 **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ IoT ΣΥΣΚΕΥΩΝ**

**ΕΛΕΝΗ ΣΟΥΛΙΔΟΥ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπεύθυνος**

**Αθανάσιος Κακαρούντας**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Λαμία, 2024**

****

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ IoT ΣΥΣΚΕΥΩΝ**

**ΕΛΕΝΗ ΣΟΥΛΙΔΟΥ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επιβλέπων**

**Αθανάσιος Κακαρούντας**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

**Λαμία, 2024**

|  |
| --- |
| Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις (1), που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι: |
| *1.    Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί* ***χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά*** *και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάσθηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.*  *2.    Δέχομαι ότι η αυτολεξεί* ***παράθεση χωρίς εισαγωγικά****, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.*  *3.    Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια*  *4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.* |

Ημερομηνία: ……/..…/20……

Ο – Η Δηλ.

(Υπογραφή)

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.

**Σχεδίαση Συστήματος Παρακολούθησης Φυσικών Χαρακτηριστικών για την Ασφάλεια IoT Συσκευών**

**Ελένη Σουλίδου**

**Τριμελής Επιτροπή:**

Αθανάσιος Κακαρούντας, Αναπληρωτής Καθηγητής (επιβλέπων/σα)

Ονοματεπώνυμο, Βαθμίδα……

Ονοματεπώνυμο, Βαθμίδα…….

**Περίληψη**

**Abstract**

Περιεχόμενα

[Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή 11](#_Toc168273440)

[1.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση 12](#_Toc168273441)

[1.2. Διάρθρωση Πτυχιακής 14](#_Toc168273442)

[Κεφάλαιο 2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων 16](#_Toc168273443)

[2.1. Ορισμός 16](#_Toc168273444)

[2.1.1. Χαρακτηριστικά του Διαδικτύου των Πραγμάτων 16](#_Toc168273445)

[2.1.2. Μερίδιο της Αγοράς 17](#_Toc168273446)

[2.1.3. Σύγχρονες Εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων 18](#_Toc168273447)

[2.2. Τεχνολογίες και Συστήματα 19](#_Toc168273448)

[2.2.1. Συστήματα υλικού 19](#_Toc168273449)

[2.2.2. Επικοινωνία 19](#_Toc168273450)

[2.2.3. Διαστρωμάτωση Διαδικτύου των Πραγμάτων 22](#_Toc168273451)

[Κεφάλαιο 3. Ασφάλεια Συσκευών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων 25](#_Toc168273452)

[3.1. Ζητήματα ασφαλείας 25](#_Toc168273453)

[3.2. Επιθέσεις 26](#_Toc168273454)

[3.3. Προδιαγραφές ασφαλείας 29](#_Toc168273455)

[3.4. Συστήματα ανίχνευσης 30](#_Toc168273456)

[Κεφάλαιο 4. Σχεδίαση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Συστήματος 33](#_Toc168273457)

[4.1. Αρχιτεκτονική συστήματος 33](#_Toc168273458)

[4.2. Χαρακτηριστικά συστήματος 33](#_Toc168273459)

[4.2.1. Raspberry Pi Zero W 33](#_Toc168273460)

[4.2.2. Arduino UNO R3 34](#_Toc168273461)

[4.2.3. MCP9808 34](#_Toc168273462)

[4.3. Υλοποίηση συστήματος 34](#_Toc168273463)

[4.3.1. Παρουσίαση συστήματος 34](#_Toc168273464)

[4.3.2. Κώδικας υλοποίησης 35](#_Toc168273465)

[4.4. Μετρήσεις και πειραματική αξιολόγηση 36](#_Toc168273466)

[Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις 37](#_Toc168273467)

[Βιβλιογραφία 38](#_Toc168273468)

[Παραρτήματα 40](#_Toc168273469)

[Παράρτημα Α: Κώδικες Arduino 40](#_Toc168273470)

[Ι. Κώδικας αισθητήρα θερμοκρασίας MCP9808 40](#_Toc168273471)

[Παράρτημα B: Σενάρια κελύφους Raspberry Pi 41](#_Toc168273472)

[Ι. Κώδικας καταγραφής θερμοκρασίας συστήματος 41](#_Toc168273473)

[Παράρτημα Γ: Κώδικες Matlab 41](#_Toc168273474)

[Ι. Κώδικας μονών γραφημάτων τιμών θερμοκρασίας 41](#_Toc168273475)

[ΙΙ. Κώδικας πολλαπλών γραφημάτων τιμών θερμοκρασίας 41](#_Toc168273476)

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η ευρεία ενσωμάτωση των τεχνολογιών έξυπνων συσκευών και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) έχει επιφέρει πολλά θετικά αποτελέσματα, τόσο στον βιομηχανικό όσο και στον καταναλωτικό κόσμο. Ήδη ο αριθμός των έξυπνων συσκευών που έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο εκτιμάται στην τάξη του δισεκατομμυρίου, και αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Από αυτά γεννάται το εξής ερώτημα, «*Πόσο ασφαλείς είναι οι έξυπνες συσκευές όταν έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο;*». Συσκευές όπως έξυπνες οικιακές συσκευές (Smart TVs, Smart Appliances, Smart Alarm κ.α.), φορητές συσκευές (wearables) καθώς και βιομηχανικά συστήματα ελέγχου, σχεδιάζονται με κύριο στόχο το χαμηλό κόστος και την ευκολία χρήσης, θυσιάζοντας αρκετά χαρακτηριστικά ασφαλείας. Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός της περιορισμένης ισχύος, η έλλειψη προδιαγραφών ασφαλείας και η έκθεση σε διαδικτυακούς κινδύνους, καθιστά τις συσκευές IoT ιδανικούς στόχους προς επίθεση [1].

Σκοπός των συσκευών IoT αποτελεί η παροχή υπηρεσιών, είτε αυτή αφορά την ασφάλεια, την διευκόλυνση ή την ψυχαγωγία. Όμως, η φύση τους αυτή τις κάνει ευάλωτες σε επιθέσεις που στοχεύουν στην διατάραξη της παροχής υπηρεσιών. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι επιθέσεις DoS (Denial of Service) και DDoS (Distributed DoS), οι οποίες αποτελούν και τις πιο συχνές. Πράγματι, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των έξυπνων συσκευών είναι η ικανότητα τους να αυτοματοποιούν εργασίες, βελτιστοποιώντας τις για την αύξηση της αποδοτικότητας, να συλλέγουν δεδομένα και να τα διακινούν μέσω του δικτύου για την εξ αποστάσεως διαχείριση τους. Έτσι, η αποτυχία παροχής μιας υπηρεσίας μπορεί να προκαλέσει πληθώρα ζητημάτων για τις εφαρμογές που βασίζονται σε αυτήν, ειδικά στην περίπτωση κρίσιμων συστημάτων IoT πραγματικού χρόνου.

Συνεπώς η έγκαιρη ανίχνευση επιθέσεων στα συστήματα IoT είναι μείζονος σημασίας. Συστήματα που είναι σχεδιασμένα για την ανίχνευση συγκεκριμένων ειδών επιθέσεων έχουν μεγάλη απήχηση, τόσο στην ερευνητική όσο και στην βιομηχανική κοινότητα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα παρακολούθησης φυσικών χαρακτηριστικών, καθώς μπορούν να παρομοιαστούν με την παρακολούθηση ασθενών σε κλινικές. Θεωρώντας το κύκλωμα ως «ασθενή» παρακολουθούμε διάφορες παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η κατανάλωση ρεύματος και η τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, έχει ως αρχικό στόχο την μελέτη συστημάτων IoT, ευπαθειών και επιθέσεων που σχετίζονται με την διακοπή παροχής υπηρεσιών και συστημάτων παρακολούθησης φυσικών χαρακτηριστικών για την ανίχνευση επιθέσεων. Ως ειδικότερο σκοπό, η πτυχιακή έχει να προτείνει και να υλοποιήσει ένα πρότυπο σύστημα παρακολούθησης φυσικών χαρακτηριστικών με βάση την θερμοκρασία της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU – Central Processing Unit) μιας έξυπνης συσκευής για την έγκαιρη ανίχνευση επιθέσεων DoS.

## Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η ασφάλεια των IoT συσκευών απασχολεί ιδιαίτερα την ερευνητική και επιστημονική κοινότητα. Στην συνέχεια θα αναφερθούμε σε μερικές ερευνητικές εργασίες που αφορούν τη θεματολογία αυτή.

Οι Berguiga et al. [2] δημιούργησαν έναν αλγόριθμο για την ανίχνευση επιθέσεων πλημμύρας με TCP SYN πακέτα. Στο συγκεκριμένο είδος επίθεσης, ο επιτιθέμενος στέλνει πολλαπλά πακέτα αίτησης TCP επιβραδύνοντας έτσι τη συσκευή ή ακόμα και την απόδοση του δικτύου. Πρότειναν λοιπόν, έναν νέο αλγόριθμο ως σύστημα ανίχνευσης εισβολών (Intrusion Detection System - IDS) ο οποίος δοκιμάστηκε με διαφορετικές πιθανότητες επιθέσεων ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του.

Αντίστοιχα, οι Roopak et al. [3] πρότειναν ένα σύστημα ανίχνευσής εισβολών βασισμένο στο συνδυασμό βαθιάς μάθησης και της μεθόδου βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων για την ανίχνευση επιθέσεων DDoS σε δίκτυα IoT. Για την σχεδίαση του συστήματος έγινε χρήση συνελικτικού νευρωνικού δικτύου (Convolutional Neural Network – CNN) και της μεθόδου βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων Jumping Gene NSGA-II. Μέσω πειραματισμών οι ερευνητές απέδειξαν ότι το προτεινόμενο σύστημα παρουσίασε ακρίβεια 99.03%.

Επίσης, οι Shurman et al. [4] προτείνουν δύο διαφορετικούς τρόπους για την ανίχνευση κατανεμημένων επιθέσεων άρνησης υπηρεσιών με ανάκλαση (Distributed reflection Denial of Service – DrDoS). Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιεί μοντέλα βαθιάς μάθησης βασισμένα στα δίκτυα μακράς βραχύχρονης μνήμης ( Long Short-Term Memory – LSTM) εκπαιδευμένο στο σύνολο δεδομένων CICDDoS2019 ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί υβριδικό σύστημα ανίχνευσης εισβολών. Στις DrDoS επιθέσεις οι επιτιθέμενοι στέλνουν πακέτα αιτήματος σε διακομιστές ανάκλασης και θέτουν την διεύθυνση IP του θύματος ως διεύθυνση παραλήπτη ώστε να εξουδετερωθεί από τα μεγάλα πακέτα απάντησης.

