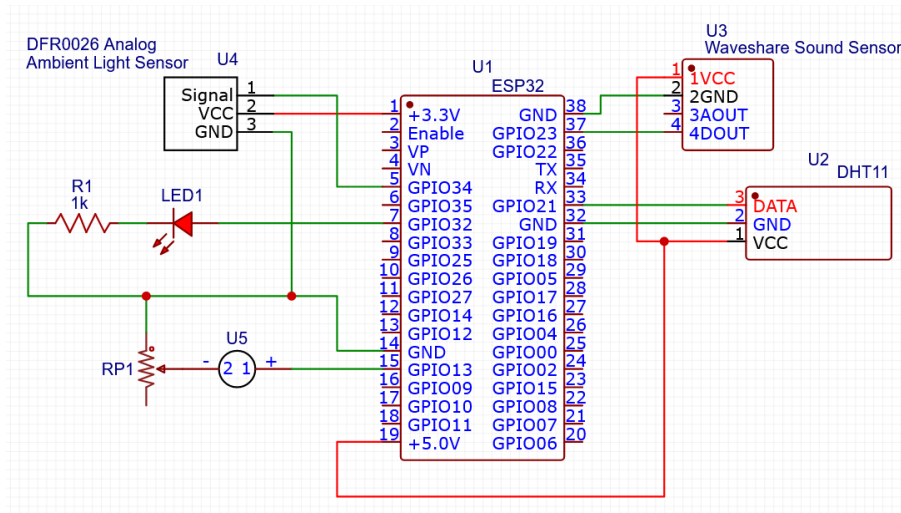
ρυθμίζεται στα 500 Hz.



Σχήμα 3.4: Το κύκλωμα στο δωμάτιο της κουζίνας.

Όμοια με το δωμάτιο συναντήσεων, στο δωμάτιο με τους servers (εικόνα 3.5) παρακολουθείται η θερμοκρασία, η υγρασία, το επίπεδο του ήχου και η φωτεινότητα. Επιπλέον, στο κύκλωμα αυτό υπάρχει ηχείο με ποτενσιόμετρο και η δυνατότητα για την πλακέτα να στέλνει μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου στον υπεύθυνο δικτύων, όταν ανιχνευθεί δυνατός θόρυβος στο δωμάτιο. Η μέτρηση του ήχου και της φωτεινότητας γίνεται με τρόπο παρόμοιο με το δωμάτιο συναντήσεων. Για την αποστολή μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, δημιουργούμε πρώτα λογαριασμό στο Gmail και ενεργοποιούμε ένα Συνθηματικό Εφαρμογής (App password) στις ρυθμίσεις. Χρειάζεται αυτό το βήμα για να επιτύχει η αυθεντικοποίηση χρήστη στην πλακέτα, η οποία δεν υποστηρίζει τη διαδικασία σύνδεσης στον λογαριασμό με δύο βήματα (two-step verification). Αυτό το συνθηματικό το αποθηκεύουμε σε σταθερά στον κώδικα. Επίσης, στις σταθερές έχουμε τον SMTP server που ζητάμε να μας εξυπηρετήσει, εδώ ο smtp.gmail.com, καθώς και τη θύρα στην οποία ακούει, την 465, το όνομα προσφώνησης του παραλήπτη και τη διεύθυνση e-mail του. Στην αρχικοποίηση για την αποστολή e-mail επιβεβαιώνουμε τη σύνδεση στο διαδίκτυο, ενεργοποιούμε την εκτύπωση διαγνωστικών μηνυμάτων στη σειριακή θύρα, και θέτουμε τη συνάρτηση για την αναφορά της διαδικασίας αποστολής, η οποία καλείται ασύγχρονα. Στη συνέχεια, μεταφέρουμε τις παραπάνω σταθερές μεταβλητές σχετικές με την επικοινωνία των servers στο αντικείμενο emailConfig και θέτουμε επιπλέον σαν διεύθυνση IP πελάτη την 127.0.0.1 και τη ζώνη ώρας, GMT+3. Στην συνάρτηση που στέλνει το μήνυμα, void email_send(const char* subject, const char* content), ελέγχουμε αν εκτελέστηκε με επιτυχία η αρχικοποίηση και τότε μεταφέρουμε τις παραπάνω σταθερές για τα στοιχεία του παραλήπτη στο αντικείμενο

SMTP_Message emailMessage και θέτουμε και λοιπές παραμέτρους όπως την προτεραιότητα του μηνύματος και την κωδικοποίηση των χαρακτήρων. Η email_send() καλείται μόλις τεθεί η μεταβλητή mustSendEmail ίση με true και συμβαίνει μόλις κληθεί συνάρτηση διακοπής που αναφέρθηκε στην περίπτωση του δωματίου συναντήσεων (ομοίως, υπάρχει κι εδώ). Έτσι, τελικά, σε κάθε επανάληψη του κύριου βρόχου ελέγχουμε εάν πρέπει να ενημερώσουμε την κατάσταση επιπέδου θορύβου, εάν πρέπει να στείλουμε μήνυμα και εάν πρέπει να ενεργοποιηθεί το ηχείο.



Σχήμα 3.5: Το κύκλωμα για το δωμάτιο με τους servers.

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζουμε συνοπτικά τις μετρήσεις που συλλέγει το κάθε σημείο μέτρησης και τις διαθέσιμες δράσεις του, στον πίνακα 3.2.

thingId	Μετρήσεις			Δράσεις			
	Θ&Υ	ήχος	φως	απόσταση	LED	ηχείο	e-mail
my.esp32:office_room_sensor{1..4}	✓						
my.esp32:meeting_room	✓	✓	✓		✓		
my.esp32:kitchen_room	✓			✓	✓	✓	
my.esp32:server_room	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Πίνακας 3.2: Η λίστα των απαιτήσεων από κάθε σημείο μέτρησης.

3.6 Η διεπαφή του χρήστη

Ο χρήστης αποκτά πρόσβαση στο σύστημα μέσω ιστοσελίδας HTML (εικόνα 3.3) που υποστηρίζεται από Javascript και έτσι παίζει αυτή τον ρόλο του frontend. Στον πρώτο τομέα, του Dashboard, δίνεται η δυνατότητα να παρακολουθήσει ο χρήστης την εξέλιξη των μετρήσεων στον χρόνο μέσω γραφικών παραστάσεων και μετρητών. Το πρώτο κουμπί με όνομα "Home Page" οδηγεί στα τέσσερα Dashboards στην αντίστοιχη ιστοσελίδα της τοπικής εγκατάστασης της InfluxDB. Σε καθένα από τα τέσσερα Dashboards μπορεί να οδηγηθεί ο χρήστης με καθένα από τα επόμενα τέσσερα κουμπιά, όπου παρουσιάζονται τα εξής δεδομένα:

Εικόνα 3.3: Η μορφή του frontend. Η περισσότερη έμφαση έχει δοθεί στη λειτουργικότητά του.

1. "Temperature & Humidity by room": Εμφανίζονται σε μετρητές και σε γράφημα τα περιβαλλοντικά δεδομένα (η θερμοκρασία, η υγρασία και η φωτεινότητα). Μπορεί να επιλεγθεί το σημείο μέτρησης στο πάνω μέρος, βλέπε εικόνα 3.4.
2. "Office temperature means": Η μέση θερμοκρασία σε βάθος χρόνου ανά σημείο μέτρησης στον χώρο του γραφείου (τέσσερις μετρητές) και ένας μετρητής που τα συνοψίζει στη μέση τιμή της θερμοκρασίας στον χώρο.
3. "Meeting, Kitchen, Server room": Πίνακας δεδομένων εξειδικευμένος για το τρία δωμάτια που παράγουν επιπλέον μετρήσεις από τον χώρο του γραφείου.
4. "Meeting room occupation": Γραφήματα με την παρατηρηθείσα τιμή φωτός και επιπέδου θορύβου για τις προηγούμενες ημέρες, σε συνδυασμό με την πρόβλεψη του μοντέλου.

Στον δεύτερο τομέα, γίνεται πρόβλεψη της κίνησης στο δωμάτιο συναντήσεων ώστε να βρεθεί η ημερομηνία και ώρα που το δωμάτιο είναι ελεύθερο, για να μπορέσει ο χρήστης να διεξάγει τη συνάντησή του εκείνη την ώρα. Στην πρώτη γραμμή εισάγεται η διάρκεια της συνάντησης σε ώρες και με το πάτημα του κουμπιού "Show availability" εμφανίζεται στη δεύτερη γραμμή η προβλεπόμενη ώρα που το δωμάτιο είναι ελεύθερο. Στο παρασκήνιο, η ιστοσελίδα επικοινωνεί με εφαρμογή NodeJS που λαμβάνει το αίτημα, εκτελεί το προκαθορισμένο Flux query προς τη βάση δεδομένων και επιστρέφει πίσω το αποτέλεσμα.

