System Security με Χρήση **ESP32**

Από την έρευνα, στην υλοποίηση

Καραγιαννλιδης Βασίλειος

Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

Αγαπίου Δημήτριος

Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

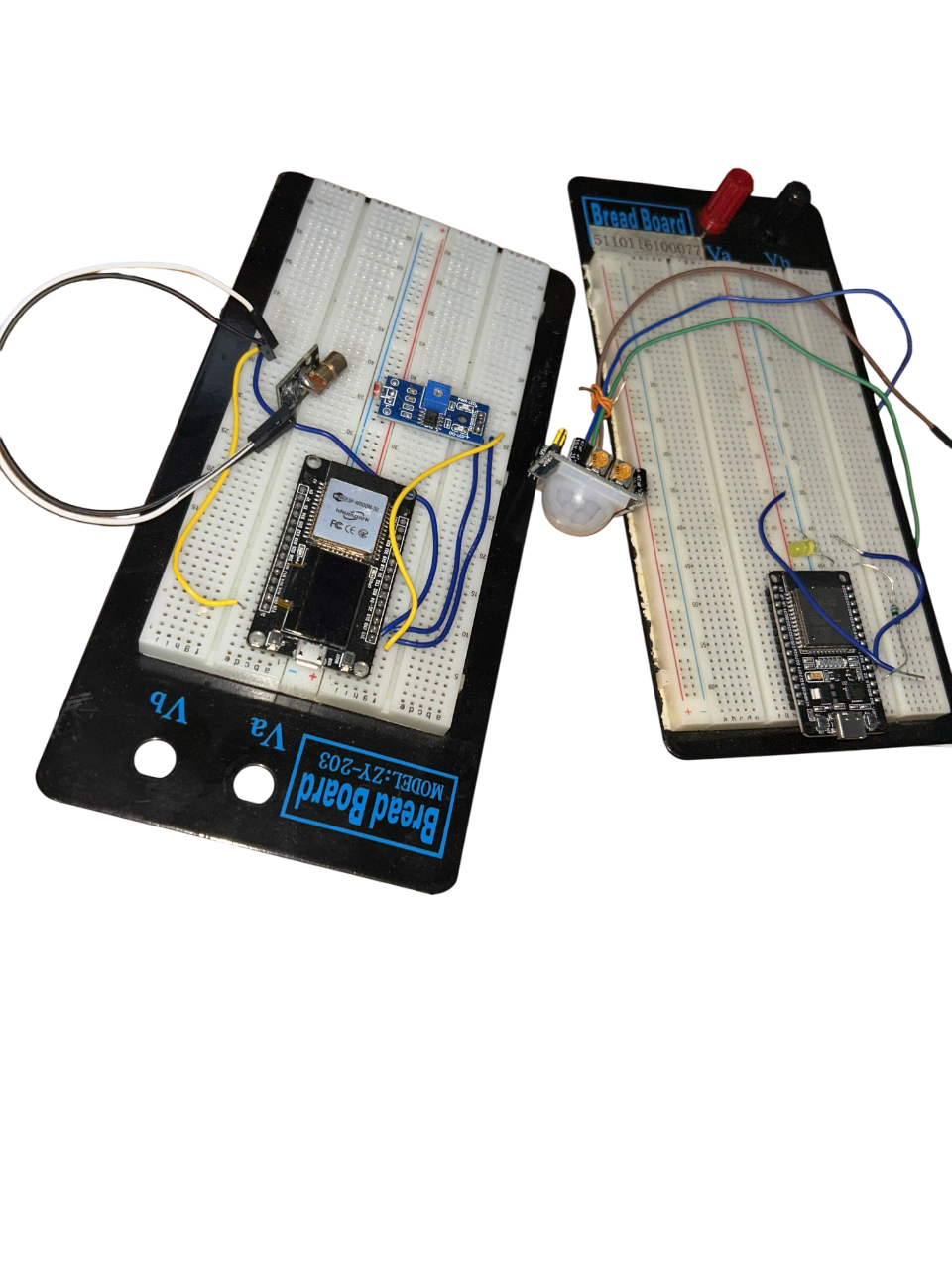
**Το παρόν Σύστημα Ασφαλείας αναπτύχθηκε για το μάθημα Internet of Things, με σκοπό μια οικονομική και ανοιχτού κώδικα λύση για ένα αποδοτικό σύστημα ασφαλείας.**