Οι Syed et al. [5] προτείνουν ένα framework ανίχνευσης επιθέσεων DoS σε επίπεδο εφαρμογής για το πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT, βασισμένο στην μηχανική μάθηση που αναπτύχθηκε για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν τρείς διαφορετικούς αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, τον AODE ο οποίος είναι βασισμένος στον Naive Bayes, τον C4.5 βασισμένο στα Δένδρα Απόφασης ( Decision Trees) και τον MLP με βάση το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Artificial Neural Networks – ANN). Η εκπαίδευση έγινε με βάση δύο σύνολα δεδομένων, ένα με πακέτα κανονικής δικτυακής κίνησης και ένα με πακέτα κατά τη διάρκεια κάποιας επίθεσης. Συμπερασματικά, ο ταξινομητής AODE πέτυχε την υψηλότερη ακρίβεια ταξινόμησης στην ανίχνευση της κίνησης επίθεσης ενώ ο ταξινομητής MLP πέτυχε ακρίβεια ταξινόμησης 84% και στην πορεία επαναξιολογήθηκε με διάφορες παραμέτρους βελτιστοποίησης ώστε να αυξηθεί η απόδοση του στην ανίχνευση της κίνησης επιθέσεων.

Για το επίπεδο εφαρμογής αντίστοιχα, πρότειναν οι De La Tore Parra et al. [6] ένα framework κατανεμημένης βαθιάς μάθησης βασισμένο στο cloud για την ανίχνευση και τον περιορισμό επιθέσεων που πραγματοποιούνται από ομάδες συσκευών συνδεδεμένες στο διαδίκτυο (Botnet) και επιθέσεων Phishing. Η υλοποίηση τους περιλαμβάνει δύο συνεργατικούς μηχανισμούς ασφαλείας οι οποίοι βασίζονται στο κατανεμημένο συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο (Distributed Convolutional Neural Network – DCNN) και στη μακρά βραχύχρονη μνήμη. Για την εκπαίδευση των μοντέλων δημιούργησαν ένα σύνολο δεδομένων διευθύνσεων URL, τόσο phishing όσο και μη phishing. Μέσω τον πειραμάτων έδειξαν ότι το μοντέλο DCNN μπορεί να ανιχνεύσει επιθέσεις phishing με ακρίβεια 94.3% και το μοντέλο LSTM μπορεί να ανιχνεύσει επιθέσεις Botnet με ακρίβεια 94.8%.

Αξιοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) για την ταξινόμηση της κίνησης του δικτύου, οι Fernandes Silveira et al. [7] προτείνουν έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό ανίχνευσης που ονομάζεται σύστημα Smart Detection-IoT (SD-IoT) για την καταπολέμηση των επιθέσεων DDoS σε περιβάλλοντα δικτύων IoT, βασισμένη στην δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (Software-Defined Networks – SDN). Η αρχιτεκτονική του συστήματος έχει σχεδιαστεί για την έγκαιρη ανίχνευση επιθέσεων DDoS στο δίκτυο προέλευσης, χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα εγκατεστημένο στο σημείο πρόσβασης του δικτύου IoT, ο οποίος ταξινομεί τη διαδικτυακή κυκλοφορία χρησιμοποιώντας μια στρατηγική βασισμένη στη μηχανική μάθηση. Η πειραματική αξιολόγηση βασίστηκε στα σύνολα δεδομένων CIC-DOS και CICIDS2017 όπως επίσης και σε δείγματα κίνησης δικτύου που συλλέχθηκαν από έναν μεταγωγέα OpenFlow.

Οι Hussain et al. [8] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τον μετασχηματισμό δεδομένων δικτυακής κίνησης σε μορφή εικόνας και εκπαίδευσαν το ResNet, ένα σύγχρονο μοντέλο CNN, στα μετασχηματισμένα δεδομένα για την ανίχνευση DoS και DDoS επιθέσεων. Για την απόκτηση των δεδομένων κίνησης χρησιμοποίησαν το σύνολο δεδομένων CICDDoS2019, το οποίο περιέχει εισερχόμενη και εξερχόμενη κίνηση των πιο πρόσφατων DoS και DDoS επιθέσεων. Μέσω της αξιολόγησης παρατηρήθηκε ότι σε περίπτωση δυαδικής ταξινόμησης, η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει ακρίβεια 99.99% ενώ σε περίπτωση ταξινόμησης πολλαπλών κατηγοριών επιτυγχάνει ακρίβεια 87.06%.

Τέλος, οι Myridakis et al. [9] πρότειναν μια μέθοδο ανίχνευσης επιθέσεων βασισμένη τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Συγκεκριμένα παρακολουθείται η αυξομείωση του ρεύματος τροφοδοσίας της συσκευής. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από έναν μικροελεγκτή, που παρεμβάλλεται μεταξύ του ρεύματος τροφοδοσίας της συσκευής και της ίδιας της συσκευής. Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm πραγματοποιείται ο υπολογισμός της απόκλισης του ρεύματος τροφοδοσίας του συστήματος. Μέσω μετρήσεων που πάρθηκαν σε διάφορες καταστάσεις της IoT συσκευής, παρατηρήθηκε ότι όντως υπάρχει αύξηση της τάσης του ρεύματος τροφοδοσίας κατά την διάρκεια επίθεσης.

## Διάρθρωση Πτυχιακής

Ως δομή της πτυχιακής ορίζονται τα παρακάτω:

* Στο κεφάλαιο 1 εκτελέσαμε μια σύντομη εισαγωγή στη θεματολογία και στους στόχους της παρούσας εργασίας, καθώς και μια ανασκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας.
* Στο κεφάλαιο 2 αναλύουμε βασικές έννοιες του διαδικτύου των πραγμάτων, αναφερόμαστε στα εγγενή του χαρακτηριστικά και στην σημαντικότητα αφομοίωσης του από τη σύγχρονη βιομηχανία. Παράλληλα, παραθέτουμε οικονομικά στοιχεία, που υποστηρίζουν την στάση μας.
* Στο κεφάλαιο 3 επικεντρωνόμαστε στα ζητήματα και τις τεχνικές ασφαλείας των συσκευών και πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα IoT.
* Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε ένα πρότυπο σύστημα παρακολούθησης φυσικών χαρακτηριστικών και ανίχνευσης ανωμαλιών με βάση αυτά, και αναφερόμαστε στις τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του. Μέσω του συστήματος εκτελείται πειραματική αξιολόγηση, ενώ ακολούθως γίνεται και σχολιασμός των ευρημάτων.
* Στο κεφάλαιο 5 παραθέτουμε τα συμπεράσματα που αντλήσαμε κατά την εκπόνηση της εν λόγω πτυχιακής εργασίας.

# Κεφάλαιο 2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων

## Ορισμός

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, ως Διαδίκτυο των Πραγμάτων ορίζεται μια καθολική υποδομή δικτύου, η οποία διασυνδέει φυσικά και εικονικά αντικείμενα εκμεταλλευόμενη την συλλογή δεδομένων και τις δυνατότητες επικοινωνίας [10]. Με την σειρά της, η ITU ορίζει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ως μια καθολική υποδομή της κοινωνίας της πληροφορίας, η οποία επιτρέπει προηγμένες υπηρεσίες μέσω διασύνδεσης «Πραγμάτων». Η διασύνδεση φυσικών και ψηφιακών πραγμάτων βασίζεται στις αναπτυσσόμενες και διαλειτουργικές τεχνολογίες της πληροφορίας και των επικοινωνιών [11]. Πρακτικά όμως, ως Διαδίκτυο των Πραγμάτων μπορούμε να αναφερόμαστε σε δίκτυα από αντικείμενα, καθένα εξοπλισμένο με ενσωματωμένους αισθητήρες, τα οποία συνδέονται με το Διαδίκτυο.

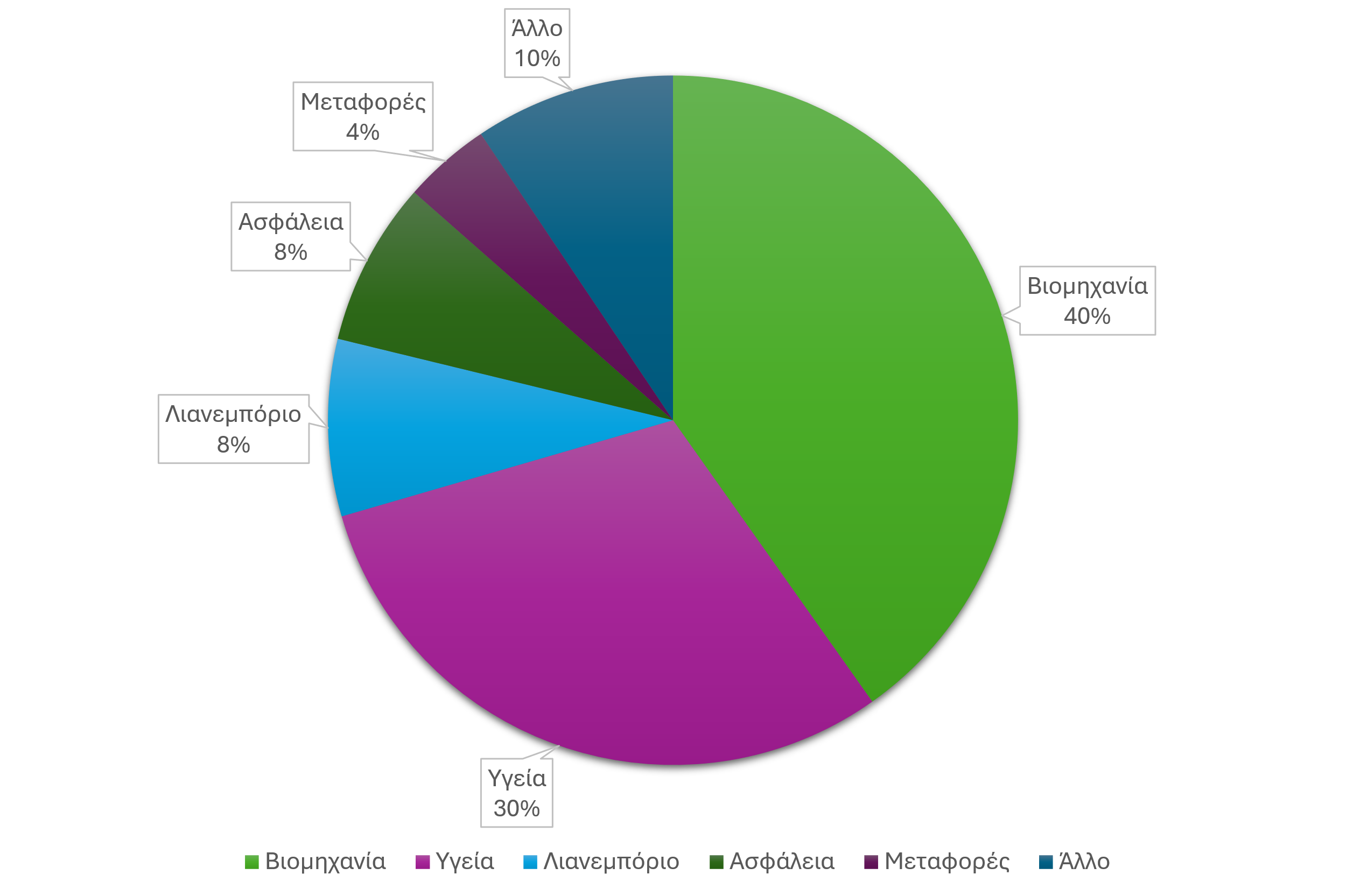
Από τη δεκαετία του 2000, η τεχνολογία οδεύει προς την εποχή του πανταχού παρόντος υπολογισμού (Ubiquitous Computing), όπου οι χρήστες του Διαδικτύου θα απαριθμούνται σε δισεκατομμύρια και θα αποτελούν την μειονότητα ως απλά πηγές και αποδέκτες πληροφορίας. Το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης του Διαδικτύου ήδη οφείλεται σε συσκευές και «Πράγματα», τα οποία ανταλλάσσουν συνεχόμενα πληροφορία [12].