Στον τρίτο τομέα γίνεται η αποστολή εντολών. Πρώτα εισάγονται τα στοιχεία σύνδεσης του Eclipse Ditto και, εφόσον θέλουμε να στείλουμε εντολή για να ανάψει το LED, το αναγνωριστικό του σημείου μέτρησης που θέλουμε να εκτελέσει την εντολή καθώς και την



Εικόνα 3.4: Ο πίνακας ελέγχου "Temperature & Humidity by room".

τιμή. Πατώντας το "Submit" στέλνεται το μήνυμα μέσω του Eclipse Ditto για αποστολή στις πλακέτες. Για την επιτυχία αυτού του βήματος, έχει ανοίξει προσαρμοσμένη Σύνδεση με ειδικά δικαιώματα στο Eclipse Ditto.

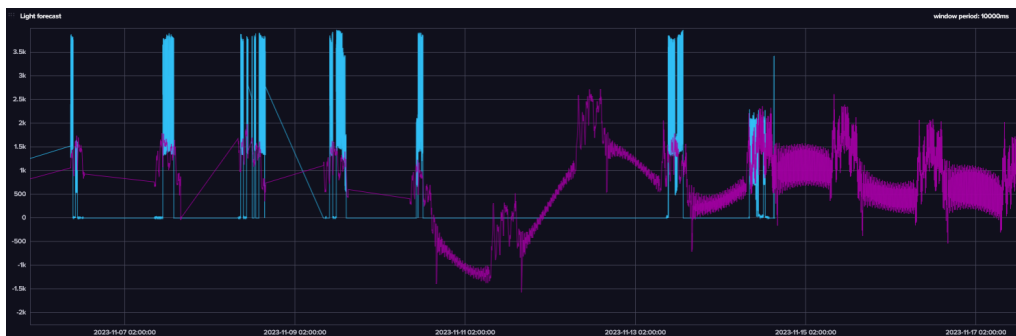
3.7 Η διαδικασία της πρόβλεψης

3.7.1 Η μεθοδολογία δημιουργίας των προβλέψεων

Για την πρόβλεψη της κίνησης στο μέλλον για το δωμάτιο των συναντήσεων χρησιμοποιείται το μοντέλο Prophet της Meta [29]. Δημιουργούνται δύο χρονοσειρές από το μοντέλο, μία για τον μελλοντικό φωτισμό (τιμές ακέραιες από 0 έως 4095) του δωματίου και μία για το μελλοντικό επίπεδο θορύβου (τιμές 0 και 1). Παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 3.5. Σημειώνεται ότι κάθε μέρα τα δεδομένα είναι διαθέσιμα τις εργάσιμες ώρες, για αυτό τα σημεία της πρόβλεψης εκτός ωραρίου που είναι μεγάλης συχνότητας και πλάτους δε μας απασχολούν. Όπως γίνεται αντιληπτό, το μοντέλο προσπαθεί να προβλέψει από το σημείο όπου τελειώνει η μπλε χρονοσειρά και πέρα. Ύστερα, γίνεται συνδυασμός των δύο αποτελεσμάτων, σε μία χρονοσειρά πρόβλεψης, η οποία λαμβάνει την τιμή 1 εάν το δωμάτιο είναι κατειλημμένο και 0 αν είναι ελεύθερο, σύμφωνα με το εξής σκεπτικό:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } \Phi(t) > K\Phi \text{ και } \Theta(t) > K\Theta \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.1)$$

όπου $\Phi(t)$ η τιμή της χρονοσειράς φωτεινότητας και $\Theta(t)$ του θορύβου και $K\Phi$, $K\Theta$ ορισμένα κατώφλια. Πιο συγκεκριμένα, η επερώτηση που δίνει την απάντηση για το πότε είναι το δωμάτιο ελεύθερο εκτελεί τα εξής βήματα: Λαμβάνει από τα δύο αποτελέσματα πρόβλεψης τα σημεία από την τωρινή ώρα και έπειτα, στρογγυλοποιεί στα 10 λεπτά τις χρονοσφραγ-



Εικόνα 3.5: Παράδειγμα πρόβλεψης του μεθλιθοντικού φωτισμού στο δωμάτιο συναντήσεων από το μοντέλο. Με μπλε χρώμα είναι οι τιμές που καταγράφονται από τον αισθητήρα και με μωβ η πρόβλεψη.

γίδες για να είναι στοιχισμένες οι δύο χρονοσειρές και εφαρμόζει το δοθέν κατώφλι σε δύο ξεχωριστές επερωτήσεις για κάθε χρονοσειρά. Έπειτα, ενώνει τις δύο επερωτήσεις σύμφωνα με την παραπάνω $g(t)$ και θέτει ως 1 τις ώρες εκτός ωρών εργασίας, διότι γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι δεν είναι εφικτό να κανονιστεί συνάντηση εκείνες τις ώρες. Οι εργάσιμες ώρες είναι από τις 9:00πμ έως τις 5:00μμ, εξαιρώντας τα Σαββατοκύριακα. Τώρα, για το τελικό αποτέλεσμα λαμβάνεται ο μέσος όρος ανά 10 λεπτά σαν χρονικό παράθυρο μήκους ωρών όσων μας έχει δώσει ο χρήστης και, αφού μετακινηθεί κατάλληλα στον χρόνο το αποτέλεσμα, επιστρέφεται η πρώτη χρονική στιγμή που έχει μηδενική τιμή, ειδικά, όταν δεν υπάρχει, δίνεται ειδική τιμή, την οποία το frontend αποκωδικοποιεί εμφανίζοντας το κείμενο "Not available in the near future."

Όσον αφορά τον χρονισμό, η εισαγωγή των σειρών φωτεινότητας και θορύβου που παράγει το Prophet γίνεται *αυτόματα*, μία φορά την ημέρα (τα μεσάνυχτα). Αυτό προγραμματίστηκε μέσω του λειτουργικού συστήματος, με την εντολή `cron`. Αντιθέτως, η διαδικασία συνδυασμού των αποτελεσμάτων που περιγράφηκε εκτελείται ασύγχρονα, κάθε φορά που ο χρήστης πατάει το κουμπί "Show availability" στο frontend για να μάθει πότε είναι ελεύθερο το δωμάτιο συναντήσεων.

3.7.2 Η εκπαίδευση του μοντέλου

Η εκπαίδευση του Prophet ξεκίνησε με διασταυρούμενη επικύρωση (cross validation) για τις υπερπαραμέτρους `daily_seasonality`, `changepoint_prior_scale`, `seasonality_prior_scale` με πιθανά σύνολα τιμών τα `[10, 50, 100, 200]`, `[0.001, 0.01, 1.0]` και `[0.01, 0.1, 1.0, 10.0]` αντίστοιχα. Η κάθε υπερπαραμέτρος σημαίνει το εξής:

- `daily_seasonality` (ds): Το πλήθος των όρων Fourier που χρησιμοποιείται για να προσεγγιστεί η ημερήσια εποχικότητα. Μεγάλη τιμή συνεπάγεται μοντέλο με υψηλές συχνότητες.
- `changepoint_prior_scale` (cps): Επηρεάζει την ευαισθησία του μοντέλου στις αλλαγές. Αύξηση της τιμής αυξάνει το πλήθος των changepoints που λαμβάνονται, δηλαδή των δειγμάτων ελέγχου για ραγδαία αλλαγή της χρονοσειράς. Πολύ μεγάλες τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε overfit και άρα σε αποσταθεροποίηση της πρόβλεψης.

- `seasonality_prior_scale (sps)`: Ελέγχει το πλάτος της εποχικής συνιστώσας. Αύξηση της τιμής επιτρέπει καλύτερη προσαρμογή σε δεδομένα με μεγάλες εποχικές διακυμάνσεις.

Ωστόσο, όπως συμπεραίνουμε από το μηνύματα πληροφοριών στο τερματικό, το σύνολο των λογικών - έγκυρων τιμών που παίρνουν αυτές οι παράμετροι είναι μικρό. Για αυτόν τον λόγο, ύστερα από τον προσδιορισμό με διασταυρούμενη επικύρωση ρυθμίστηκαν περαιτέρω οι παράμετροι με βάση τον βαθμό προσαρμογής και γενίκευσης που παρουσίασε κάθε τελικό αποτέλεσμα. Ακόμη, πριν την εισαγωγή των δεδομένων εκπαίδευσης στο μοντέλο, εξετάστηκε η εφαρμογή κινητού μέσου όρου για την αφαίρεση του θορύβου. Έτσι, καταλήγουμε στις παραμέτρους του πίνακα 3.3.

Μέτρηση	ds	cps	sps	μέσος όρος
Φωτεινότητα	200	0.1	10.0	3m, 0m
Επίπεδο ήχου	100	0.05	10.0	6m, -3m

Πίνακας 3.3: Οι τελικές ρυθμίσεις για τα μοντέλα πρόβλεψης. Στην τελευταία στήλη, η πρώτη τιμή είναι το κάθε πότε λαμβάνεται ο μέσος όρος και η δεύτερη η μετατόπιση του παραθύρου, σε λεπτά (m).