Keywords: μικροελεγκτή, ESP32, πομπός, ς, σύστημα

# Εισαγωγη

Η άνοδος της τεχνολογικής προόδου έχει επιφέρει καινοτομίες τόσο στην καθημερινότητα των ανθρώπων , όσο και στην πολυπλοκότητα του πως διαχειρίζονται πλέον ανήθικες πράξεις όπως, είναι η κλοπή. Σε περιόδους όπου η διασύνδεση συσκευών και η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελούν βασικές απαιτήσεις για κάθε καινοτόμο εφαρμογή, η ανάγκη για ευέλικτα και προσιτά συστήματα ασφαλείας γίνεται επιτακτική. Οι κλασικές, αλλά συνήθως απλοϊκές λύσεις που βρίσκονται στην αγορά αυτή τη στιγμή, αν και αποτελεσματικές, συχνά απαιτούν μια μεγάλη κατανάλωση ενέργειας αλλά και εγκατάστασης και συντήρησης. Αυτό καθιστά τους χρήστες να μπαίνουν σε δεύτερες σκέψεις προκειμένου να προστατέψουν τον εαυτό τους αλλά και του χώρου τους καθώς το κόστος αποτελεί σοβαρό παράγοντα προς κάθε νοικοκυριό.

Στο πρόβλημα αυτό πραγματεύεται το παρακάτω Security System, με γνώμονα την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, την εύκολη διαχείριση των δεδομένων και την απλή εγκατάσταση και χρήση από τους χρήστες. Η χρήση απλών και «έξυπνων εφαρμογών» σε συνδυασμό με αισθητήρες απλοϊκής χρήσης αποτελούν το τέλειο εργαλείο προς κάθε χρήστη.



Το παρόν **σύστημα** υλοποιείται με χρήση μικροελεγκτών **ESP32**. Χρησιμοποιούνται πρωτόκολλά επικοινωνίας ESP-NOW και Wifi Low Power για την άμεση επικοινωνία τους και την χρήση του MQTT προκειμένου να εμφανίζονται οι αλλαγές των δεδομένων σε local host με τη χρήση και την άμεση επικοινωνία με το Home Assistant . Ο συνδυασμός αισθητήρων PIR (passive infared) και ο φωτοαισθητήρας με τον Laser Pointer προσφέρουν άμεση επιβεβαίωση κάποιου εισβολέα καθώς γίνεται απευθείας αλλαγή στο **σύστημα** Home Assistant αλλά και ειδοποίηση ήχου με την χρήση βομβητή (buzzer). Το **σύστημα** αυτό είναι εύκολα υλοποιήσιμο και καθιστά εύκολη λύση τόσο για προσωπική χρήση, όσο και για υλοποίηση σε εργασιακό – επαγγελματικό χώρο. Λόγο της χαμηλής του κατανάλωσης, τόσο στην χρήση των αισθητήρων που χρησιμοποιεί, αλλά και των πρωτοκόλλων του, αποτελεί το τέλειο εργαλείο για Home Security προσφέροντάς ένα λειτουργικό και άμεσα επεκτάσιμο **σύστημα** για ενσωμάτωση πολλών έξυπνων λειτουργιών.