### Χαρακτηριστικά του Διαδικτύου των Πραγμάτων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί από τέσσερεις βασικές ιδιότητες. Πρώτη ιδιότητα αποτελεί η αποδοτική και ικανή προς κλιμάκωση αρχιτεκτονική του συστήματος. Τα συστήματα του IoT οφείλουν να είναι αποδοτικά ως προς την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και ως προς την παρεχόμενη υπηρεσία, ενώ πρέπει να έχουν και τη δυνατότητα να επεκταθούν κατ’ απαίτηση. Δεύτερη ιδιότητα των συστημάτων του IoT αποτελεί η μη διφορούμενη ονοματοδοσία και διευθυνσιοδότηση των συσκευών του. Κάθε συσκευή που συμμετέχει σε ένα δίκτυο πρέπει να αποκτά μοναδική διεύθυνση και να είναι προσβάσιμη από κάθε άλλο κόμβο του. Το τρίτο χαρακτηριστικό που εμφανίζουν τα συστήματα αυτά είναι η αφθονία από αδρανείς κόμβους, κινητές συσκευές και συσκευές που δεν υλοποιούν το πρωτόκολλο IP. Ως εκ τούτου, τα συστήματα αυτά οφείλουν να μεριμνούν για κάθε είδος κόμβου που βρίσκεται σε αυτά και να εξασφαλίζει την διαλειτουργικότητα και την επικοινωνία. Τέλος, το τέταρτο χαρακτηριστικό είναι η διακοπτόμενη συνδεσιμότητα. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν δυνατή την συνύπαρξη πολλαπλών ετερογενών συσκευών σε ένα δίκτυο [13].

### Μερίδιο της Αγοράς

Ο όρος «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» σημαίνει πολλά, τόσο για τον ερευνητικό τομέα όσο και για τη σύγχρονη αγορά. Η δυνατότητα εφαρμογής των συστημάτων του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε πληθώρα τομέων έχει επιτρέψει τη δημιουργία ενός νέου τοπίου ανταγωνιστικότητας.



Εικόνα 1: Κατανομή των τομέων εφαρμογής του Διαδικτύου των Πραγμάτων.

Κυριότερος τομέας εφαρμογής αποτελεί η βιομηχανία, καταλαμβάνοντας το 40.2% της αγοράς. Όροι όπως το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων και τα κυβερνοφυσικά συστήματα γίνονται όλο και πιο διαδεδομένοι, ενώ αυξάνονται και οι επενδύσεις των βιομηχανιών σε σύγχρονες τεχνολογίες (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία). Δεύτερος κυριότερος τομέας μετά τη βιομηχανία αποτελεί ο τομέας της υγείας, καταλαμβάνοντας το 30.3%. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στον τομέα της έξυπνης υγείας, με κυριότερη εφαρμογή την παρακολούθηση βιομετρικών χαρακτηριστικών των ασθενών.

Τελευταίοι, αλλά όχι λιγότερο σημαντικοί είναι οι τομείς του λιανεμπορίου και της ασφάλειας με 8.3% και 7.7% της αγοράς αντίστοιχα. Συστήματα έξυπνου ανεφοδιασμού καταστημάτων, συστήματα καταγραφής προϊόντων και προηγμένα συστήματα πληρωμής μπορούν να ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητα μιας επιχείρησης. Αντίστοιχα, τα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης μέσω της χρήσης αισθητήρων δημιουργούν μια τελείως ξεχωριστή αγορά, αποτελώντας πολλές φορές κομμάτι αυτού που αναφέρεται ως έξυπνο σπίτι. Συγκεκριμένα, μεγάλη ανάπτυξη φαίνεται στον τομέα των έξυπνων καμερών με σύνδεση στο διαδίκτυο (IP Cameras), για την συνεχή παρακολούθηση, τόσο δημόσιων όσο και ιδιωτικών χώρων [14].

### Σύγχρονες Εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων

Οι εφαρμογή των ιδεών του Διαδικτύου των Πραγμάτων ξεκίνησε με απλές εφαρμογές, όπου πρώτος στόχος ήταν η διασύνδεση συσκευών. Η ανάπτυξη του διαδικτύου επέτρεψε την διασύνδεση, αρχικά υπολογιστών και ύστερα συσκευών, ανεξάρτητα από την γεωγραφική τους εγγύτητα. Πλέον, οι εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων περιορίζονται μόνο από τη φαντασία των σχεδιαστών. Συστήματα έξυπνης στάθμευσης και έξυπνων δρόμων υποστηρίζουν τον χώρο των έξυπνων οχημάτων για την ανάπτυξη των συγκοινωνιών. Τα έξυπνα συστήματα ενέργειας επιτρέπουν την βέλτιστη διαχείριση του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, την παρακολούθηση της κατάστασης απομακρυσμένων συστημάτων συλλογής ενέργειας όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Τα συστήματα παρακολούθησης εφοδιαστικής αλυσίδας, ανεφοδιασμού συλών, διαχείρισης αποβλήτων, παρακολούθησης επιπέδων καυσίμου και ανίχνευσης υγρών/διαρροών αποτελούν σημαντικά μέρη σε πληθώρα τομέων όπως η βιομηχανία και η ναυτιλία.

Τα συστήματα του Διαδικτύου των πραγμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την έγκαιρη ανίχνευση φυσικών καταστροφών και περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η ανίχνευση πυρκαγιών, η παρακολούθηση της μόλυνσης του αέρα, η παρακολούθηση των επιπέδων χιονιού, η πρόληψη κατολισθήσεων και χιονοστιβάδων, η ανίχνευση επιβλαβούς ακτινοβολίας και επικίνδυνων ή εύφλεκτων αερίων.

## Τεχνολογίες και Συστήματα

Η υλοποίηση ενός συστήματος που ανήκει στο Διαδίκτυο των πραγμάτων αποτελείται από συγκεκριμένες τεχνολογίες και υποσυστήματα. Οι τεχνολογίες που επιτρέπουν την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων μπορούν να χωριστούν σε τέσσερεις βασικές ομάδες.

* Τεχνολογίες υλικού
* Τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών και δικτύων
* Τεχνολογίες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων
* Τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση

Από τις παραπάνω ομάδες τεχνολογιών, οι απαραίτητες τεχνολογίες που πρέπει να υπάρχουν σε ένα σύστημα Διαδικτύου των Πραγμάτων είναι αυτές που επιτρέπουν τον υπολογισμό και την επικοινωνία.

### Συστήματα υλικού

Τα συστήματα υλικού που απαιτούνται σε ένα σύστημα IoT αποτελούν τους τερματικούς κόμβους του δικτύου, τα gateways και τους κόμβους τοπικής επεξεργασίας. Οι τερματικοί κόμβοι μπορεί να αποτελούν αισθητήρες, ενεργοποιητές ή τηλεπικοινωνιακά στοιχεία όπως RFID Tags. Από την άλλη, τα gateways και οι κόμβοι τοπικής επεξεργασίας μπορεί να αποτελούν κάποιο ενδιάμεσο λογισμικό (middleware), κάποιον δέκτη σήματος ή γενικά πομποδέκτες. Κύριος στόχος των gateways είναι η μετάφραση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας (π.χ. από Wi-Fi σε IP).

### Επικοινωνία

Η επικοινωνία των συσκευών σε ένα σύστημα είναι από τα πιο σημαντικά μέρη του συστήματος. Οι τρόποι επικοινωνίας μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, την τοπική συνδεσιμότητα και την καθολική συνδεσιμότητα. Η τοπική συνδεσιμότητα επιτυγχάνεται από τεχνολογίες όπως το Wi-FI (ΙΕΕΕ 802.11), το LoRa, το NB-IoT το ZigBee, το Bluetooth (IEEE 802.15.1) και τα δίκτυα 5G/4G. Για την επίτευξη καθολικής συνδεσιμότητας απαιτούνται συστήματα gateway, για την σύνδεση του τοπικού δικτύου με το διαδίκτυο [15].

Η κυριότερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των συσκευών στο IoT είναι τα WLANs με τη χρήση Wi-Fi. Το Wi-Fi λειτουργεί πάνω από την οικογένεια προτύπων IEEE 802.11, προσφέροντας πολλαπλές εκδόσεις τους όπως το 802.11b/g/n/ac/ax [16]. Τα πρότυπα αυτά καθορίζουν τον ρυθμό δεδομένων, τις συχνότητες λειτουργίας και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά. Οι συχνότητες λειτουργίας του Wi-Fi είναι είτε τα 2.4 GHz είτε τα 5 GHz. Στη συχνότητα των 2.4 GHz παρέχεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης, αλλά μικρότερες ταχύτητες και η επικοινωνία είναι πιο ευάλωτη σε παρεμβολές από γειτονικές συσκευές. Από την άλλη, η συχνότητα των 5 GHz παρέχει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αλλά με κόστος την μικρότερη εμβέλεια και περιορισμένες δυνατότητες διάθλασης.

Όσον αφορά την ασφάλεια του, το Wi-Fi συνοδεύεται από διάφορα πρωτόκολλα ασφαλείας όπως τα WPA2/3 για την αυθεντικοποίηση και την κρυπτογράφηση της μεταδιδόμενης πληροφορίες από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

Όλα τα πρότυπα Wi-Fi χρησιμοποιούν το CSMA/CA πρωτόκολλο για πρόσβαση στο μέσο, ενώ χρησιμοποιούν και ίδια δομή πλαισίου για τα πλαίσια του επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Σημαντικό πλεονέκτημα των προϊόντων 802.11 είναι πως έχουν καθοδική συμβατότητα, δηλαδή μια συσκευή που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 802.11g είναι συμβατή για επικοινωνία με ένα σημείο πρόσβασης 802.11ac [16]. Κάθε πρότυπο διαφοροποιείται στο φυσικό επίπεδο, λειτουργώντας σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων και επιτυγχάνοντας διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων. Επιπλέον, τα πρότυπα 802.11n και 802.11ac χρησιμοποιούν τεχνολογία MIMO για την εκπομπή και λήψη πολλαπλών σημάτων. Συγκεκριμένα, ένας σταθμός βάσης 802.11ac μπορεί να μεταδίδει προς πολλαπλούς σταθμούς ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας «έξυπνες κεραίες» [16]. Οι «έξυπνες κεραίες» στρέφουν τους λοβούς εκπομπής των πολλαπλών κεραιών έτσι ώστε να προσανατολίζονται πάντα προς την κατεύθυνση του δέκτη. Η τεχνική αυτή μειώνει σημαντικά τις παρεμβολές από γειτονικές συσκευές και αυξάνει την εμβέλεια για ένα προκαθορισμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Το πιο πρόσφατο πρότυπο, 802.11ax προσφέρει ακόμη υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων (έως 9,6 Gbps), βελτιωμένη αποδοτικότητα για το χειρισμό πολλαπλών συσκευών και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας [17].