Η επιλογή των κατάλληλων τιμών στα κατώφλια εξαρτάται από το πόσο αξιόπιστη και χωρίς θόρυβο θεωρούμε πως είναι η πρόβλεψη. Επειδή η πρόβλεψη εμφανίζει μη αμελητέα αβεβαιότητα, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα της ποιότητας του αισθητήρα που συλλέγει τα δεδομένα, υιοθετούνται χαμηλές τιμές για τα κατώφλια:

$$\begin{cases} K\Phi = 150 \\ K\Theta = 0.1 \end{cases} \quad (3.2)$$

3.7.3 Μετρικές επίδοσης

Για να ποσοτικοποιήσουμε την ποιότητα των προβλέψεων που παράγει το μοντέλο πρόβλεψης του Digital Twin για το δωμάτιο των συναντήσεων θα εξετάσουμε τις μετρικές precision, recall, f1-score, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$precision = \frac{TruePositive}{TruePositive + FalsePositive} \quad (3.3)$$

$$recall = \frac{TruePositive}{TruePositive + FalseNegative} \quad (3.4)$$

$$f1\text{-score} = \frac{2}{precision^{-1} + recall^{-1}} = 2 \frac{precision \cdot recall}{precision + recall} \quad (3.5)$$

Όπου True (αληθές) και False (ψευδές) είναι η ορθότητα της πρόβλεψης και Positive (θετικό) και Negative (αρνητικό) το αποτέλεσμα της πρόβλεψης. Για παράδειγμα, στη δική μας περίπτωση, το *TruePositive* μετρά το πλήθος των προβλέψεων όπου το μοντέλο προβλέπει σωστά ότι το δωμάτιο είναι κατειλημμένο και το *FalseNegative* το πλήθος προβλέψεων άδειου δωματίου, με το δωμάτιο στην πραγματικότητα να είναι γεμάτο. Για τον σκοπό μας, υποθέτουμε ότι το δωμάτιο είναι κατειλημμένο όταν η φωτεινότητά του υπερβαίνει το υποθετικό κατώφλι

ΥΚΦ, μιας και τα μοναδικά δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας για να συμπεράνουμε την απασχόληση του δωματίου είναι οι χρονοσειρές που παράγουν οι αισθητήρες. Με παρατήρηση των δεδομένων των χρονοσειρών τίθεται $ΥΚΦ = 500$ (θυμίζουμε ότι ο φωτισμός παίρνει τις ακέραιες τιμές από 0 έως 4095). Σαν σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης λαμβάνονται 9 εργάσιμες ημέρες όπου οι αισθητήρες παρήγαγαν δεδομένα, μέσα σε διάστημα δύο μηνών, συγκεκριμένα μία εβδομάδα στον Νοέμβριο (6/11/2023 έως 10/11/2023) και μία εβδομάδα μείον μία ημέρα (11/12/2023 έως 14/12/2023) στον Δεκέμβριο. Σαν δοκιμαστικό σύνολο έχουμε 3 εργάσιμες ημέρες επόμενης εβδομάδας (18/12/2023 έως 20/12/2023) μέσα στον Δεκέμβριο.

Αφού λάβουμε την πρόβλεψη από το μοντέλο στο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, για να προετοιμάσουμε τα δεδομένα για την αποτίμηση εκτελούμε σε ένα Python script τα εξής βήματα: Φορτώνουμε όλα τα δεδομένα και την πρόβλεψη σε δύο dataframes, κρατάμε μόνο την τιμή της χρονοσειράς και τον χρόνο στις στήλες και ομαδοποιούμε τα δεδομένα σε δεκάλεπτα σημεία με τη μέση τιμή. Ύστερα, εφαρμόζουμε το κατώφλι ΥΚΦ στο σύνολο δεδομένων και στο σύνολο της πρόβλεψης θέτουμε την τιμή 1 (κατειλημμένο δωμάτιο) αν η μέση τιμή που υπολογίστηκε είναι μεγαλύτερη ή ίση με 0,5, ειδάλλως 0. Με τη βοήθεια της συνάρτησης `precision_recall_fscore_support` του πακέτου `sklearn` υπολογίζουμε τις τιμές των μετρικών σε όλο το σύνολο δεδομένων.

- Precision = 0.560
- Recall = 0.819
- F1-score = 0.665

Αν υπολογίσουμε τις μετρικές στο σύνολο δοκιμής η απόδοση είναι κατά βάση παρόμοια αλλά ελαφρώς βελτιωμένη:

- Precision = 0.578
- Recall = 0.852
- F1-score = 0.689

Παρατηρούμε ότι το Precision είναι χαμηλό ενώ το Recall το υψηλότερο. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος τρόπος πρόβλεψης εντοπίζει τα χρονικά διαστήματα όπου το δωμάτιο συναντήσεων είναι κατειλημμένο αλλά προβλέπει συχνά ότι το δωμάτιο είναι κατειλημμένο ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι. Το F1-score συνοψίζει την επίδοση, μιας και ισούται με τον αρμονικό μέσο του Precision με το Recall.

3.7.4 Βελτίωση της τεχνικής πρόβλεψης

Το χαμηλό F1-score, που οφείλεται στη χαμηλή τιμή του Precision, εγείρει το ερώτημα αν μπορεί να βελτιωθεί η μέθοδος πρόβλεψης για να αυξηθεί η προβλεπτική ικανότητα του Digital Twin. Ενδεχομένως να υπάρχουν διαφορετικοί παράμετροι του μοντέλου Prophet που δίνουν καλύτερο αποτέλεσμα. Εκπαιδεύουμε το μοντέλο στη χρονοσειρά της φωτεινότητας για το δωμάτιο συναντήσεων μέσω διασταυρούμενης επικύρωσης σε ευρύτερο πεδίο

τιμών και σε περισσότερες παραμέτρους σε σχέση με την υποπαράγραφο 3.7.2, με εξαίρεση την υπερπαραμέτρο `daily_seasonality` που μπορεί να ρυθμιστεί με την επιλογή "auto". Δοκιμάζουμε συνδυασμούς από τις επιλογές που φαίνονται στον πίνακα 3.4. Τρεις παράμετροι είναι νέοι σε σχέση με προηγουμένως:

- `weekly_seasonality`: Όμοια με την υπερπαραμέτρο `daily_seasonality`. Ισούται με το πλήθος των όρων Fourier που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της εβδομαδιαίας εποχικότητας.
- `holidays_prior_scale`: Ρυθμίζει το πλάτος της συνιστώσας των αργιών.
- `seasonality_mode`: Προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιούνται οι εποχικές συνιστώσες. Με την προσθετική εποχικότητα ("additive") οι εποχικές συνιστώσες και η τάση (trend) συνδυάζονται με πρόσθεση. Η πολλαπλασιαστική εποχικότητα ("multiplicative") τα συνδυάζει με πολλαπλασιασμό, το οποίο δείχνει ότι το πλάτος των εποχικών όρων εξαρτάται από την πορεία της τάσης.

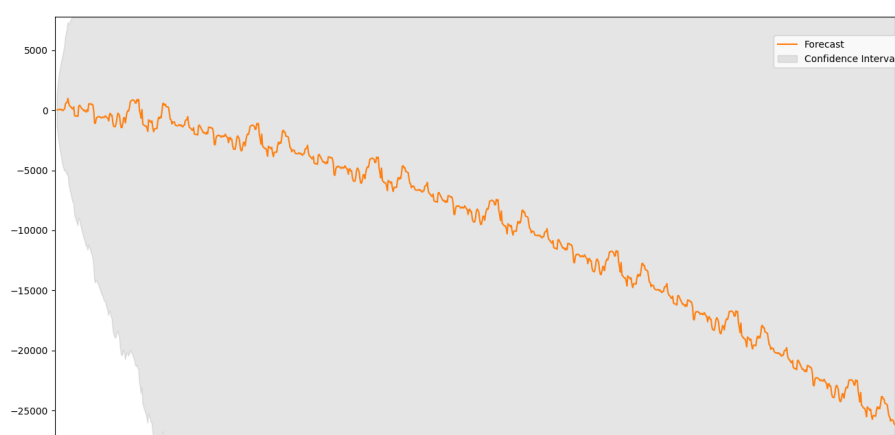
Παράμετρος	Σύνολο τιμών
<code>daily_seasonality</code>	['auto', 50, 100]
<code>weekly_seasonality</code>	['auto', 20, 30]
<code>changepoint_prior_scale</code>	[0.001, 0.005, 0.01, 0.02, 0.25, 0.4, 0.5]
<code>seasonality_prior_scale</code>	[0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0]
<code>holidays_prior_scale</code>	[0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0]
<code>seasonality_mode</code>	['additive', 'multiplicative']

Πίνακας 3.4: Το σύνολο τιμών για κάθε παράμετρο που θα δοκιμαστεί εκ νέου μέσω διασταυρούμενης επικύρωσης.