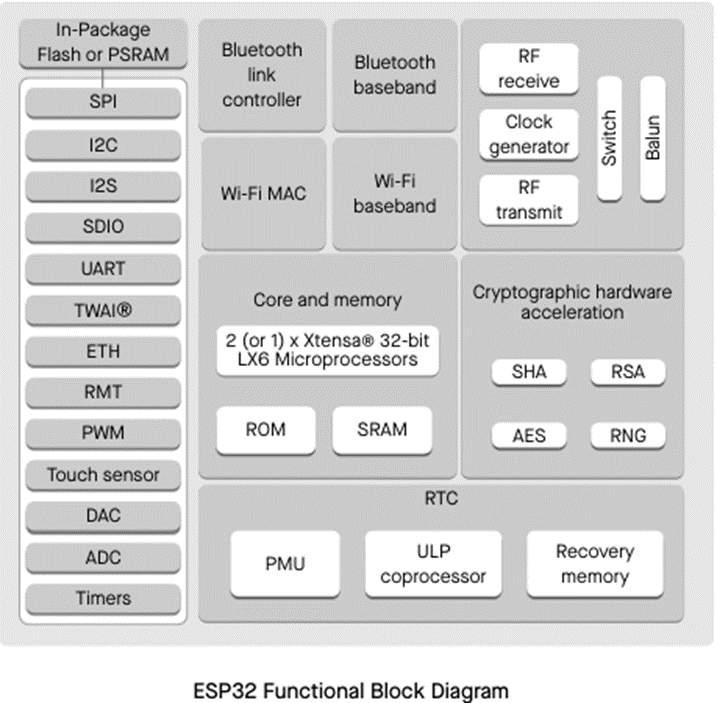
Η καινοτομία της προσέγγισης μας έγκειται στην ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω της χρήσης **sleep modes** στους κόμβους ανίχνευσης, καθώς και στην αξιοποίηση της δυνατότητας **peer-to-peer** επικοινωνίας του ESP-NOW, η οποία δεν απαιτεί την ύπαρξη router ή τοπικού δικτύου. Επιπλέον, το **σύστημα** επιτρέπει την αυτόνομη λειτουργία των κόμβων, διατηρώντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε κεντρικές πλατφόρμες IoT, με σκοπό την παρακολούθηση, την καταγραφή και τη λήψη δεδομένων.

Η δομή του συστήματος αποτελείται από έναν transmitter, ο οποίος έχει σκοπό την συλλογή δεδομένων μέσω του ανιχνευτή κίνησης (PIR Sensor) και την αποστολή των δεδομένων αυτών στον **πομπό** receiver, ο οποίος αναλαμβάνει την συλλογή δεδομένων του φωτοαισθητήρα, την ενεργοποίηση του βομβητή (buzzer) και την αποστολή δεδομένων μέσω του πρωτοκόλλου MQTT στο **σύστημα** Home Assistant.Προκειμένου να επιτύχουμε την επικοινωνία μεταξύ του πομπού (transmitter) και του (receiver) χρησιμοποιήσαμε το πρωτόκολλο επικοινωνίας ESP-NOW για τον ομαλή, σίγουρη και παν απ’ όλα σταθερή επικοινωνία. Η εφαρμογή αυτή είναι κατάλληλη για την ανίχνευση εισβολέων ή και ανεπιθύμητων οντοτήτων στον χώρο, καθιστώντας τη κατάλληλη για βιομηχανικές περιοχές αλλά και χώρους οικίας.

# Πληρησ και λεπτομερησ περιγραφη της εφαρμογησ

## Επισκόπηση του συστήματος, Γενική Ανάλυση

Το παρόν project υλοποιήθηκε με τη χρήση του **μικροελεγκτή** **ESP32**, όπου με την βοήθεια του καταφέραμε να υλοποιήσουμε την ιδέα μας με χαμηλή κατανάλωση και αποτελεσματικότητα. Ο **μικροελεγκτής** αυτός πρόκειται για ένα ισχυρό και ευέλικτο System-on-Chip (SoC), σχεδιασμένο από την εταιρεία Espressif Systems, το οποίο ενοποιεί επεξεργαστική ισχύ, συνδεσιμότητα και δυνατότητες ελέγχου σε ένα ενιαίο κύκλωμα. Διαθέτει διπύρηνο επεξεργαστή (Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6), ενσωματωμένο Wi-Fi και Bluetooth/BLE, καθώς και πληθώρα I/O θυρών, καθιστώντας τον ιδανικό για πολλαπλές εργασίες σε σχέση με το IoT (Internet of Things).