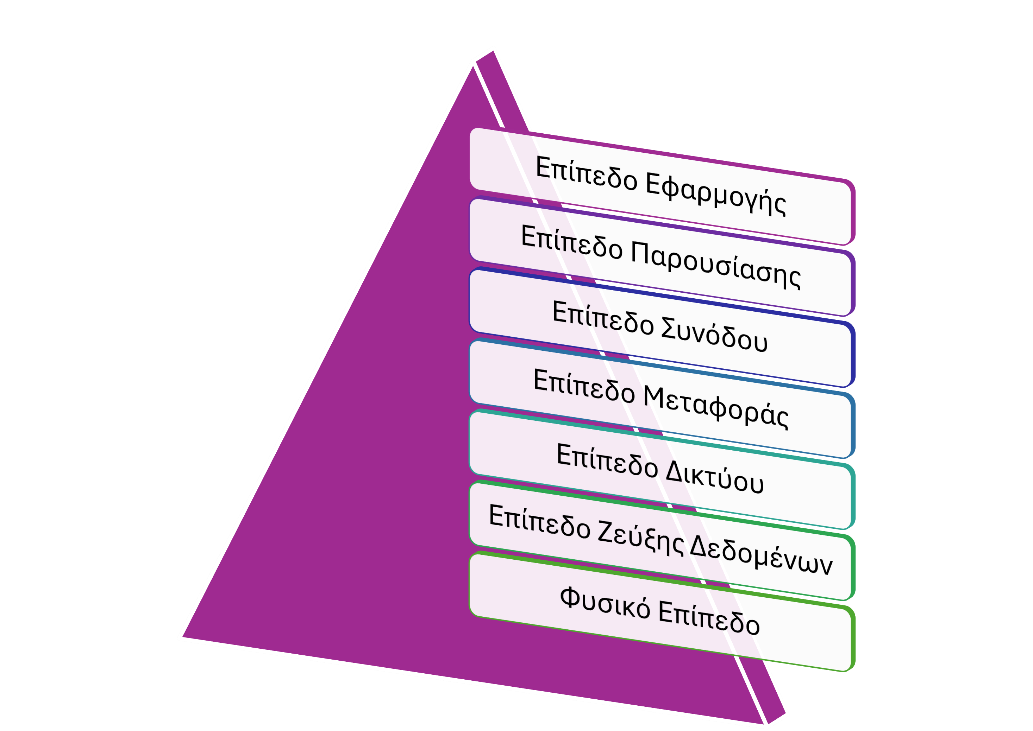
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Πρότυπο | Περιοχή συχνοτήτων (Η.Π.Α) | Ρυθμός δεδομένων |
| 802.11b | 2.4 GHz | < 11 Mbps |
| 802.11a | 5 GHz | < 54 Mbps |
| 802.11g | 2.4 GHz | < 54 Mbps |
| 802.11n | 2.5 GHz και 5 GHz | < 450 Mbps |
| 802.11ac | 5 GHz | < 1300 Mbps |
| 802.11ax | 2.4 GHz και 5 GHz | < 9.6 Gbps |

Το IoT και το Wi-Fi είναι δύο τεχνολογίες που είναι στενά συνυφασμένες, οδηγώντας στην ανάπτυξη και τις δυνατότητες των συνδεδεμένων συσκευών σε διάφορους τομείς [18]. Το Wi-Fi χρησιμεύει ως κρίσιμος καταλύτης για το IoT, παρέχοντας την ασύρματη συνδεσιμότητα που επιτρέπει σε δισεκατομμύρια συσκευές να επικοινωνούν και να μοιράζονται δεδομένα. Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα από τη χρήση του Wi-Fi ως τεχνολογία διασύνδεσης των συσκευών IoT. Η υποδομή Wi-Fi είναι πανταχού παρούσα, άμεσα διαθέσιμη σε σπίτια, γραφεία και δημόσιους χώρους, εξαλείφοντας την ανάγκη για πρόσθετη υποδομή δικτύου για πολλές εφαρμογές IoT. Τα νεότερα πρότυπα Wi-Fi, όπως τα 802.11ac και ax, προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως η ροή βίντεο από κάμερες ασφαλείας ή βιομηχανικούς αισθητήρες. Σε σύγκριση με άλλες επιλογές συνδεσιμότητας, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το Wi-Fi προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική λύση για πολλές εφαρμογές IoT, ιδίως σε μια τοπική περιοχή [19]. Τέλος, η δημιουργία και η διαχείριση των συνδέσεων Wi-Fi είναι σχετικά απλή, καθιστώντας τη φιλική προς το χρήστη τόσο για τους προγραμματιστές όσο και για τους καταναλωτές.

Όπως κάθε τεχνολογία, έτσι και το Wi-Fi εμφανίζει κάποιες αδυναμίες. Βασική αδυναμία του Wi-Fi είναι η περιορισμένη εμβέλεια. Τα εκπεμπόμενα σήματα έχουν περιορισμένη εμβέλεια, ιδίως στη ζώνη των 5 GHz, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο για συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων ή εφαρμογές που απαιτούν ευρεία κάλυψη περιοχής [16] [20]. Από την πλευρά της ασφάλειας, τα δίκτυα Wi-Fi είναι ευάλωτα σε παραβιάσεις ασφαλείας, εάν δεν έχουν ρυθμιστεί και ασφαλιστεί σωστά. Αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα για ευαίσθητες εφαρμογές IoT, ιδίως εκείνες που διαχειρίζονται κρίσιμα δεδομένα όπως βιομετρικά χαρακτηριστικά ή κρίσιμες παραμέτρους βιομηχανικών μονάδων. Τέλος, σημαντικό μειονέκτημα των προτύπων της οικογένειας 802.11 είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, το οποίο είναι κρίσιμο χαρακτηριστικό για όλα τα συστήματα IoΤ. Μεγάλο μέρος των συσκευών που μετέχουν σε ένα σύστημα IoT λειτουργούν με μπαταρία, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες τους, τόσο σε υπολογιστική ισχύ, όσο και σε αξιοποίηση πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

### Διαστρωμάτωση Διαδικτύου των Πραγμάτων

Όπως κάθε σύνθετο σύστημα, έτσι και τα συστήματα ΙοΤ απαιτούν μια αυστηρά καθορισμένη διαστρωμάτωση των επιπέδων λειτουργίας τους, για την βέλτιστη ανάπτυξη και τον προγραμματισμό τους. Το πιο γνωστό μοντέλο στρωματοποιημένης αρχιτεκτονικής δικτύου είναι το Open Systems Interconnection (OSI). Το μοντέλο OSI αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) και προδιαγράφει επτά επίπεδα τα οποία υλοποιούν συγκεκριμένες λειτουργίες, ώστε να είναι εφικτή η διασύνδεση διαφορετικών υπολογιστικών συστημάτων (βλ. Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Διαστρωμάτωση Επιπέδων Διαδικτύου των Πραγμάτων.

Το ανώτερο επίπεδο του μοντέλου OSI. Που βρίσκεται πιο κοντά στην εφαρμογή του τελικού χρήστη ονομάζεται επίπεδο εφαρμογής. Το λογισμικό που απευθύνεται στον χρήστη αλληλεπιδρά άμεσα με το επίπεδο εφαρμογής μέσω λειτουργιών όπως η κοινή χρήση αρχείων, ο χειρισμός μηνυμάτων ή η πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων. Σε αυτό το επίπεδο ανήκουν πρωτόκολλα υψηλού επιπέδου, όπως το HTTP, το POP, το SMTP και το FTP, για την κοινή χρήση πόρων [21]. Αμέσως μετά το επίπεδο εφαρμογής, βρίσκεται το επίπεδο παρουσίασης, που αφορά τη μετάφραση και τη μορφοποίηση δεδομένων. Σε αυτό το επίπεδο, τα πρωτόκολλα χειρίζονται διαδικασίες όπως η κρυπτογράφηση, η αποκρυπτογράφηση, η συμπίεση και η αποσυμπίεση. Ο στόχος του στρώματος παρουσίασης είναι να μετασχηματίσει τα δεδομένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να σταλούν μέσω ενός δικτύου με σύνταξη που ταιριάζει στις δομές που καθορίζονται από το στρώμα εφαρμογής [22]. Ακολούθως, το επίπεδο συνόδου δημιουργεί κανάλια επικοινωνίας μεταξύ συσκευών. Το συγκεκριμένο επίπεδο χειρίζεται ενέργειες όπως η σύνδεση, η αποσύνδεση και ο τερματισμός μιας συνόδου μεταξύ ενός πελάτη ή διακομιστή. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να ορίσει σημεία ελέγχου κατά τη διάρκεια μιας μεταφοράς δεδομένων, έτσι ώστε σε περίπτωση διακοπής , οι συσκευές να μπορούν να συνεχίσουν τη μεταφορά από το τελευταίο σημείο ελέγχου [22].

Με την σειρά του, το επίπεδο μεταφοράς παρέχει όλες τις λειτουργίες και τα μέσα που χρειάζονται ώστε να επιτευχθεί μια από άκρο σε άκρο επικοινωνία μεταξύ προγραμμάτων ή διεργασιών. Το επίπεδο μεταφοράς λαμβάνει δεδομένα από το επίπεδο συνόδου, τα διασπά σε τμήματα και τα μεταφέρει στο επίπεδο δικτύου, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα τμήματα φτάνουν σωστά στο άλλο άκρο. Στα πρωτόκολλα του επιπέδου αυτού ανήκουν τα TCP και UDP [16].

Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των πακέτων από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη, διασχίζοντας όλου τους ενδιάμεσους κόμβους και ενδέχεται να κατακερματίσει το πακέτο εάν υπερβαίνει το μέγιστο μέγεθος του δικτύου. Τα πιο συνηθισμένα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το επίπεδο είναι τα IP, ICMP και RIP [23].

Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων εγκαθιστά και τερματίζει μια σύνδεση μεταξύ δύο φυσικά συνδεδεμένων κόμβων σε ένα δίκτυο. Αποτελείται από δύο μέρη, τον έλεγχο λογικής σύνδεσης (LLC), ο οποίος αναγνωρίζει τα πρωτόκολλα δικτύου, εκτελεί έλεγχο σφαλμάτων και συγχρονίζει τα frames, και τον έλεγχο πρόσβασης στα μέσα (MAC), ο οποίος χρησιμοποιεί διευθύνσεις MAC για τη σύνδεση συσκευών και τον καθορισμό δικαιωμάτων μετάδοσης και λήψης δεδομένων [21].