Ο καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων, με μετρική σφάλματος τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, που προκύπτει από αυτή την εκπαίδευση είναι `daily_seasonality='auto'`, `weekly_seasonality=30`, `changepoint_prior_scale=0.001`, `seasonality_prior_scale=2.5`, `holidays_prior_scale=0.01` και `seasonality_mode='multiplicative'`. Όμως, κανένας από τους παραπάνω συνδυασμούς δε πετυχαίνει να μειώσει τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος κάτω από την τιμή 1000. Παρατηρώντας σε γράφημα το αποτέλεσμα συμπεραίνουμε ότι ο προτεινόμενος συνδυασμός παραμέτρων ακολουθεί κυρίως τη μέση τιμή της χρονοσειράς και δεν προσαρμόζεται επαρκώς στις μεταβολές.

Εφόσον δε βελτιώθηκε η ποιότητα της πρόβλεψης με την πιο λεπτομερή εξερεύνηση στον χώρο των υπερπαραμέτρων μπορούμε να ελέγξουμε αν άλλες μέθοδοι πετυχαίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Αντί του μοντέλου Prophet μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα γνωστά κλασσικά μοντέλα πρόβλεψης, ARIMA και SARIMA, που περιγράφηκαν στην υποπαράγραφο 2.3.3 και να ελέγξουμε τη γενικότητά τους. Δοκιμάζουμε το μοντέλο ARIMA και διαπιστώνουμε ότι επηρεάζεται υπερβολικά από τα διαστήματα όπου το φως είναι διαρκώς σθηστό στο τέλος της ημέρας και δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσει και να εκφράσει ότι μέσα στη διάρκεια της ημέρας υπήρξαν περιπτώσεις όπου το φως ήταν αναμμένο. Συγκεκριμένα, δίνει προβλέψεις χωρίς αυξομειώσεις που ξεκινούν από τη στάθμη 0 (σκοτάδι)

και σταδιακά μειώνονται προς τα αρνητικά. Αντιθέτως, το SARIMA μοιάζει πιο υποσχόμενο. Στην εικόνα 3.6 φαίνεται το αποτέλεσμα του μοντέλου $SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_m$ με $p = 1, d = 2, q = 1, P = 2, D = 1, Q = 2, m = 144 (= 6 \cdot 24)$, τα σημεία δεδομένων τοποθετούνται ανά δέκα λεπτά και υποθέτουμε ότι το εποχικό κομμάτι έχει περίοδο μίας ημέρας). Οι διακυμάνσεις του γραφήματος μπορούν να μοντελοποιηθούν τις διακυμάνσεις εντός της ημέρας. Ωστόσο, η πρόβλεψη δεν είναι κοντά στα επίπεδα επίδοσης του Prophet και θα μπορούσε να εξεταστεί για περαιτέρω βελτιώσεις, όπως τη διόρθωση της πωτικής τάσης με την αύξηση του χρόνου. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η χρονοσειρά του φωτός δεν είναι στάσιμη διαδικασία, δηλαδή εξαρτάται από την ημέρα και τον μήνα παρατήρησης των τιμών και αυτός είναι ένας λόγος αποτυχίας των δύο μεθόδων.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα πρόβλεψης με το μοντέλο SARIMA.

Μια άλλη σκέψη είναι να μετατρέψουμε τη χρονοσειρά σε δυαδική χρονοσειρά, όπου το δωμάτιο είναι κατειλημμένο όταν το φως υπερβαίνει μία δεδομένη τιμή, και να καταφύγουμε σε μεθόδους μηχανικής μάθησης για να προβλέψουμε απευθείας την κατάληψη του δωματίου. Προς αυτόν τον στόχο έγινε δοκιμή πρόβλεψης με Λογιστική Παλινδρόμηση με χαρακτηριστικό εισόδου την ώρα της ημέρας. Όμως, όπως διαπιστώθηκε από το αποτέλεσμα, δεν είναι η σωστή αντιμετώπιση, μιας και το φως του δωματίου δεν είναι πάντοτε αναμμένο μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα της ημέρας, όπως θα συνέβαινε σε ένα πρόβλημα με διαφορετική παρατηρούμενη μεταβλητή. Σημειώνεται ότι ένας άλλος τρόπος να χρησιμοποιήσουμε μηχανική μάθηση είναι με μοντέλα της οικογένειας των RNN, που διαχειρίζονται ακολουθιακά δεδομένα όπως οι χρονοσειρές.

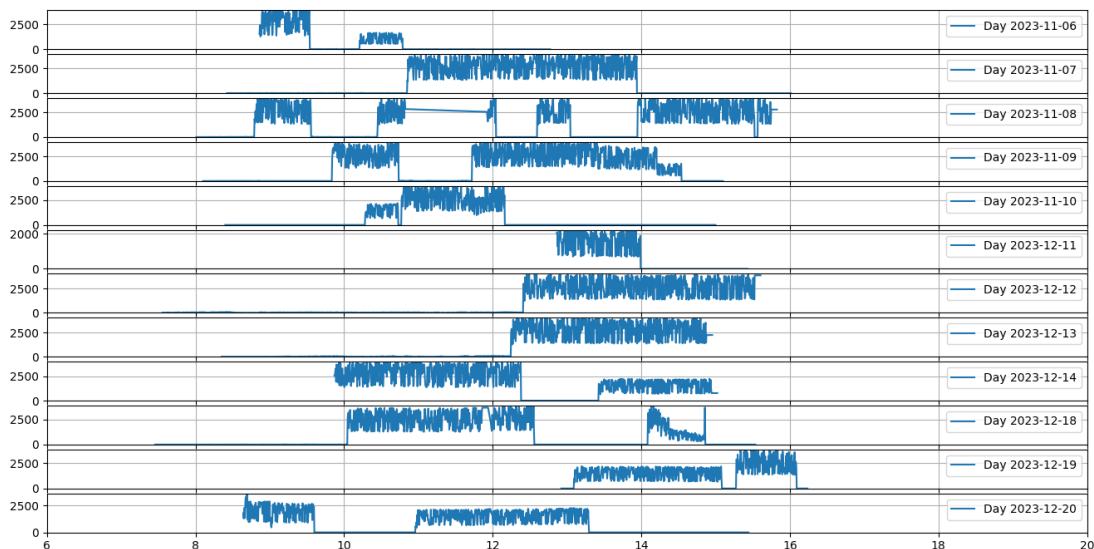
Ακόμη, μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα δικό μας μοντέλο για να προβλέψουμε την μελλοντική κατάληψη του δωματίου, έχοντας στη διάθεσή μας τη δυαδική χρονοσειρά κατάληψης, που αναφέραμε ότι έχει ληφθεί από τη χρονοσειρά του φωτός. Για να βρούμε εάν υπάρχουν όρισμένα χρονικά διαστήματα μέσα στην ημέρα που είναι πιο πιθανό να είναι κατειλημμένο το δωμάτιο υποθέτουμε ότι κάθε χρονική στιγμή μοντελοποιείται από μία τυχαία μεταβλητή Bernoulli. Έτσι, έχουμε μια σειρά από ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές Bernoulli με μεταβλητή πιθανότητα κατάληψης p που εξαρτάται από τον χρόνο. Θα υπολογίσουμε κάθε p_i ανά

λεπτό της ημέρας, με βάση τη συχνότητα κατάληψης, σύμφωνα τα δεδομένα. Συγκεκριμένα :

$$X_t \sim \text{Bernoulli}(p_t) \quad (3.6)$$

$$p_t = \sum_{i=1}^{N_t} \frac{x_{i,t}}{N_t}, t \in \{0, 1, \dots, 1439\} \quad (3.7)$$

Όπου $x_{i,t}$ είναι το δείγμα των δεδομένων εκπαίδευσης, N_t το πλήθος των σημείων για το λεπτό t στα δεδομένα, i ο αύξων αριθμός της ημέρας και t το συγκεκριμένο λεπτό από τα 1440 της ημέρας. Με υλοποίηση του μοντέλου αυτού προκύπτει πρόβλεψη από πολλές διαδοχικές εναλλαγές 0 (άδειο δωμάτιο) και 1 (γεμάτο δωμάτιο), πράγμα που σημαίνει ότι είναι δύσκολο από τα συγκεκριμένα δεδομένα και τη μικρή ποσότητά τους να συμπεράνουμε χρονικά διαστήματα που η κατάληψη η μη-κατάληψη του δωματίου είναι πρακτικά βέβαιη. Για να γίνει κατανοητό αυτό το συμπέρασμα παρατίθεται η γραφική παράσταση του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης (ταυτίζεται με το σύνολο που εξετάστηκε στην αρχή της 3.7.3) στο σχήμα 3.7. Από το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων δεν είναι εύκολο να συμπεράνουμε σε ποια χαρακτηριστικά της ώρας πρέπει να εστιάσουμε για την εξαγωγή της πρόβλεψης. Για παράδειγμα, εντός του Νοεμβρίου βλέπουμε διαφορετικά είδη κυματομορφών κάθε μέρα και η μόνη ομοιότητα που ξεχωρίζει είναι ότι το πρωί της 8/11/2023 μοιάζει με το πρωί της 6/11/2023. Μετά, στον Δεκέμβριο, αλλάζει η μορφή των χρονοσειρών, με πολύωρες συναντήσεις στο δωμάτιο. Σε αντίθεση με τον Νοέμβριο, αυξάνεται η ομοιότητα μεταξύ ορισμένων κοντινών ημερών, για παράδειγμα μεταξύ 12/12/2023 και 13/12/2023 αλλά και μεταξύ 14/12/2023 και 18/12/2023. Τέλος, επισημαίνεται ότι δεν είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά των συναντήσεων που προσφέρουν εποπτεία στο πρόβλημα πρόβλεψης. Παραδείγματος χάριν, δεν είναι γνωστή η σημασία ή το θέμα της κάθε σύσκεψης, τα οποία πιθανότατα αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη διάρκεια κατάληψης του δωματίου.