Από Espressif, διαθέσιμο στην βιβλιογραφία [4]

Στα πλαίσια του συστήματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν δυο **ESP32** με τον καθένα τους από έναν μοναδικό ρόλο: ο ένας χρησιμοποιείται σαν ς (receiver), ο οποίος έχει ταυτόχρονα αναλάβει και την πολυπλεξία του προγράμματος και των δεδομένων, και ο άλλος ως **πομπό**ς (transmitter). Ο κύρια εργασία του πομπού είναι για την ανίχνευση φυσικών οντοτήτων ή και συμβάντων, όπως της κίνησης εντός του οπτικού του πεδίου, ενώ ο ς είναι υπεύθυνος για την συλλογή των πολλαπλών πληροφοριών. Οι πληροφορίες, μετά από την κατάλληλη επεξεργασία, προβάλλονται τοπικά με την χρήση οθόνης OLED και buzzer. Τέλος οι πληροφορίες αυτές αποστέλλονται στο κεντρικό **σύστημα** παρακολούθησης Home Assistant μέσω του πρωτοκόλλου MQTT.

Η επιλογή του **ESP32** έγινε με βάση τα πολλαπλά πλεονεκτήματα:

1. **Οικονομική Αγορά**
2. **Υψηλή επεξεργαστική ισχύς, ικανή για τοπική ανάλυση σημάτων**
3. **Υψηλή ενεργειακή απόδοση χαμηλού κόστους, με την υποστήριξη ESP-NOW, Light Sleep Mode και Wifi Low Power**
4. **Open-source υποστήριξη με μια μεγάλη γκάμα βιβλιοθηκών έτοιμες προς χρήση από τον καθένα.**

Η υλοποίηση αυτή βασίζεται σε μια επικεντρωμένη προσέγγιση, με στόχο η γενική επεξεργασία να γίνεται τοπικά στον **ESP32**, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για μια διαρκή επικοινωνία με τον κεντρικό server. Έτσι το **σύστημα** αυτό καθίσταται πιο αποδοτικό και πιο σταθερό σε περιβάλλοντα με περιορισμένη συνδεσιμότητα.

Ο στόχος του συστήματος είναι να παρέχει ένα ευφυές **σύστημα** ανίχνευσης κίνησης, με την κατάλληλων αισθητήριων φωτεινότητας, το οποίο είναι σχεδιασμένο για να ενσωματωθεί σε ευρύτερα συστήματα αυτοματισμού σπιτιού και εσωτερικού χώρου. Η άμεση τοπική απόκριση μέσω buzzer και οθόνης OLED, σε συνδυασμό με την αποστολή δεδομένων στον τοπικό server Home Assistant, δημιουργώντας έτσι ένα **σύστημα** που είναι τόσο αυτόνομο, όσο και συνεργατικό και επεκτάσιμο.

## Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται σε έναν διακριτό διαχωρισμό ρόλων μεταξύ των δύο συσκευών **ESP32**, οι οποίες επικοινωνούν ασύρματα μέσω του πρωτοκόλλου ESP-NOW, και στη συνεχεία, ο ς (receiver) στέλνει τα δεδομένα στον Home Assistant με τη βοήθεια του MQTT. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τόσο την τοπική απόκριση από εξωτερικές εναλλαγές κατάστασης (π.χ. την ενεργοποίηση buzzer ή OLED) όσο και τη καταγραφή και παρακολούθηση τους από το χρήστη μέσω διαδικτύου μέσω του τοπικού εργαλείου-menu Home Assistant.