Τέλος, το φυσικό επίπεδο αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο μετάδοσης δεδομένων μέσω φυσικών μέσων, όπως καλώδια ή ασύρματη μετάδοση, και αναφέρεται σε δυαδικά δεδομένα και στη διαδικασία μετατροπής τους σε ηλεκτρικά σήματα. Το κατώτερο αυτό στρώμα είναι υπεύθυνο για τις διασυνδεδεμένες συσκευές και ο κύριος σκοπός του είναι να εκτελεί την ταυτοποίηση των συσκευών και να παρέχει την ανακάλυψη υπηρεσιών [22]. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι διαφόρων τύπων (Arduino, Raspberry, ZigBee κ.λπ.), αλλά για να θεωρηθούν ως συσκευές IoT πρέπει να χρησιμοποιούν τεχνολογία επικοινωνίας που να τους επιτρέπει να συνδέονται μεταξύ τους είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω του Διαδικτύου.

# Κεφάλαιο 3. Ασφάλεια Συσκευών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Με την συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας και συγκεκριμένα των συσκευών IoT, οι δυνατότητες σύνδεσης και λειτουργίας, τόσο των ίδιων των συσκευών όσο και εφαρμογών έχουν επεκταθεί, προκαλώντας σημαντικά ζητήματα όσον αφορά την ασφάλεια. Επιπλέον, η ευρεία υιοθέτηση και η έντονη εμπορευματοποίηση των τεχνολογιών IoT καθιστούν τις συσκευές του ευάλωτες σε επιθέσεις [24].

Ένας από τους λόγους που τέτοιου είδους συσκευές είναι επιρρεπείς σε ευπάθειες είναι η έλλειψη τυποποίησης. Η εμπλοκή διάφορων προμηθευτών στην αγορά των διασυνδεδεμένων συσκευών έχει ως αποτέλεσμα κάθε μια να χρησιμοποιεί διαφορετικό λειτουργικό σύστημα ή πρωτόκολλο επικοινωνίας, με συνέπεια να καθίσταται δύσκολη η ανάπτυξη ενός κοινού συστήματος ασφαλείας.

## 3.1. Ζητήματα ασφαλείας

Η έννοια του ΙοΤ καλύπτει ένα μεγάλο εύρος φυσικών αντικειμένων, όπως προσωπικά είδη που χρησιμοποιούμε καθημερινά, βιομηχανικές συσκευές, συσκευές στον τομέα της υγείας και συσκευές στον τομέα της γεωργίας, της κτηνοτροφίας και του περιβάλλοντος γενικότερα. Ένα οικοσύστημα IoT περιλαμβάνει έξυπνες συσκευές με ενσωματωμένους επεξεργαστές, αισθητήρες και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό που συλλέγουν, αποστέλλουν και επεξεργάζονται δεδομένα από το περιβάλλον τους.

Τα ζητήματα ασφάλειας στο IoT προκύπτουν κυρίως λόγω του τεράστιου αριθμού διασυνδεδεμένων συσκευών, πολλές από τις οποίες είναι ανεξέλεγκτες, δημιουργώντας τρωτά σημεία. Αυτά τα κενά μπορούν να οδηγήσουν σε διαρροή ή απώλεια δεδομένων, ακόμη και μη εξουσιοδοτημένο έλεγχο από τρίτο πρόσωπο ή καταστροφή συσκευών και υποδομών. Καθώς οι διασυνδεδεμένες συσκευές αυξάνονται σε αριθμό και πολυπλοκότητα, αυξάνονται και οι δυνατότητες για κακόβουλες δραστηριότητες. Η αντιμετώπιση αυτών των κενών ασφαλείας είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Τα αποτελεσματικά μέτρα ασφαλείας είναι ζωτικής σημασίας, όπως επίσης και η διασφάλιση της ευρείας υιοθέτησης αυτών από τους τελικούς χρήστες.

Οι συσκευές του ΙοΤ ενέχουν σημαντικούς κινδύνους, συμπεριλαμβανομένων πιθανών παραβιάσεων προσωπικών πληροφοριών, μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε συσκευές και επιθέσεων σε διάφορα συστήματα. Η ταχεία επέκταση του IoT αυξάνει αυτούς τους κινδύνους, οι οποίοι μπορεί να απειλήσουν όχι μόνο τις συσκευές αλλά και τη σωματική ασφάλεια των χρηστών τους. Με την αυξανόμενη χρήση συσκευών συλλογής δεδομένων στην καθημερινή ζωή, παράγονται, επεξεργάζονται και αποθηκεύονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων, γεγονός που τα καθιστά ευάλωτα σε κακόβουλη χρήση από τρίτους. Τα περιστατικά παραβίασης συσκευών και κλοπής δεδομένων αναδεικνύουν την ανάγκη για ισχυρά μέτρα ασφαλείας στα συστήματα IoT. Στα πιο συχνά κενά ασφαλείας περιλαμβάνονται η χρήση παρωχημένου ή μη ασφαλούς λογισμικού, η μετάδοση μη κρυπτογραφημένων δεδομένων και η ανεπαρκής πιστοποίηση και εξουσιοδότηση.

## 3.2. Επιθέσεις

Στην υποενότητα αυτή θα αναφέρουμε τις επιθέσεις που πραγματοποιούνται ανά επίπεδο του μοντέλου OSI. Οι επιθέσεις που γίνονται στο φυσικό επίπεδο επικεντρώνονται στα φυσικά εξαρτήματα των συστημάτων, καθώς ο επιτιθέμενος πρέπει να βρίσκεται κοντά στο σύστημα. Επιπλέον, στο φυσικό επίπεδο συγκαταλέγονται επιθέσεις που βλάπτουν άμεσα την διάρκεια ζωής και τον κύκλο λειτουργίας μιας συσκευής. Ένα είδος επίθεσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο κατώτερο επίπεδο του μοντέλου OSI είναι οι επιθέσεις παρεμβολής. Ο επιτιθέμενος στοχεύει την ασύρματη επικοινωνία του συστήματος, παρεμβαίνοντας στις κανονικές συχνότητες που χρησιμοποιούν οι κόμβοι του δικτύου.

Οι επιθέσεις που πραγματοποιούνται στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων είναι τύπου spoofing, δηλαδή ο επιτιθέμενος πλαστογραφεί τη διεύθυνση MAC μιας συσκευής για να υποδυθεί μια άλλη στο δίκτυο. Η ενέργεια αυτή μπορεί να επιτρέψει στον επιτιθέμενο την πρόσβαση σε πόρους του δικτύου ή τη δυνατότητα τροποποίησης και υποκλοπής της κυκλοφορίας του δικτύου που προορίζεται για την νόμιμη πηγή. Σε αυτό το είδος επιθέσεων ανήκουν οι MAC spoofing, ARP spoofing και DHCP spoofing. Το πρωτόκολλο επίλυσης διευθύνσεων (Address Resolution Protocol – ARP) χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση μιας διεύθυνσης IP σε μια φυσική διεύθυνση μηχανής, αναγνωρίσιμη στο τοπικό δίκτυο. Όταν μια μηχανή χρειάζεται να βρει την διεύθυνση MAC από μια συγκεκριμένη διεύθυνση IP, στέλνει ένα αίτημα ARP στην μηχανή στην οποία ανήκει η διεύθυνση IP και εκείνη απαντά με ένα μήνυμα απάντησης ARP το οποίο περιέχει την φυσική διεύθυνση και στην συνέχεια, η απάντηση αυτή, καταχωρείται στην προσωρινή μνήμη ARP. Κατά την επίθεση, ο εισβολέας τροποποιεί την προσωρινή μνήμη ARP του στόχου με μια πλαστή καταχώρηση, έχοντας έτσι την δυνατότητα να υποκλέψει frames δεδομένων από το δίκτυο. Το πρωτόκολλο DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) χρησιμοποιείται για τη δυναμική κατανομή διευθύνσεων IP σε υπολογιστές για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Στη επίθεση DHCP spoofing, ο επιτιθέμενος δημιουργεί έναν πλαστό διακομιστή DHCP για να δώσει διευθύνσεις στους υπολογιστές-πελάτες. Επίσης, τους παρέχει και μια ψεύτικη πύλη δικτύου με τις αποκρίσεις DHCP. Έτσι, ο εισβολέας μπορεί να υποκλέψει τα πακέτα που οδηγούνται στην ψεύτικη πύλη δικτύου και να τα απορρίψει ή να απαντήσει στην πραγματική πύλη δικτύου.

Οι επιθέσεις στο τρίτο επίπεδο του μοντέλου OSI πραγματοποιούνται μέσω του διαδικτύου. Στόχος των επιθέσεων αυτών είναι η απόκτηση πρόσβασης σε ένα υπολογιστικό σύστημα που έχει απομονωθεί από το υπόλοιπο δίκτυο. Ανάμεσα στις επιθέσεις αυτού του είδους συγκαταλέγονται οι επιθέσεις ICMP flood, Smurf και Man-In-The-Middle (MITM). Στην περίπτωση της επίθεσης ICMP ή ping flood, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο μηνυμάτων ελέγχου διαδικτύου (Internet Control Message Protocol – ICMP). Κατά την επίθεση αυτή ο επιτιθέμενος στέλνει έναν μεγάλο αριθμό πακέτων ICMP Echo στον σύστημα-θύμα στοχεύοντας να υπερφορτώσει τη σύνδεση δικτύου με ψευδή κίνηση προκαλώντας άρνηση παροχής υπηρεσιών [1]. Παρόμοια με την ICMP flood επίθεση, είναι και η Smurf επίθεση, με την διαφορά ότι ο επιτιθέμενος στέλνει μεγάλο όγκο κίνησης ICMP με παραποιημένη διεύθυνση IP, δηλαδή έχει ορίσει ως διεύθυνση προέλευσης την διεύθυνση IP του στόχου, πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα κίνησης που κατακλύζει το σύστημα- θύμα [25]. Τέλος, σε μια επίθεση MITM ο επιτιθέμενος υποκλέπτει και τροποποιεί την επικοινωνία μεταξύ δύο εμπλεκόμενων, χειραγωγώντας την δρομολόγηση των πακέτων. Στόχος της επίθεσης είναι η απόσπαση προσωπικών πληροφοριών, όπως διαπιστευτήρια σύνδεσης, στοιχεία λογαριασμών και αριθμοί πιστωτικών καρτών.

Οι επιθέσεις που εκτελούνται στο επίπεδο μεταφοράς βασίζονται στη μετάδοση και παραγωγή τεράστιου όγκου κίνησης για την απενεργοποίηση των διαθέσιμων υπηρεσιών του δικτύου στους νόμιμους χρήστες, κάνοντας κατάχρηση των πρωτοκόλλων TCP και UDP, όπως οι επιθέσεις TCP SYN flood και UDP flood.

Η επίθεση SYN flood εκμεταλλεύεται την διαδικασία της τριπλής χειραψίας για την δημιουργία μιας σύνδεσης TCP. Ο επιτιθέμενος στέλνει πολλαπλά πακέτα συγχρονισμού και ο στόχος απαντάει με την αποστολή μηνύματος SYN/ACK για κάθε πακέτο συγχρονισμού που στάλθηκε, προκειμένου να επιβεβαιώσει την επικοινωνία. Στο σημείο αυτό αναμένεται η αποστολή του τελικού πακέτου ACK από τον επιτιθέμενο, για να ολοκληρωθεί η σύνδεση. Η μη αποστολή του τελικού πακέτου δημιουργεί μισάνοιχτες συνεδρίες, οι οποίες οδηγούν στη σταδιακή εξάντληση του διακομιστή και εν τέλη στην κατάρρευσή του [1].