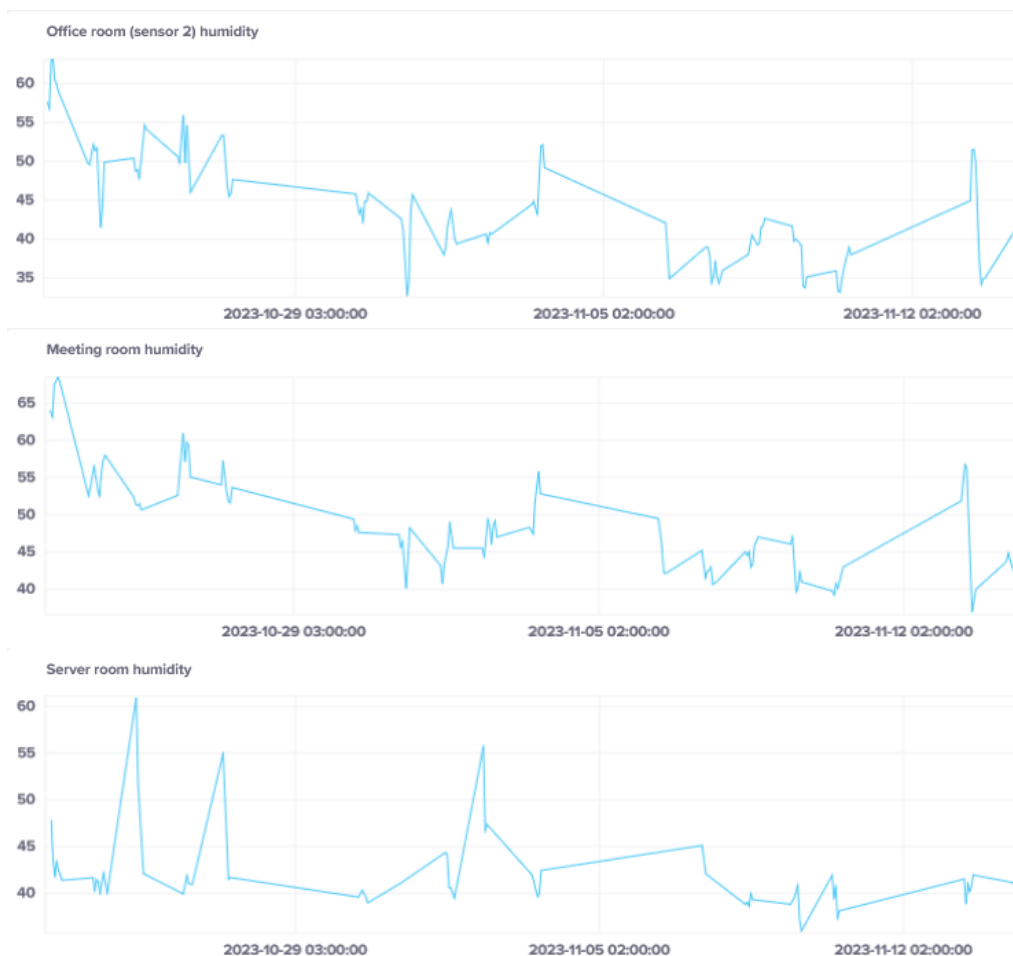
Σχήμα 3.7: Η μορφή του συνόλου των συλλεγμένων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση. Ο άξονας y μετράει φωτεινότητα και ο άξονας x ώρας της ημέρας.

3.8 Αποτελέσματα

Σε αυτό το μέρος αναλύουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρατηρώντας τα δεδομένα μέσα από τη διεπαφή χρήστη του Digital Twin. Μελετούμε τις σειρές δεδομένων της θερμοκρασίας και υγρασίας για τρία σημεία μέτρησης: το δεύτερο σημείο στον χώρο του γραφείου, το δωμάτιο συναντήσεων και το δωμάτιο του server. Εξετάζουμε τα δεδομένα από τις 23-10-2023 στις 12:00μμ έως τις 14-11-2023 στις 2:00μμ, δηλαδή σε διάστημα τριών εβδομάδων, δύο ημερών και δύο ωρών. Οι σειρές θερμοκρασίες φαίνονται στα γραφήματα 3.8 και οι σειρές της υγρασίας στο 3.9. Επίσης, στους πίνακες 3.5 και 3.6 υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των σειρών αυτών. Ειδικότερα, υπολογίζεται η εξάπλωση (spread), η οποία ορίζεται ως η διαφορά της μέγιστης τιμής από την ελάχιστη τιμή από το σύνολο των δεδομένων, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η ασυμμετρία (skew).



Σχήμα 3.8: Οι σειρές θερμοκρασίας για τα τρία σημεία μέτρησης. Έχουν παραχθεί με εφαρμογή κινούμενου μέσου όρου ανά μία ώρα.



Σχήμα 3.9: Οι σειρές υγρασίας για τα τρία σημεία μέτρησης. Όμοια με τις σειρές θερμοκρασίας, έχουν παραχθεί με εφαρμογή κινούμενου μέσου όρου ανά μία ώρα.

Σειρές θερμοκρασίας	εξάπλωση (°C)	μ (°C)	σ (°C)	ασυμμετρία
office room (sensor 2)	3,31	25,58	0,66	-0,57
meeting room	4,8	25,06	0,8	-0,43
server room	2,08	18,41	0,53	0,6

Πίνακας 3.5: Τα στατιστικά χαρακτηριστικά για κάθε σειρά θερμοκρασίας στα τρία σημεία μέτρησης. Εμφανίζονται η εξάπλωση, η μέση τιμή, η διασπορά και η ασυμμετρία.

Σειρές υγρασίας	εξάπλωση (RH)	μ (RH)	σ (RH)	ασυμμετρία
office room (sensor 2)	30,07	43,92	7,12	0,52
meeting room	31,37	48,58	6,88	0,86
server room	25	41,95	3,98	2,49

Πίνακας 3.6: Τα στατιστικά χαρακτηριστικά για κάθε σειρά υγρασίας στα τρία σημεία μέτρησης. Όπως και για τη θερμοκρασία, εμφανίζονται η εξάπλωση, η μέση τιμή, η διασπορά και η ασυμμετρία.

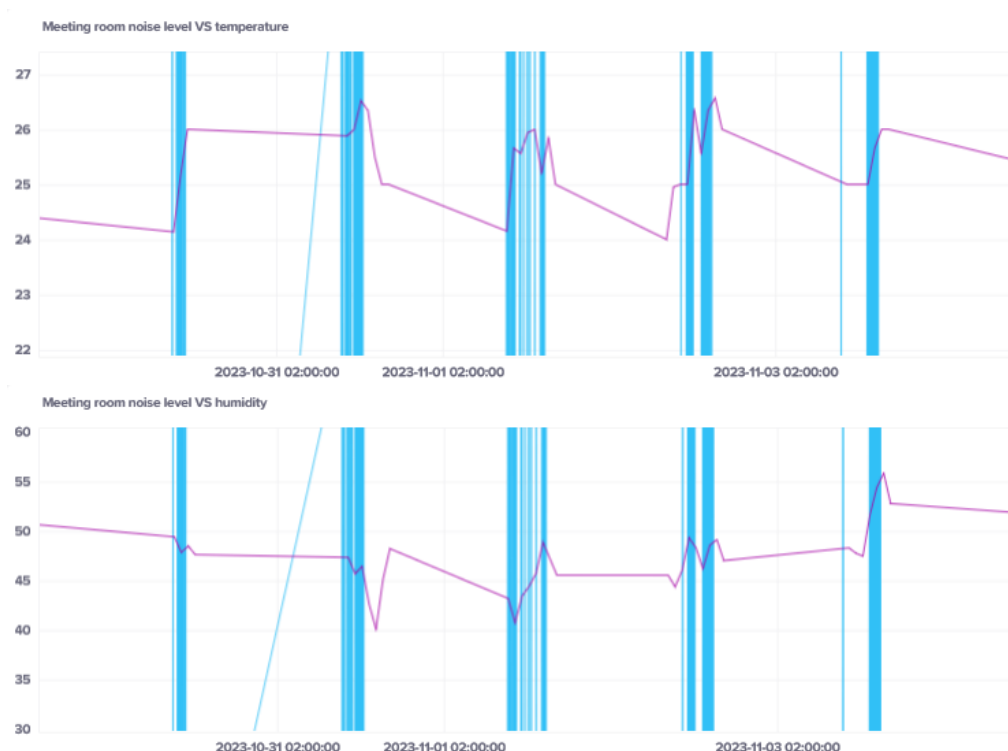
Από τις εικόνες των γραφημάτων παρατηρούμε ότι οι σειρές τις θερμοκρασίας για τον χώρο του γραφείου και το δωμάτιο των συναντήσεων έχουν μορφή πριονωτού σήματος. Αυτό οφείλεται στην περιοδική μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την πάροδο του χρόνου μέσα