**2.1. Εξωτερική ανίχνευση συμβάντων**

**2.1.1. Πομπός (Transmitter)-ESP32**

Ο **πομπός**, **ESP32** transmitter, είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση φυσικών εξωτερικών μεταβολών στον χώρο. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό είναι με την χρήση του αισθητήρα PIR (passive infrared). Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση είναι το **HC-SR501.** Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος αισθητήρας ήταν λόγο της μεγάλης γκάμας των χαρακτηριστικών του. Ο βασικός του τρόπου λειτουργίας είναι η ανίχνευση θερμότητας σε απόσταση από 0.1μ έως 7μ. Το κόστος λειτουργίας του παραμένει σταθερά χαμηλό, στα 65mA, καταφέρνοντας να ξεχωρίσει αντικείμενα από ζωντανά όντα. Η απαιτούμενη τροφοδοσία του κυμαίνεται από τα 4V έως τα 12V. Το παρόν χαρακτηριστικό το καθιστά άριστο για την σύζευξη του με τον **ESP32**. H απαραίτητη συνδεσμολογία που απαιτεί αποτελείται από τρία καλώδια, του ρεύματος, της γείωσης και του σήματος PWM.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Pin number | Pin Name | Description |
| 1 | Vcc | Input voltage is +5V for typical applications. Can range from 4.5V- 12V |
| 2 | High/Low Output (Dout) | Digital pulse high (3.3V) when triggered (motion detected) digital low(0V) when idle(no motion detected |
| 3 | Ground | Connected to ground circuit |

Ο αισθητήρας κίνησης PIR ανιχνεύει πιθανών μεταβολές στην υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από σώματα στον χώρο. Έτσι το αισθητήριο PIR κάνει άμεση ανίχνευση παρουσίας ή κίνησης και ενεργοποιείται μόλις ανιχνευθεί θερμική μεταβολή.

**2.1.2 ς (Receiver)-ESP32**

Ο ς, receiver **ESP32**, έχει πολλές λειτουργίες στο παρόν **σύστημα**. Βασικότερος του σκοπός είναι η μεταφορά και η συλλογή των δεδομένων. Στον μικροελεγκτή αυτό έχει ενσωματωθεί ένας φωτοαισθητήρας ο οποίος ανιχνεύει την διακοπή φωτός από lazier pointer **τον** οποίο ενεργοποιεί σε σταθερή κατάσταση. Ο αισθητήρας φωτός που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή αυτή δεν θα μπορούσε να είναι άλλος από τον ΚΥ-018. Η συνδεσμολογία που απαιτεί είναι μόνο του ρεύματος μέσω της πηγής του **μικροελεγκτή** **ESP32** και τη γείωσης. Η χρήση του είναι υψίστης σημασίας καθώς κατά την διακοπή αίσθησης του γίνεται η εξακρίβωση παραβάτη στον χώρο. Εν κατακλείδι, λειτουργεί ως φίλτρο ή συνθήκη ενεργοποίησης, ελέγχοντας αν υπάρχει φως ή αν ο αισθητήρας έχει «σπάσει» λόγω απόκρυψης της φωτεινής πηγής laser.

Οι δύο αισθητήρες λειτουργούν παράλληλα και η ανίχνευσή τους μετατρέπεται σε ψηφιακή πληροφορία, η οποία μεταδίδεται μέσω του ESP-NOW στον .

**2.2 Επικοινωνία ESP-NOW**

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας αναπτύχθηκε από την εταιρία δημιουργίας και ανάπτυξης του **μικροελεγκτή** ESP, της Espressif, η οποία επιτρέπει την απευθείας επικοινωνία μεταξύ των ESP μικροελεγκτών, χωρίς την απαραίτητη χρήση router ή internet. Χρησιμοποιεί το Wi-Fi hardware της συσκευής, αλλά δεν απαιτεί σύνδεση σε access point. Τα δεδομένα στέλνονται σε MAC διευθύνσεις, επιτρέποντας χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.