Αντίθετα, η επίθεση UDP flood κατακλύζει την συσκευή του θύματος με πολλά πακέτα UDP σε τυχαίες θύρες. Στην συνέχεια, η συσκευή στόχος θα ελέγξει αν κάποια εφαρμογή χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη θύρα και αν όχι, θα απαντήσει με πακέτο ICMP Destination Unreachable. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όσα περισσότερα πακέτα UDP στείλει ο επιτιθέμενος, τόσα πακέτα απάντησης να στέλνει και η συσκευή στόχος, και συνεπώς καθίσταται μη προσβάσιμη από άλλους χρήστες, οδηγώντας σε άρνηση παροχής υπηρεσιών [26].

Στο επίπεδο συνόδου πραγματοποιείται η επίθεση Session hijacking, όπου ο επιτιθέμενος παραβιάζει το αναγνωριστικό περιόδου σύνδεσης ώστε να αποκτήσει πρόσβαση σε προσωπικές πληροφορίες και κωδικούς πρόσβασης του θύματος.

Στην κατηγορία επιθέσεων hijacking ανήκει και η επίθεση Secure Socket Layer (SSL) hijacking, που μπορεί να πραγματοποιηθεί στο έκτο επίπεδο. Το SSL είναι ένα πρωτόκολλο ασφαλείας του διαδικτύου που βασίζεται στην κρυπτογράφηση και όσοι ιστότοποι το εφαρμόζουν, έχουν στην διεύθυνση URL τους το «HTTPS». Κατά την επίθεση αυτή, ο επιτιθέμενος δημιουργεί πλαστά πιστοποιητικά για τα domains των ιστότοπων HTTPS που προσπαθεί να επισκεφθεί το θύμα. Ως αποτέλεσμα, το θύμα υποθέτει ότι έχει ασφαλή σύνδεση με τον ιστότοπο-στόχο, αλλά στην πραγματικότητα έχει πραγματοποιήσει σύνδεση με έναν κλωνοποιημένο ιστότοπο που ελέγχεται από τον επιτιθέμενο.

Τέλος, κάποιες από τις επιθέσεις που πραγματοποιούνται στο επίπεδο εφαρμογής είναι οι επιθέσεις phishing, HTTP flood και SQL injection. Οι επιθέσεις phishing χρησιμοποιούν παραπλανητικά μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, μηνύματα κειμένου, τηλεφωνικές κλήσεις ή ιστότοπους για να εξαπατήσουν τους χρήστες ώστε να μοιραστούν ευαίσθητα δεδομένα ή να κατεβάσουν κακόβουλο λογισμικό.

Στην επίθεση HTTP flood ο επιτιθέμενος υπερφορτώνει τον στόχο με αιτήσεις HTTP και τον οδηγεί σε άρνηση παροχής υπηρεσιών [27]. Κατά την επίθεση SQL injection, γίνεται εισαγωγή ενός SQL query μέσω τον δεδομένων εισόδου από τον χρήστη στην εφαρμογή με αποτέλεσμα ο επιτιθέμενος να έχει πρόσβαση στην βάση δεδομένων, είτε για να διαβάσει ευαίσθητα δεδομένα είτε για να την τροποποιήσει προς όφελος του.

## 3.3. Προδιαγραφές ασφαλείας

Στόχος της υποενότητας αυτής είναι η παρουσίαση των βασικών προδιαγραφών ασφαλείας που οφείλουν να τηρούν τα συστήματα IoT. Με βάση την μελέτη των Pal et al. [28] οι προδιαγραφές μπορούν να χωριστούν σε διακριτά σύνολα. Το πρώτο σύνολο αποτελεί την ανάγκη για ελαφριές λύσεις. Κάθε σχεδιαστής συστήματος οφείλει να λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό πόρων των συσκευών του IoT, ο οποίος κατ’ επέκταση θέτει περιορισμούς στην υλοποίηση κρυπτογραφικών τεχνικών και πρωτοκόλλων. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνεται η ανάγκη για ενεργειακή αποδοτικότητα. Συνεπώς, οι λύσεις ασφαλείας πρέπει να είναι επεξεργαστικά ελαφριές, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ των κρυπτογραφικών τεχνικών ασφαλείας και της βελτιωμένης επικοινωνίας των δεδομένων με προσοχή στην κατανάλωση ενέργειας. Το δεύτερο σύνολο προδιαγραφών ορίζει την ανάγκη των συστημάτων IoT να πραγματώνουν την έννοια της αποκεντρωμένης διαχείρισης. Όπως προαναφέραμε, τα συστήματα IoT μπορούν να κλιμακωθούν σε σημαντικά μεγάλο βαθμό. Ως εκ τούτου, οι κεντρικοποιημένες λύσεις ασφαλείας δεν αποτελούν δόκιμη επιλογή. Η ανερχόμενη αξιοποίηση των αποκεντρωμένων αρχιτεκτονικών με τη χρήση edge συσκευών επιφέρει μια κατανεμημένη συμπεριφορά στα συστήματα. Με βάση αυτά, η ασφάλεια των συσκευών πρέπει να βρίσκεται όσο πιο κοντά στην ευάλωτη συσκευή γίνεται, ενώ παράλληλα να υλοποιεί της προδιαγραφές του πρώτου συνόλου, για υπολογιστικά ελαφριά συστήματα. Μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική σκιαγραφεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα που θα είναι υπεύθυνο για συστάδες συσκευών.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του IoT είναι η ετερογένεια των συσκευών του.

Αυτό σημαίνει πως οι πληροφορίες περνούν από πολλαπλούς τομείς και τεχνολογίες. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω πτυχή σχηματίζεται το τρίτο σύνολο προδιαγραφών, που αφορούν την ασφάλεια από άκρο-σε-άκρο. Μέσω αυτού του συνόλου, καλύπτονται τα ζητήματα ασφαλούς αποθήκευσης, ασφαλούς επικοινωνίας, ασφαλούς περιεχομένου και ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Συνολικά απαιτούνται διαλειτουργικές τεχνολογίες ασφαλείας, πολιτικές διαχείρισης της πληροφορίας μεταξύ των διαφορετικών τομέων και δυνατότητες ταυτοποίησης ανάμεσα στα τερματικά σημεία του συστήματος. Παράλληλα, η εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως μια πτυχή, η διασφάλιση της οποίας οδηγεί και στην διασφάλιση της δικτύωσης των συσκευών. Είναι επίσης σημαντικό να προστατεύονται οι κρίσιμες παράμετροι QoS κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας και να προστατεύονται τα πακέτα δεδομένων κατά τη μετάδοσή τους.

Το τελευταίο σύνολο προδιαγραφών που προτείνεται στο [28], αφορά την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία της συσκευής. Τα συστήματα IoT πρέπει να είναι εύρωστα απέναντι σε παράγοντες όπως η φορητότητα, ο αυξανόμενος αριθμός επιθέσεων και οι πιθανές δυσλειτουργίες των συσκευών. Αντίστοιχη αντοχή θα πρέπει να επιδεικνύουν τα μέτρα ασφαλείας που προορίζονται για αυτά τα συστήματα. Η ύπαρξη ικανοτήτων αυτοεπιδιόρθωσης επιτρέπει στα συστήματα ασφαλείας να ανιχνεύουν και να αντιμετωπίζουν αυτόματα τις τυχόν βλάβες που έχουν προκληθεί, αξιοποιώντας την συγκέντρωση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από έξυπνους αισθητήρες. Όλα τα μέτρα ασφαλείας που προτείνονται πρέπει να εξασφαλίζουν την ακεραιότητα μεταξύ των επιμέρους λειτουργικών εξαρτημάτων και των υπηρεσιών σε εφαρμογές IoT ευρείας κλίμακας, όπως οι εμπορικοί τομείς (smart home, smart health, κ.λπ.).

## 3.4. Συστήματα ανίχνευσης

Λαμβάνοντας υπόψη την σημαντικότητα της ασφάλειας των συσκευών σε ένα δίκτυο IoT, προτείνονται τόσο από την ερευνητική κοινότητα όσο και από την βιομηχανία, συστήματα τα οποία είναι ικανά να ανιχνεύουν επιθέσεις που εκμεταλλεύονται τα κενά ασφαλείας. Πολλά από αυτά τα συστήματα λειτουργούν με βάση μια από τις δύο αρχές, την παρακολούθηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης (πακέτα πρωτοκόλλων) ή την παρακολούθηση των φυσικών χαρακτηριστικών του συστήματος (τάση ρεύματος, θερμοκρασία, κ.λπ.).

Όσον αφορά τα IDS, χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες: σε συστήματα ανίχνευσης εισβολών με βάση τον κεντρικό υπολογιστή (Host-based Intrusion Detection Systems – HIDS), σε συστήματα ανίχνευσης εισβολών στο δίκτυο (Network Intrusion Detection Systems – NIDS) και σε υβριδικά συστήματα ανίχνευσης εισβολών.

Η πρώτη κατηγορία IDS είναι αφιερωμένη αποκλειστικά στο σύστημα του κεντρικού υπολογιστή. Ως κεντρικός υπολογιστής μπορεί να θεωρηθεί ένας διακομιστής, ένας υπολογιστής ή οποιοσδήποτε άλλος τύπος συσκευής που παράγει αρχεία καταγραφής, μετρήσεις και άλλα δεδομένα που μπορούν να παρακολουθούνται για λόγους ασφαλείας. Από την ανάλυση των αρχείων καταγραφής μπορεί να εντοπιστεί κακόβουλη χρήση, παραδείγματος χάριν: τροποποίηση σε αρχεία ζωτικής σημασίας για την λειτουργικότητα του λειτουργικού συστήματος, παραβίαση των ελέγχων πρόσβασης κ.α. Τα HIDS μπορούν να δημιουργήσουν λεπτομερείς και ακριβείς υπογραφές για την ανίχνευση εισβολών στο σύστημα του κεντρικού υπολογιστή, οδηγώντας σε χαμηλά ποσοστά ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων λόγω της ακρίβειας αυτών των υπογραφών. Σε περίπτωση που εφαρμοστεί σωστά πλεονεκτεί έναντι του NIDS διότι μπορεί να εντοπίσει ύποπτο περιεχόμενο μέσα σε κρυπτογραφημένα πακέτα. Ως μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος ανίχνευσης εισβολών αναφέρεται το υψηλό κόστος συντήρησης [29]. Δύο από τα πιο δημοφιλή συστήματα ανίχνευσης εισβολών με βάση τον κεντρικό υπολογιστή είναι τα OSSEC και Tripwire [30].