στην ημέρα. Οι απότομες μεταβολές που ενώνονται με ευθύγραμμο τμήμα οφείλονται στην έλλειψη δεδομένων εκτός του ωραρίου εργασίας. Είναι εμφανής η τάση μείωσης της θερμοκρασίας, ειδικά στη σειρά δεδομένων που αφορά το γραφείο, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα λήφθηκαν από χρονική περίοδο μετάβασης από το Φθινόπωρο προς τον Χειμώνα. Ενώ οι σειρές θερμοκρασίας παρουσιάζουν μικρές μεταβολές και περιοδικότητα, δεν ισχύει το ίδιο για τις σειρές υγρασίας. Αντιθέτως, βλέπουμε ότι το σχήμα είναι ακανόνιστο ανά ημέρα, ενώ φαίνεται πως οι χρονοσειρές τείνουν σε χαμηλότερες τιμές, με εξαίρεση τη σειρά για το δωμάτιο του server. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η υγρασία είναι μία ευαίσθητη παράμετρος που επηρεάζεται από τον καιρό και την κατάσταση του χώρου. Μάλιστα, αξίζει να σημειωθεί ότι το άγγιγμα με το δάχτυλο του αισθητήρα της μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας, κατάσταση που προκύπτει κατά τον χειρισμό με τα χέρια για τη μετακίνηση ή τη σύνδεση στην τροφοδοσία των σημείων μέτρησης, αυξάνει αμέσως τη μετρούμενη υγρασία. Αυτός πιθανώς είναι ο λόγος που βλέπουμε ασυνήθιστα υψηλές κορυφές στα δεδομένα, οι οποίες είναι ιδιαίτερα εμφανείς στο σύνολο δεδομένων του server.

Έχοντας μελετήσει τις έξι χρονοσειρές σε ποιοτικό επίπεδο θα συγκρίνουμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους για μεγαλύτερου βάθους κατανόηση των φαινομένων που συμβαίνουν στη φυσική υπόσταση του Digital Twin. Καταρχάς, παρατηρούμε ότι το δωμάτιο συναντήσεων έχει τη μεγαλύτερη *εξάπλωση* τόσο στο σύνολο δεδομένων θερμοκρασίας με τιμή $4,8^{\circ}\text{C}$ όσο και στο σύνολο της υγρασίας με τιμή 31,37 σχετική υγρασίας (Relative Humidity - RH) και ακολουθεί το σημείο στον χώρο του γραφείου με $3,31^{\circ}\text{C}$ και 30,07 RH και τελευταίο το δωμάτιο των server με $2,08^{\circ}\text{C}$ και 25 RH. Συνεπώς, το δωμάτιο συναντήσεων έχει τις μεγαλύτερες μεταβολές στην ατμόσφαιρα, το οποίο είναι λογικό αφού είναι ένα δωμάτιο που εισέρχονται και εξέρχονται διαρκώς εργαζόμενοι για τις συναντήσεις. Μείτριες μεταβολές παρουσιάζει το δωμάτιο του γραφείου, δεδομένου ότι το σημείο μέτρησης βρίσκεται στη γωνία μεγάλου και ανοιχτού χώρου που είναι κλιματιζόμενος και οι μικρότερες μεταβολές συμβαίνουν στο δωμάτιο του server, πράγμα λογικό αφού είναι δωμάτιο στο οποίο σπανίως μπαίνουν άνθρωποι (μόνον τεχνικοί υπάλληλοι) και ο κλιματισμός κατά κανόνα ευνοεί τη λειτουργία του server. Αυτό το συμπέρασμα για το δωμάτιο με τον server λαμβάνεται και από τη *μέση τιμή* των δεδομένων. Ειδικότερα, το δωμάτιο του server έχει τη χαμηλότερο μέση τιμή με διαφορά από τα άλλα σημεία μέτρησης, με $18,41^{\circ}\text{C}$. Την επόμενη μεγαλύτερη θερμοκρασία την έχει το δωμάτιο συναντήσεων με $25,06^{\circ}\text{C}$ και την ξεπερνά αυτή ο χώρος των γραφείων με θερμοκρασία $25,58^{\circ}\text{C}$. Για άλλη μια φορά αυτό είναι λογικό συμπέρασμα επειδή στο γραφείο βρίσκονται περισσότερα άτομα και το δωμάτιο συναντήσεων είναι πιο απομονωμένο. Η απαμόνωση του δωματίου συναντήσεων φαίνεται και από τη μέση υγρασία, η οποία είναι 48,58 RH και απέχει σχεδόν 5 μονάδες από τις υπόλοιπες μετρήσεις. Όσον αφορά την *τυπική απόκλιση*, στις σειρές θερμοκρασίας ισχύει η ίδια κατάταξη με τη μετρική της εξάπλωσης, δηλαδή στο δωμάτιο συναντήσεων έχουμε τη μεγαλύτερη διασπορά με $0,8^{\circ}\text{C}$ και στο δωμάτιο του server τη μικρότερη με $0,53^{\circ}\text{C}$, λόγω μεγαλύτερης κίνησης εργαζομένων στο δωμάτιο συναντήσεων. Στις σειρές υγρασίας εμφανίζεται το σημείο μέτρησης στο γραφείο να ξεπερνά σε διασπορά το δωμάτιο συναντήσεων, αλλά και στην υγρασία το δωμάτιο του server έχει με διαφορά τη μικρότερη διασπορά, σχεδόν τη μισή από τα υπόλοιπα σημεία μέτρησης, με 3,98 RH. Τέλος, διαπιστώνουμε ότι οι σειρές θερμοκρασίας του γραφείου και του δωματίου συναντήσεων έχουν μετρήσεις συγκεντρωμένες προς ακραίες υψηλές τιμές, διότι

έχουν αρνητική *ασυμμετρία*, σε αντίθεση με τη χρονοσειρά του δωματίου του server και τις χρονοσειρές της υγρασίας που έχουν θετική ασυμμετρία. Η αρνητική ασυμμετρία εξηγείται από την πτωτική τάση της θερμοκρασίας που γίνεται εμφανής προς το τέλος της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου, σε συνδυασμό με την πριονωτή μορφή της γραφικής παράστασης των δεδομένων.

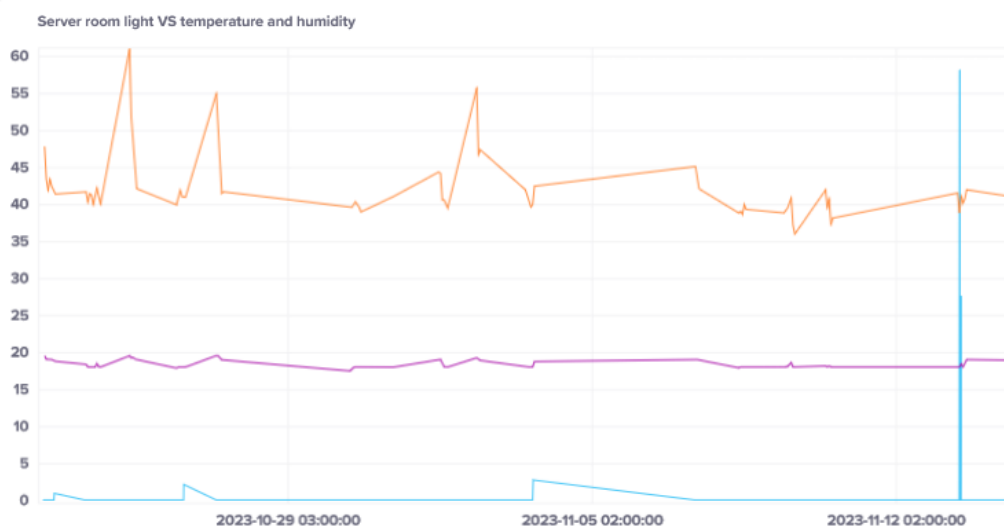
Αν συγκρίνουμε τις χρονοσειρές θερμοκρασίας και υγρασίας του δωματίου συναντήσεων με το επίπεδο φωτός ή θορύβου τότε βλέπουμε ότι είναι συσχετισμένες. Στα γραφήματα 3.10 φαίνεται αυτή ακριβώς η σύγκριση, με το επίπεδο θορύβου. Επιλέγουμε το επίπεδο θορύβου για τη σύγκριση αντί για το φως διότι είναι πιο πιθανό στο δωμάτιο να βρίσκονται άτομα όταν έχουμε ανιχνεύσει θόρυβο σε σχέση με την περίπτωση που το δωμάτιο είναι απλώς φωτεινό. Παρατηρούμε ότι όταν το δωμάτιο είναι κατειλημμένο, δηλαδή όταν το επίπεδο θορύβου δεν είναι σταθερά μηδέν, η θερμοκρασία αυξάνεται και μόλις ελευθερωθεί το δωμάτιο μειώνεται πάλι σε κανονικά επίπεδα. Το ίδιο ισχύει και για την υγρασία τις περισσότερες φορές. Από τις πέντε φορές που καταγράφεται θόρυβος στο δεύτερο γράφημα, τις τρεις τελευταίες αυξάνεται εμφανώς η υγρασία, ενώ στις δύο πρώτες δεν υπάρχει ξεκάθαρο συμπέρασμα αφού φαίνεται στην αρχή να μειώνεται η τιμή της υγρασίας και ύστερα να αυξάνεται ελαφρώς. Έτσι, από τα γραφήματα συμπεραίνουμε ότι ένα ελεύθερο δωμάτιο συναντήσεων την εξεταζόμενη χρονική περίοδο έχει μέση θερμοκρασία $\sim 24,5^{\circ}\text{C}$ και μέση υγρασία ~ 45 RH, ενώ όταν είναι κατειλημμένο έχει θερμοκρασία $\sim 26^{\circ}\text{C}$ και μέση υγρασία ~ 50 RH, δηλαδή βρίσκεται με αυξημένες ατμοσφαιρικές κατά $+1,5^{\circ}\text{C}$ και $+5$ RH.