Στο παρόν **σύστημα**, ο **πομπό**ς με την βοήθεια χρήσης του πρωτοκόλλου ESP-NOW , μετά την επιτυχής ζεύξη του με τον , στέλνει τα πακέτα αλλαγής κατάστασης τα οποία λαμβάνει από τον αισθητήρα. Η δομή των πακέτων αυτών είναι απλουστευμένη, για την ευκολία του προγραμματιστή αλλά και την λίγη επεξεργαστική ισχύ, με ένα πεδίο που αντιπροσωπεύει την κατάσταση κίνησης μετατρέποντας τη σε λογικό 0 ή λογικό 1.

**2.3 Λήψη δεδομένων, Επεξεργασία και χρήση MQTT μέσω του (Receiver)**

Στην ΥΠΟ ενότητα αυτή θα αναφερθούμε για την συνεισφορά αλλά και την λειτουργεία του **ESP32** ο οποίος έχει αναλάβει τον βασικότερο ρόλο στην υλοποίηση του κυκλώματος αυτού. Βασική του λειτουργία αποτελεί η εμπιστευμένη αποδοχή των δεδομένων, για αυτό και ονομάστηκε ς, με σκοπό : την «τοπική αντίδραση» και την μεταφορά δεδομένων δεδομένων στον τοπικό server.

Με τον όρο τοπική αντίδραση αναφερόμαστε στα περιφερειακά αισθητήρια που χρησιμοποιούνται για την άμεση απεικόνιση αλλαγής κατάστασης των αισθητηρίων ελέγχου. Στο παρόν **σύστημα** χρησιμοποιήθηκαν, όπως και προαναφέρθηκαν, ένας βομβητής (buzzer) και μία OLED οθόνη, τα οποία κάνουν trigger κατά την θετική αλλαγή (δηλαδή όταν τα αισθητήρια διαβάζουν λογικό 1).

Η μεταφορά στο **σύστημα** παρακολούθησης Home Assistant επιτυγχάνεται με τη πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT. Χρησιμοποιώντας το ο ς δημοσιεύει τα συμβάντα, όπως π.χ. home/sensor/motion το οποίο αναφέρεται στο αισθητήριο PIR, στον MQTT broker, ο οποίος λειτουργεί σαν διαμεσολαβητής για τη μεταφορά των δεδομένων στο Home Assistant.

Η συνδεσιμότητα με Wi-Fi παραμένει ενεργή παράλληλα με την ESP-NOW λειτουργία, χάρη στο dual-mode Wi-Fi capability του **ESP32**. Αυτό επιτρέπει στο **σύστημα** να είναι συγχρόνως συνδεδεμένο σε access point και να ανταλλάσσει πακέτα ESP-NOW.

**2.4 Η Ροή των Δεδομένω**ν

Η ροή της πληροφορίας στο παρόν **σύστημα** ακολουθεί μια καθορισμένη πορεία, ξεκινώντας από την ανίχνευση εξωτερικών συμβάντων στον χώρο, στον transmitter και καταλήγοντας στην τελική απεικόνιση και επεξεργασία στο περιβάλλον του Home Assistant. Όταν υπάρξει μεταβολή στην κατάσταση ενός από τους αισθητήρες του πομπού **ESP32**, είτε τελικά θα πρόκειται για ανίχνευση κίνησης μέσω του αισθητήριου PIR, είτε για την παύση αίσθησης του φωτός laser ο οποίος καταλήγει στον αισθητήρα φωτός. Το **σύστημα** προχωρά άμεσα στην αποστολή μιας κωδικοποιημένης πληροφορίας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Αυτή η πληροφορία μεταδίδεται μέσω του πρωτοκόλλου ESP-NOW απευθείας στον (receiver), χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσης υποδομής κάποιου router ή διαδίκτυού Wifi.