Αντίθετα, τα συστήματα ανίχνευσης εισβολών στο δίκτυο πραγματοποιούν ανάλυση δεδομένων κίνησης δικτύου για τον εντοπισμό κακόβουλων δραστηριοτήτων. Αποτελούν αυτόνομες συσκευές που βρίσκονται στο ίδιο δίκτυο με το σύστημα που παρακολουθείται και έχουν την δυνατότητα να επιβλέπουν πολλά ξεχωριστά συστήματα σε ένα κοινό δίκτυο. Η τοποθέτηση μιας τέτοιας συσκευής σε αυτή τη θέση βοηθά στον άμεσο εντοπισμό εισβολών και συχνά περνά απαρατήρητη από τους επιτιθέμενους [31]. Τα NIDS μπορούν να συγκεντρώνουν δεδομένα και να καταγράφουν τις δραστηριότητες των κεντρικών υπολογιστών στα δίκτυα, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθοδολογίες για τον εντοπισμό εισβολών. Ωστόσο, η εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνολογίας μπορεί να επιβραδύνει το δίκτυο και δεν μπορεί να ανιχνεύσει κακόβουλα πακέτα δεδομένων, εάν αυτά είναι κρυπτογραφημένα. Ένα άλλο συχνό πρόβλημα με τα NIDS είναι το υψηλό ποσοστό ψευδών αρνητικών και ψευδών θετικών αποτελεσμάτων. Τα ψευδώς αρνητικά συμβαίνουν όταν οι απειλές ταξινομούνται εσφαλμένα ως φυσιολογικές, ενώ τα ψευδώς θετικά είναι καλοήθεις δραστηριότητες που αναγνωρίζονται εσφαλμένα ως απειλές [29]. Δύο από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα ανίχνευσης εισβολών στο δίκτυο είναι τα Snort και Suricata. Το πρώτο προσφέρει ανίχνευση και πρόληψη εισβολών σε πραγματικό χρόνο, μαζί με παρακολούθηση της ασφάλειας δικτύου ενώ το δεύτερο αποτελεί μια σύγχρονη ενναλακτική λύση του Snort, σχεδιασμένο να λειτουργεί πολυνηματικά και αξιοποιεί προηγμένα μοντέλα στατιστικής για την ανίχνευση ανωμαλιών [30].

Η ανάγκη για αποτελεσματική προστασία απέναντι στην συνεχώς αναπτυσσόμενη πληθώρα επιθέσεων, οδήγησε στον συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων συστημάτων. Τα υβριδικά IDS παρακολουθούν ταυτόχρονα τους κεντρικούς υπολογιστές και το δίκτυο, βελτιώνοντας την ασφάλεια του δικτύου και καθιστώντας τα δεδομένα πιο ασφαλή και λιγότερο επιρρεπή σε επιθέσεις ή κλοπή [32].

# Κεφάλαιο 4. Σχεδίαση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών της υλοποίησης μας, τον τρόπο διασύνδεσης και λειτουργίας τους, καθώς και τον κώδικα που απαιτείται για τον προγραμματισμό τους. Αρχικά θα ξεκινήσουμε με μια σύντομη ανάλυση των επιμέρους στοιχείων της υλοποίησης. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η κατασκευή και η διασύνδεση των επιμέρους στοιχείων, ο κώδικας και οι μετρήσεις. Τέλος, θα γίνει και μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ερευνητικών εργασιών με συναφή θεματολογία

## 4.1. Αρχιτεκτονική συστήματος

## 4.2. Χαρακτηριστικά συστήματος

Το παρόν κύκλωμα αποτελείται από έναν μικροϋπολογιστή Raspberry Pi Zero W, έναν μικροελεγκτή Arduino UNO και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας MCP9808, τα οποία και θα αναλύσουμε.

### 4.2.1. Raspberry Pi Zero W

Ο μικροϋπολογιστής συνοδεύεται από έναν μονοπύρηνο επεξεργαστή BCM2835, αρχιτεκτονικής 32 bit, χρονισμένο στο 1GHz και από μνήμη RAM χωρητικότητας 512MB. Χρησιμοποιώντας την θύρα CSI που μας παρέχει ο μικρουπολογιστής, έχουμε συνδέσει μια κάμερα ανάλυσης 5MP ώστε να λειτουργεί σαν IP κάμερα για τις ανάγκες της υλοποίησης μας. Για την διασύνδεση της υλοποίησης με το υπόλοιπο δίκτυο, ο μικροϋπολογιστής διαθέτει διεπαφή πρωτοκόλλου IEEE 802.11b/g/n (Wi-FI) με συχνότητα λειτουργίας στα 2.4 GHz.

Η εκτέλεση των προγραμμάτων πάνω στο Raspberry Pi Zero W υποστηρίζεται από το λειτουργικό σύστημα Raspberry Pi OS Legacy Lite 32-bit. Η έκδοση Lite του λειτουργικού συστήματος αποτελεί μια μινιμαλιστική εικόνα λογισμικού, αποτελούμενη από 493 πακέτα, από την οποία λείπει ο διαχειριστής X-window. Λόγω αυτού, το σύστημα είναι ταχύτερο και πιο συμβατό με περιβάλλοντα εξυπηρετητών και Internet of Things. (paper me RPi).

### 4.2.2. Arduino UNO R3

Το σύστημα του Arduino βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P, ο οποίος λειτουργεί ως κύριος επεξεργαστής χρονισμένος στα 16MHz, ενώ χρησιμοποιεί και τον επεξεργαστή ATmega16U2 για τη μετατροπή των σημάτων USB από τον υπολογιστή σε σειριακά σήματα που μπορεί να κατανοήσει ο ATmega328P. Ουσιαστικά, λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ της θύρας USB του υπολογιστή και του μικροελεγκτή. Επίσης, περιέχει μνήμες SRAM χωρητικότητας 2KB, FLASH χωρητικότητας 32KB και EEPROM χωρητικότητας 1KB.

Ως κομμάτι της υλοποίησης, το σύστημα του Arduino πραγματώνει το σύστημα παρακολούθησης (monitor system) σε σύνδεση με τον αισθητήρα θερμοκρασίας MCP9808. Κύρια εργασία του Arduino είναι η συλλογή των δεδομένων από τον αισθητήρα. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το Arduino, καταγράφονται από το πρόγραμμα RealTerm σε αρχεία κειμένου.

### 4.2.3. MCP9808

Είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας ο οποίος μετατρέπει θερμοκρασίες μεταξύ - 20℃ έως +100℃ σε μια ψηφιακή λέξη με ακρίβεια ±0,5℃. Επίσης διαθέτει τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις μέτρησης (+0,5℃, +0,25℃, +0,125℃ και +0,0625℃). Ο MCP9808 είναι συμβατός με το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C, το οποίο χρησιμοποιεί μόνο δύο ακροδέκτες του μικροελεγκτή για την μεταφορά δεδομένων, πέραν των ακροδεκτών για το ρεύμα και την γείωση, τον Serial Data Line (SDA) ο οποίος είναι ο Α4 και τον Serial Clock Line (SCL) ο οποίος είναι ο Α5.

## 4.3. Υλοποίηση συστήματος

### 4.3.1. Παρουσίαση συστήματος

Το σύστημα της υλοποίησης, καθώς και η διασύνδεση των επιμέρους στοιχείων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

Εικόνα που περιέχει κύκλωμα, ηλεκτρονικός μηχανικός, ηλεκτρονικό εξάρτημα, στοιχείο κυκλώματος

Περιγραφή που δημιουργήθηκε αυτόματα

Εικόνα 3: Απεικόνιση συστήματος παρακολούθησης θερμοκρασίας.

Το σύστημα κατασκευάζεται με βάση την λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας από την ΚΜΕ του Raspberry Pi (1). Ο αισθητήρας θερμοκρασίας MCP9808 (2) έχει τοποθετηθεί πάνω από τον επεξεργαστή του Raspberry Pi με τη βοήθεια θερμοαγώγιμης πάστας, για την ανίχνευση των μεταβολών της θερμοκρασίας κατά την λειτουργία του. Με την σειρά του, ο αισθητήρας συνδέεται στους ακροδέκτες A4 και A5 του Arduino UNO R3 (4) για την μεταφορά των μετρήσεων στον μικροελεγκτή. Το Raspberry Pi συνδέεται με την κάμερα (3), λειτουργώντας ως IP Camera.

### 4.3.2. Κώδικας υλοποίησης

Η παραπάνω διασύνδεση (Εικόνα 3) υποστηρίζεται από τον μικροελεγκτή, πάνω στον οποίο γράφεται ο κώδικας ελέγχου του συστήματος. Συγκεκριμένα, ο κώδικας αφορά την λειτουργία του αισθητήρα θερμοκρασίας.

Η βιβλιοθήκη Wire.h αξιοποιείται για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με συσκευές που χρησιμοποιούν το I2C πρωτόκολλο. Με την σειρά της, η βιβλιοθήκη Adafruit\_MCP9808.h περιέχει όλες τις συναρτήσεις που είναι απαραίτητες για να διαβάσουμε δεδομένα από τον αισθητήρα. Για την αναπαράσταση του αισθητήρα στον κώδικα δημιουργούμε ένα αντικείμενο κλάσης Adafruit\_MCP9808(), το οποίο και θα χρησιμοποιούμε από εδώ και στο εξής. Μέσα στη συνάρτηση setup() δηλώνουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε το Serial terminal με ρυθμό baud 9600 και περιμένουμε να ξεκινήσει η μετάδοση, ενημερώνοντας με κατάλληλο μήνυμα.

Επειδή ο αισθητήρας χρησιμοποιεί το I2C πρωτόκολλο, χρειάζεται να του υποδείξουμε σε ποια διεύθυνση θα συνδεθεί, διότι παρέχεται η δυνατότητα να συνδεθούν πολλοί αισθητήρες στον ίδιο δίαυλο I2C χρησιμοποιώντας διαφορετική διεύθυνση ο καθένας. Έτσι, οι διευθύνσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι από το 0x18 μέχρι το 0x1F, με την διεύθυνση 0x18 να είναι η προεπιλεγμένη. Έπειτα, θέτουμε την ανάλυση μέτρησης του αισθητήρα, η οποία μπορεί να είναι μια από τις εξής επιλογές:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Λειτουργία** | **Ανάλυση** | **Περίοδος δειγματοληψίας** |
| 0 | 0.5℃ | 30 ms |
| 1 | 0.25℃ | 65 ms |
| 2 | 0.125℃ | 130 ms |
| 3 | 0.0625℃ | 250 ms |

Τέλος, στη συνάρτηση loop() διαβάζουμε τις μετρήσεις από τον αισθητήρα σε βαθμούς Κελσίου και τις εμφανίζουμε στο Serial terminal ανά 100 ms.