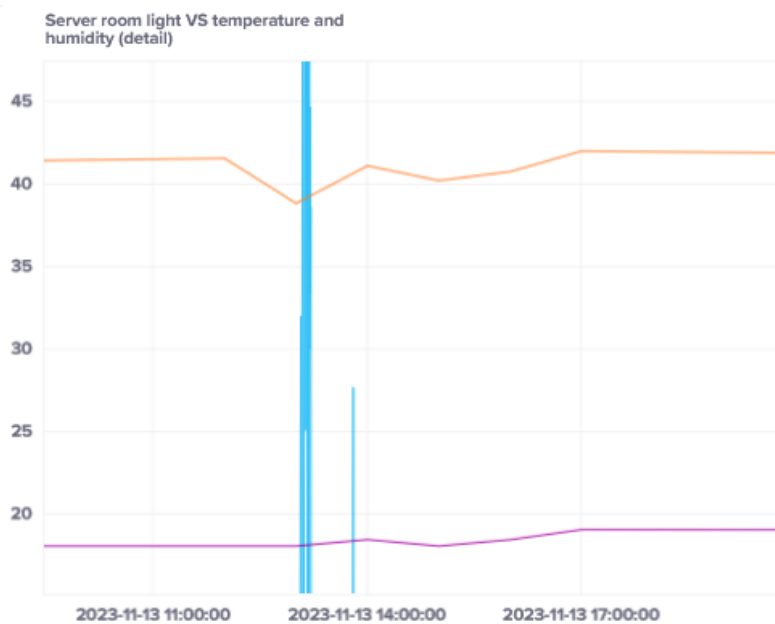
Σχήμα 3.10: Οι σειρές θερμοκρασίας και υγρασίας (με μωβ χρώμα) του δωματίου συναντήσεων σε σχέση με το επίπεδο θορύβου (με μπλε χρώμα). Το επίπεδο θορύβου έχει ενισχυθεί για να ταιριάζει στο εύρος τιμών της κάθε ατμοσφαιρικής μέτρησης, για λόγους εύκολης σύγκρισης.

Αντίστοιχα συγκρίνουμε όλες τις χρονοσειρές που καταγράφηκαν από το σημείο μέτρη-

σης στο δωμάτιο του server στο σχέδιο 3.11. Επισημαίνεται ότι η σειρά του φωτός έχει εξασθαινηθεί κατά παράγοντα 10, άρα η μεγαλύτερη τιμή φωτός που καταγράφηκε στο διάστημα αυτό είναι 583 κι όχι 58,3. Επίσης, τα δεδομένα από τον αισθητήρα ήχου έχουν παραληφθεί καθώς έχουν μονίμως μηδενική τιμή. Το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε για το δωμάτιο του server είναι ότι είναι ένα ήρεμο και σκοτεινό δωμάτιο, δε γίνονται συχνά εργασίες από ανθρώπους, αφού ο αισθητήρας ήχου δεν καταγράφει θόρυβο και η τιμή του φωτός είναι κατά κανόνα μηδενική. Το μόνο χρονικό παράθυρο στο οποίο το φως εμφανίζεται μη αμελητέο είναι από 13-11-2023 στις 11:00πμ έως τις 2:00μμ (σχέδιο 3.12). Ενδεχομένως, σε εκείνο το χρονικό σημείο να εισήλθε άνθρωπος για να ελέγξει την εύρυθμη λειτουργία ή για λόγους συντήρησης και επισκευής. Έτσι, σε συνδυασμό με το τη σταθερότητα των χρονοσειρών θερμοκρασίας και υγρασίας, συμπεραίνουμε ότι το δωμάτιο του server είναι ένα ρυθμιζόμενο δωμάτιο. Συγκεκριμένα, είναι περιορισμένης πρόσβασης (φαίνεται από τον αμελητέο θόρυβο), με σθηστά φώτα και προσαρμοσμένο κλιματισμό.



Σχήμα 3.11: Η σειρά του επιπέδου φωτός (με μπλε) στο δωμάτιο του server σε σχέση με τη θερμοκρασία (με μωβ, σε °C) και την υγρασία (με πορτοκαλί ως RH). Στη σειρά του φωτός έχει εφαρμοστεί παράγοντας εξασθένισης με τιμή 10.



Σχήμα 3.12: Μεγέθυνση του γραφήματος 3.11 κοντά στην υψηλότερη κορυφή της χρονοσειράς του φωτός.

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

4.1 Συμπεράσματα

Η τεχνολογία των Digital twins είναι η εξέλιξη της μεθόδου προσομοίωσης με μοντέλο. Παρά τις ανακρίβειες στον ορισμό της, έχει γίνει ξεκάθαρο ότι αντιπροσωπεύει την ανάγκη για διαρκή επικοινωνία και μάθηση μέσα από τα άπλετα δεδομένα που οι αισθητήρες μάς επιτρέπουν να αντλήσουμε. Και αυτό, με στόχο να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός αυτοματοποίησης, να μετατοπιστεί περισσότερο η εστίαση από την επίδοση του μεμονωμένου προϊόντος προς τη συνολική στρατηγική. Μπορεί κανείς να πει ότι υπάρχουν αμέτρητες επιλογές δημιουργίας, για την υλοποίηση ενός συστήματος Digital twin: από την επιλογή της αρχιτεκτονικής έως την επιλογή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και των μεθόδων πρόβλεψης.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής αποτελεί την απόδειξη ότι είναι εφικτό το Digital twin να υλοποιηθεί σε ποικίλα περιβάλλοντα, από τον χώρο ενός εργοστασίου μεγάλης κλίμακας (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία) έως την προσομοίωση ενός ορόφου του κτιρίου, όπως εξετάστηκε. Ήδη βλέπουμε και τα οφέλη που αναπτύχθηκαν στο Θεωρητικό Μέρος: Πρώτον, το μοντέλο είναι δυναμικό, καθώς ανανεώνεται μόνο του σε ημερήσια βάση. Δεύτερον, πέρα από τη ρύθμιση του μοντέλου πρόβλεψης, η οποία μπορεί να γίνει με γνωστό τρόπο, μέσω διασταυρούμενης επικύρωσης, δε χρειάστηκε να μελετήσουμε όλα τα πιθανά σενάρια απασχόλησης του δωματίου, άρα λειτουργούμε επίκαιρα. Και τρίτον, μόλις κατασκευάσουμε το σύστημα, δεν είναι αναγκαίο να ανατρέχουμε διαρκώς στις επερωτήσεις και στις παραμέτρους που το κάνουν να λειτουργεί, έτσι εστιάζουμε περισσότερο στους στόχους μας παρά στις λεπτομέρειες.

4.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η υλοποίηση της τεχνολογίας των Digital twins που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Ειδικότερα:

- Υλοποίηση της διαδικασίας αυτόματης πρόβλεψης για όλες τις μετρήσεις. Όπως έχει υλοποιηθεί το σύστημα, λόγω των χρονικών περιορισμών, η αυτόματη πρόβλεψη παρέχεται μόνο για τη φωτεινότητα και το επίπεδο θορύβου στο δωμάτιο των συναντήσεων. Το ίδιο μπορεί να γίνει και με τις υπόλοιπες μετρήσεις, για παράδειγμα τη θερμοκρασία και υγρασία στα σημεία στον χώρο του γραφείου. Αυτές οι προβλέψεις μπορούν να

υποστηρίζουν νέες λειτουργίες προς τον χρήστη, όπως η πρόταση συγκεκριμένων ενεργειών και η ανίχνευση ανωμαλιών (anomaly detection), δηλαδή προειδοποίηση μόλις ανιχνευθούν ασυνήθιστα υψηλές τιμές θερμοκρασίας, λειτουργία ιδιαίτερα χρήσιμη για το δωμάτιο με τους servers.