Μόλις ο ς λάβει το πακέτο δεδομένων, προχωρά πρώτα σε μια τοπική επεξεργασία. Ανάλογα με την κατάσταση που έχει εκλάβει (π.χ. κατά την ανίχνευση κάποιας κίνησης ή απώλεια φωτός), ενεργοποιεί τον βομβητή (buzzer) του συστήματος, ώστε να παραχθεί άμεση ηχητική ειδοποίηση. Στη συνέχεια ενημερώνει την OLED οθόνη με σχετικό μήνυμα για οπτική επιβεβαίωση από τον χρήστη αλλά και για τον προγραμματιστή για λόγους debugging. Αυτό το επίπεδο άμεσης απόκρισης ενισχύει τη λειτουργική αυτονομία του συστήματος, χωρίς την ανάγκη εξωτερικής παρεμβολής.

Παράλληλα με την τοπική απόκριση, ο ς **ESP32** φροντίζει να μεταφέρει άμεσα την πληροφορία στο **σύστημα** αυτοματισμού, στέλνοντας την κατάσταση σε αντίστοιχα MQTT topics. Τα μηνύματα αποστέλλονται σε MQTT broker που φιλοξενείται σε τοπικό δίκτυο (συχνά σε Raspberry Pi ή στην προκείμενη περίπτωση τοπικό server), επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση στον Home Assistant. Εκεί, τα δεδομένα μπορούν είτε να εμφανιστούν σε πραγματικό χρόνο στο περιβάλλον χρήστη είτε να χρησιμοποιηθούν για ενεργοποίηση σεναρίων αυτοματισμού (όπως ενεργοποίηση κάμερας, αποστολή ειδοποίησης, κ.λπ.).

Αυτό το μοντέλο ροής εξασφαλίζει αξιόπιστη και αποδοτική διαχείριση των συμβάντων, καθώς η επικοινωνία μέσω ESP-NOW διασφαλίζει γρήγορη και ενεργειακά αποδοτική μεταφορά πληροφορίας, ενώ το MQTT προσφέρει ευελιξία και επεκτασιμότητα στη διαχείριση της πληροφορίας σε ανώτερα επίπεδα λογισμικού. Το γεγονός ότι ο **ESP32** υποστηρίζει ταυτόχρονα ESP-NOW και σύνδεση Wi-Fi καθιστά δυνατή αυτή τη διπλή λειτουργικότητα, χωρίς συμβιβασμούς στη σταθερότητα ή τη συνέπεια της σύνδεσης.

**2.5 Αισθητήρες Ειδοποίησης**

Στο ορθά αυτό επιτηδευμένο **σύστημα** οι λειτουργία ενημέρωσης παραβίασης του χώρου αποτελείται από 2 διαφορετικά κομμάτια: την ειδοποίηση του χρήστη μέσω ήχου και οπτικού μέσου απευθείας μετάδοσης και την απομακρυσμένη ενημέρωση η οποία εμφανίζεται στον τοπικό server και UI Hub Home Assistant. Στο κεφάλαιο αυτό θα μιλήσουμε για την χρήση των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την άμεση ειδοποίηση του χρήστη. Οι αισθητήρες αυτοί ενισχύουν την χρηστικότητα και την αλληλεπίδραση με τον χρήστη αυξάνοντας έτσι την συνολική αποδοτικότητα αλλά και αξιοπιστία του συστήματος. Οι επιλογές των αισθητήρων αυτών έγιναν με γνώμονα την αρμονική σύζευξη και λειτουργία με τον **μικροελεγκτή** **ESP32**, αξιοποιώντας έτσι πλήρως τις δυνατότητες του.