## 4.4. Μετρήσεις και πειραματική αξιολόγηση

# Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

# Βιβλιογραφία

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | M. R. Kadri, A. Abdelli και J. B. Othman, «Survey and classification of Dos and DDos attack detection and validation approaches for IoT environments,» *Internet of Things,* τόμ. 25, 2024. |
| [2] | A. Berguiga και A. Harchay, «An IoT-Based Intrusion Detection System Approach for TCP SYN Attacks,» *Computers, Materials & Continua,* τόμ. 71, αρ. 2, pp. 3839-3851, 2022. |
| [3] | M. Roopak, G. Y. Tian και J. Chambers, «An Intrusion Detection System Against DDoS Attacks in IoT Networks,» σε *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, 2020. |
| [4] | M. Shurman, R. Khrais και A. Yateem, «DoS and DDoS Attack Detection Using Deep Learning and IDS,» *The International Arab Journal of Information Technology,* τόμ. 17, αρ. 4A, 2020. |
| [5] | N. F. Syed, Z. Baig, A. Ibrahim και C. Valli, «Denial of service attack detection through machine learning for the IoT,» *Journal Information and Telecommunication,* τόμ. 4, αρ. 4, pp. 482-503, 2020. |
| [6] | G. De La Torre Parra, P. Rad, K.-K. R. Choo και N. Beebe, «Detecting Internet of Things attacks using distributed deep learning,» *Journal of Network and Computer Applications,* αρ. 163, 2020. |
| [7] | F. A. Fernandes Silveira, F. Lima-Filho, F. S. Dantas Silva, A. de Medeiros Brito Junior και L. F. Silveira, «Smart Detection-IoT: A DDoS Sensor System for Internet of Things,» *2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP),* pp. 343-348, 2020. |
| [8] | F. Hussain, S. G. Abbas, M. Husnain, U. U. Fayyaz, F. Shahzad και G. A. Shah, «IoT DoS and DDoS Attack Detection using ResNet,» *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC),* pp. 1-6, 2020. |
| [9] | D. Myridakis, G. Spathoulas, A. Kakarountas, D. Schinianakis και J. Lueken, «Monitoring Supply Current Thresholds for Smart Device's Security Enhancement,» *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS),* pp. 224-227, 2019. |
| [10] | «Internet of Things (IoT),» ENISA, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.enisa.europa.eu/topics/iot-and-smart-infrastructures/iot. |
| [11] | International Telecommunication Union, *Overview of the Internet of things,* ITU, 2012. |
| [12] | International Telecommunication Union, ITU Internet Reports The Internet of Things, ITU, 2005. |
| [13] | T. Savolainen, J. Soininen και B. Silverajan, «IPv6 Addressing Strategies for IoT,» *Sensors,* τόμ. 13, αρ. 10, pp. 3511-3519, 2013. |
| [14] | O. Mazur, «10+ stats about the Internet of Things for eCommerce managers,» Cloudflight, 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ecommerce.cloudflight.io/blog/10-stats-about-the-internet-of-things-for-ecommerce-managers. |
| [15] | J. Ding, M. Nemati, C. Ranaweera και J. Choi, «IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey,» *IEEE Access,* τόμ. 8, pp. 67646-67673, 2020. |
| [16] | J. F. Kurose και K. W. Ross, Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th Edition επιμ., Pearson Education Inc., 2017. |
| [17] | «What is Wi-Fi 6?,» In-Synch Systems, 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.in-synchrms.com/single-post/what-is-wi-fi-6. |
| [18] | «Internet of Things,» Wi-FI Alliance, 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/internet-things. |
| [19] | «Wi-Fi delivers strong IoT Advantage,» Wi-Fi Alliance, 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-delivers-strong-iot-advantage. |
| [20] | D. Ngo, «Wi-Fi Range Explained: Great Expectations vs. Harsh Reality of the Invisible Magic,» Dong Knows Tech, 25 5 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://dongknows.com/wi-fi-range-expectations-vs-reality/. |
| [21] | E. R. Permana, F. N. Wahyu, H. Taufik και T. Thoyyibah, «The OSI and TCP/ IP Reference Models in the Era of Industry 4.0,» *Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science,* τόμ. 4, αρ. 3, pp. 936-942, 2024. |
| [22] | A. Fraihat, «Computer Networking Layers Based on the OSI Model,» *TEST ENGINEERING AND MANAGEMENT,* τόμ. 83, pp. 6485-6495, 2021. |
| [23] | A. A. Mughal, «Cyber Attacks on OSI Layers: Understanding the Threat Landscape,» *Journal of Humanities and Applied Science Research,* τόμ. 3, αρ. 1, pp. 1-18, 2020. |
| [24] | M. Hossain, G. Kayas, R. Hasan, A. Skjellum, S. Noor και S. M. Riazul Islam, «A Holistic Analysis of Internet of Things (IoT) Security: Principles, Practices, and New Perspectives,» *Future Internet,* τόμ. 16, αρ. 2, 2024. |
| [25] | N. Abughazaleh, R. b. Jabal και M. Btish, «DoS Attacks in IoT Systems and Proposed Solutions,» *International Journal of Computer Applications,* τόμ. 176, αρ. 33, 2020. |
| [26] | H. S. Obaid και E. H. Abeed, «DoS and DDoS Attacks at OSI Layers,» *International Journal of Multidisciplinary Research and Publications,* τόμ. 2, αρ. 8, pp. 1-9, 2020. |
| [27] | «HTTP flood attack,» Cloudflare, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.cloudflare.com/learning/ddos/http-flood-ddos-attack/. |
| [28] | S. Pal, M. Hitchens, T. Rabehaja και S. Mukhopadhyay, «Security Requirements for the Internet of Things: A Systematic Approach,» *Sensors,* τόμ. 20, αρ. 20, 2020. |
| [29] | A. Nisar, «Intrusion Detection Systems: Categories, Attack Detection and Response,» *SSRN,* p. 5, 2023. |
| [30] | I. Martins, J. S. Resende, P. R. Sousa, S. Silva, L. Antunes και J. Gama, «Host-based IDS: A review and open issues of an anomaly detection system in IoT,» *Future Generation Computer Systems,* τόμ. 133, pp. 95-113, 2022. |
| [31] | P. Panagiotou, N. Mengidis, T. Tsikrika, S. Vrochidis και I. Kompatsiaris, «Host-based intrusion detection using signature-based and AI-driven anomaly detection methods,» *Information and Security,* τόμ. 50, 2021. |
| [32] | E. M. Maseno, Z. Wang και H. Xing, «A Systematic Review on Hybrid Intrusion Detection System,» *Security and Communication Networks,* τόμ. 2022, p. 23, 2022. |
| [33] | A. Munshi, N. A. Alqarni και N. A. Almalki, «DDOS Attack on IOT Devices,» σε *2020 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Riyadh, Saudi Arabia, 2020. |
| [34] | D. Myridakis, G. Spathoulas, A. Kakarountas, D. Schoinianakis και J. Lueken, «Mimicking Biometrics on Smart Devices and Its Application in IoT Security for Health Systems,» σε *IoT and ICT for Healthcare Applications*, N. Gupta και S. Paiva, Επιμ., Springer, Cham, 2020, pp. 175-189. |
| [35] | R. Dilki, «An overview of the OSI model and its security threats,» FORTRA, 5 5 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.tripwire.com/state-of-security/overview-osi-model-and-its-security-threats. |

# Παραρτήματα

## Παράρτημα Α: Κώδικες Arduino

### Ι. Κώδικας αισθητήρα θερμοκρασίας MCP9808

#include <Wire.h>

#include "Adafruit\_MCP9808.h"

Adafruit\_MCP9808 tempsensor = Adafruit\_MCP9808();

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  while (!Serial);

  Serial.println("MCP9808 temp sensor");

  if (!tempsensor.begin(0x18)) {

    Serial.println("Couldn't find MCP9808! Check your connections and verify the address is correct.");

    while (1);

  }

   Serial.println("Found MCP9808!");

  tempsensor.setResolution(0);

}

void loop() {

  float c = tempsensor.readTempC();

  Serial.print(c, 2);

  Serial.println("\t");

  delay(100);

}

## Παράρτημα B: Σενάρια κελύφους Raspberry Pi

### Ι. Κώδικας καταγραφής θερμοκρασίας συστήματος

import **os**

import **time**

def **measure\_temp**():

    temp = **os**.**popen**("vcgencmd measure\_temp").**readline**()

    return (temp.**replace**("temp=",""))

while True:

**print**(**measure\_temp**())

**time**.**sleep**(0.1)

## Παράρτημα Γ: Κώδικες Matlab

### Ι. Κώδικας μονών γραφημάτων τιμών θερμοκρασίας

clear all;

clc;

file1 = load(['../files/without attack/night\_with\_movement\_with\_script.txt']);

Ts = 0.1;

t1 = (0:length(file1)-1)\*Ts/60;

figure;

plot(t1,file1);

title('Night (with movement, with script)');

[min\_val,idx\_min] = min(file1);

[max\_val,idx\_max] = max(file1);

hold on;

yline(mean(file1), 'm', 'LineWidth',1.5);

plot(t1(idx\_max),file1(idx\_max),'\*r', 'LineWidth',2);

plot(t1(idx\_min),file1(idx\_min),'\*g','LineWidth',2);

hold off;

xlim([0 26]);

xlabel('time (seconds)');

ylabel('temperature (celcius)');

legend('Measurement', sprintf('Mean: %g°C', mean(file1)),sprintf('Max: %g°C, Time: %g sec',max\_val, t1(idx\_max)),sprintf('Min: %g°C, Time: %g', min\_val, t1(idx\_min)), 'Location','southeast');

### ΙΙ. Κώδικας πολλαπλών γραφημάτων τιμών θερμοκρασίας

clear all; clc;

meas = load('../files/without attack/without\_movement\_with\_script2.txt')';

Ts = 0.1; % sampling period

fs = 1/Ts; % sampling frequency

samples\_per\_25min = 15000;

sampling\_parts = ceil(length(meas)/samples\_per\_25min);

figure;

t = (0:length(meas)-1)\*Ts/60;

plot(t,meas);

title('Measurements');

xlabel('time (seconds)');

ylabel('temperature (celcius)');

grid on;

%

% break measurements per 25 minutes

x = ceil(sampling\_parts);

bins = x\*samples\_per\_25min-length(meas);

new\_meas = [meas zeros(1,bins)];

R2 = reshape(new\_meas,samples\_per\_25min,[]);

titles = {"Boot", "Idle", "Normal"};

for ii=1:3

figure;

if ii == sampling\_parts

y = R2(1:length(R2(:,ii))-bins, ii)';

else

y = R2(:,ii)';

end

t = (0:length(y)-1)\*Ts/60;

plot(t, y);

[min\_val,idx\_min] = min(y);

[max\_val,idx\_max] = max(y);

hold on;

yline(mean(y), 'm', 'LineWidth',1.5);

% text(0, mean(y), ['Mean: ' num2str(mean(y))]);

plot(t(idx\_max),y(idx\_max),'\*r', 'LineWidth',2);

plot(t(idx\_min),y(idx\_min),'\*g','LineWidth',2);

% text(t(idx\_min), min\_val, ['min: ' num2str(min\_val) 'time: ' num2str(t(idx\_min))]);

% text(t(idx\_max), max\_val, ['max: ' num2str(max\_val) 'time: ' num2str(t(idx\_max))]);

hold off;

title(titles(ii));

xlabel('time (seconds)');

ylabel('temperature (celcius)');

legend('Measurement', sprintf('Mean: %g°C', mean(y)),sprintf('Max: %g°C, Time: %g sec',max\_val, t(idx\_max)),sprintf('Min: %g°C, Time: %g', min\_val, t(idx\_min)), 'Location','southeast');

grid on;

end