- Διασφάλιση αξιόπιστων συνθηκών λειτουργίας των κυκλωμάτων, ώστε να παράγουν δεδομένα όλο τι εικοσιτετράωρο. Όπως αναφέρθηκε στην υπο-ενότητα 3.7, για την πρόβλεψη της απασχόλησης του δωματίου εξαιρούμε τις ώρες που δεν είναι εργάσιμες. Αυτό γίνεται επειδή το μοντέλο πρόβλεψης δεν έχει στη διάθεσή του δεδομένα εκτός των εργάσιμων ωρών, με αποτέλεσμα η πρόβλεψη να μην είναι η βέλτιστη δυνατή. Αυτό διορθώνεται αν τα σημεία μέτρησης λειτουργούν ασταμάτητα και σε συνθήκες αξιόπιστης σύνδεσης στο Wi-Fi.
- Περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας των προβλέψεων. Η βελτιστοποίηση της μεθόδου πρόβλεψης είναι ένα μεγάλο κεφάλαιο από μόνο του. Μπορεί να συγκριθεί το μοντέλο Prophet με περισσότερες μεθόδους πρόβλεψης και να λειτουργήσει σαν βάση σύγκρισης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση με μεθόδους μηχανικής μάθησης, όπως LSTM και CNN.

Παραρτήματα

Βιβλιογραφία

- [1] *Web of Things (WoT) Architecture 1.1*. <https://w3c.github.io/wot-architecture/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 24-8-2023.
- [2] Karen Rose, Scott Eldridge και Lyman Chapin. *The internet of things: An overview*. *The internet society (ISOC)*, 80:1-50, 2015.
- [3] *Internet of Things [IoT] Market Size, Share & Growth by 2030*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>. Ημερομηνία πρόσβασης: 20-11-2023.
- [4] Mengnan Liu, Shuiliang Fang, Huiyue Dong και Cunzhi Xu. *Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications*. *Journal of Manufacturing Systems*, 58:346-361, 2021. Digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0.
- [5] *What is a digital twin?* <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>. Ημερομηνία πρόσβασης: 31-7-2023.
- [6] David Jones, Chris Snider, Aydin Nassehi, Jason Yon και Ben Hicks. *Characterising the Digital Twin: A systematic literature review*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29:36-52, 2020.
- [7] Sebastian Haag και Reiner Anderl. *Digital twin - Proof of concept*. *Manufacturing Letters*, 15:64-66, 2018. Ινδυστριψ 4.0 ανδ Σμαρτ Μανυφαστυρινγ.
- [8] Rafael Gomes Alves, Gilberto Souza, Rodrigo Filev Maia, Anh Lan Ho Tran, Carlos Kamienski, Juha Pekka Soininen, Plinio Thomaz Aquino και Fabio Lima. *A digital twin for smart farming*. *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, σελίδες 1-4, 2019.
- [9] Yuchen Jiang, Shen Yin, Kuan Li, Hao Luo και Okay Kaynak. *Industrial applications of digital twins*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2207):20200360, 2021.
- [10] Wen Sun, Wenqiang Ma, Yu Zhou και Yan Zhang. *An Introduction to Digital Twin Standards*. *GetMobile: Mobile Comp. and Comm.*, 26(3):16-22, 2022.
- [11] AKRAM HAKIRI, Aniruddha Gokhale, Sadok Ben Yahia και Nedra Mellouli. *A Comprehensive Survey on Digital Twin for Future Networks and Emerging Iot Industry*. Available at SSRN 4535810, 2023.

- [12] *GR CIM 017 - V1.1.1 - Context Information Management (CIM), Feasibility of NGSI-LD for Digital Twins*. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/CIM/001_099/017/01.01.01_60/gr_CIM017v010101p.pdf. Ημερομηνία πρόσβασης: 30-8-2023.
- [13] *White Paper on how oneM2M is enabling more sustainable IoT deployments - 2nd Edition September 2022*. <https://www.onem2m.org/images/images/files/oneM2M-SSC-White-Paper-2nd-edition.pdf>. Ημερομηνία πρόσβασης: 31-8-2023.
- [14] *CHANGE2TWIN - D1.2 First report on standards relevant for digital twins*. <https://www.change2twin.eu/wp-content/uploads/2021/11/D1.2-First-report-on-standards-relevant-for-digital-twins.pdf>. Ημερομηνία πρόσβασης: 27-8-2023.
- [15] *Simulation vs Digital Twin (What is the Difference Between Them?) - TWI*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/simulation-vs-digital-twin>. Ημερομηνία πρόσβασης: 22-8-2023.
- [16] *The Difference Between a Simulation and A Digital Twin - PROLIM*. <https://www.prolim.com/the-difference-between-a-simulation-and-a-digital-twin/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 22-8-2023.
- [17] Yiwen Wu, Ke Zhang και Yan Zhang. *Digital Twin Networks: A Survey*. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18):13789–13804, 2021.
- [18] Behailu Negash, Tomi Westerlund και Hannu Tenhunen. *Towards an interoperable Internet of Things through a web of virtual things at the Fog layer*. *Future Generation Computer Systems*, 91:96–107, 2019.
- [19] Violeta Damjanovic-Behrendt και Wernher Behrendt. *An open source approach to the design and implementation of Digital Twins for Smart Manufacturing*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4-5):366–384, 2019.
- [20] Mehdi Kherbache, Moufida Maimour και Eric Rondeau. *Digital Twin Network for the IIoT using Eclipse Ditto and Hono*. *IFAC-PapersOnLine*, 55(8):37–42, 2022. 6th IFAC Symposium on Telematics Applications TA 2022.
- [21] Palak Jain, Jason Poon, Jai Prakash Singh, Costas Spanos, Seth R Sanders και Sanjib Kumar Panda. *A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(1):940–956, 2019.
- [22] *Top 12 most commonly used IoT protocols and standards*. <https://www.techtarget.com/iotagenda/tip/Top-12-most-commonly-used-IoT-protocols-and-standards>. Ημερομηνία πρόσβασης: 24-06-2023.
- [23] Joanna Henzel, Łukasz Wróbel, Marcin Fice και Marek Sikora. *Energy Consumption Forecasting for the Digital-Twin Model of the Building*. *Energies*, 15(12), 2022.

- [24] Yasaman Ensafi, Saman Hassanzadeh Amin, Guoqing Zhang και Bharat Shah. *Time-series forecasting of seasonal items sales using machine learning - A comparative analysis*. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1):100058, 2022.
- [25] *Hyndman, R.J., & Athanasopoulos, G. (2018) Forecasting: principles and practice, 2nd edition, OTexts: Melbourne, Australia. OTexts.com/fpp2. <https://otexts.com/fpp2/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 25-7-2023.*
- [26] *LSTMs Explained: A Complete, Technically Accurate, Conceptual Guide with Keras. <https://medium.com/analytics-vidhya/lstms-explained-a-complete-technically-accurate-conceptual-guide-with-keras-2a650327e8f2>. Ημερομηνία πρόσβασης: 24-7-2023.*
- [27] *Convolutional Neural Network Definition. <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/convolutional-neural-network>. Ημερομηνία πρόσβασης: 24-7-2023.*
- [28] *Eclipse Ditto™ • open source framework for digital twins in the IoT. <https://eclipse.dev/ditto/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 28-11-2023.*
- [29] *Prophet | Forecasting at scale. <https://facebook.github.io/prophet/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 29-11-2023.*

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

κ.α.	και άλλα
κτλ	και τα λοιπά
CAD	Computer-Aided Design
CCSA	China Communications Standards Association
CNC	Computer Numerical Control
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FPGA	Field-Programmable Gate Array
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IRTF	Internet Research Task Force
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
LED	Light-Emitting Diode
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGSI-LD	Next Generation Service Interfaces - Linked Data
PWM	Pulse-Width Modulation
UHF	Ultra High Frequency
W3C	World Wide Web Consortium
WoT	Web of Things

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

ανίχνευση ανωμαλιών
γλώσσα επερωτήσεων Flux
Διαδίκτυο των Αντικειμένων
διεπαφή
εξυπηρετητής
Έξυπνα δίκτυα (ενέργειας)
Έξυπνη παραγωγή
κλιμακώσιμος
μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα
διαμεσολαβητής
Μικροϋπηρεσίες
Μηχανική μάθηση
Μηχανική όραση
Πλατφόρμες μεσαζόντων
πίνακας ελέγχου
υπέρ-υψηλές συχνότητες
Ψηφιακό Αντικείμενο
Ψηφιακός Δίδυμος

Ξενόγλωσσος όρος

anomaly detection
Flux query language
Internet of Things
interface
server
Smart grids
Smart manufacturing
scalable
mean absolute percentage error
broker
Microservices
Machine learning
Machine vision
Middleware platforms
dashboard
UHF
Virtual Thing
Digital Twin