Αρχικά θα ανέρθουμε για την άμεση οπτική επαφή του συστήματος αυτού, την οποία επιτυγχάνουμε επιτυχώς με την χρήση μιας OLED οθόνης τύπου SSD1306 0.96 ιντσών. Η οθόνη αυτή στο project το οποίο υλοποιήσαμε βρίσκεται επάνω στον **μικροελεγκτή** **ESP32** (receiver) εμφανίζοντας έτσι σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες όπως την ανίχνευση φωτεινότητας, την αλλαγή κατάστασης του αισθητήρα φωτός σε συνδυασμό με τον laser pointer , αλλά και τις ενδείξεις της τοπικής σύνδεσης (π.χ. αν είναι επιτυχής η σύζευξη με τον **μικροελεγκτή** **ESP32** μέσω του ESP-NOW εμφανίζεται το κατάλληλο μήνυμα επιτυχίας ή λάθους, όπως και κατά την σύζευξη με το Wifi και το πρωτόκολλο MQTT γίνεται η άμεση απεικόνιση μηνύματος σφάλματος και αντίστοιχα επιτυχίας). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια οπτική επαφή με τον χρήστη καθιστώντας τον σίγουρο για την κατάσταση επεξεργασίας στην οποία βρίσκεται ο **μικροελεγκτής** κάθε στιγμή. Η οθόνη που επιλέχθηκε για την υλοποίηση αυτή έγινε με βάση την χαμηλή της κατανάλωση αλλά και τη βολικότατα λόγο του ότι βρισκόταν ενσωματωμένη στον **μικροελεγκτή** (receiver) **ESP32**. Ο πληθώρα των βιβλιοθηκών προς χρήση για τον αισθητήρα αυτό είναι μεγάλη και ανοιχτή προς κάθε χρήστη και προγραμματιστή. Για μελλοντικές χρήσης, προς όσους χρήστες επιθυμούν να υλοποιήσουν το παραπάνω κύκλωμα προτείνουμε μια εξωτερική οθόνη OLED 1.3 ίντσες 128χ64. Η οθόνη αυτή είναι υπερβολικά αρκετή για το **σύστημα** αυτό καθώς μοιράζεται τις ίδιες και πολλές ακόμα βιβλιοθήκες για την σύζευξη της με τον **μικροελεγκτή** **ESP32** , αλλά και για την διατήρηση χαμηλού κόστους ενέργειας που διατηρεί.

Προκειμένου να κρατήσουμε το εταιρικό μοτίβο των home security systems αποφασίσαμε να προσθέσουμε έναν τρόπο αναπαραγωγής ήχου για την ειδοποίηση παραβίασης του χώρου, η οποία δεν εξυπηρετεί μόνο τον χρήστη και όσους βρίσκονται στον χώρο, αλλά και τον εισβολέα καθώς με την ηχητική ειδοποίηση καταλαβαίνει ότι γίνεται αντιληπτός και συνήθως αποχωρεί από τον χώρο αυτό. Για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιήθηκε ένα buzzer, ή αλλιώς όπως έχει προ αναφερθεί βομβητής, επιτρέποντας έτσι την ηχητική ειδοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει άμεση πρόσβαση στον Home Assistant ή όταν απαιτείται ενστικτώδης ανθρώπινη αντίδραση.

**2.6 Αρχιτεκτονική του Συστήματος και Διάγραμμα Ροής**

Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται σε μια διακριτή λογική ανάμεσα σε δύο κόμβους (nodes) : έναν **πομπό** (transmitter node) και έναν (receiver node). Με τον όρο κόμβο αναφερόμαστε στο data structure τα οποία είναι πάντως τύπου, και έχουν τελικό σημείο αποστολής σε έναν διαφορετικό κόμβο. Το μοτίβο αυτό χρησιμοποιείται στην υλοποίηση αυτή με την χρήση του **μικροελεγκτή** **ESP32** και την άμεση επικοινωνία ESP-NOW, όπου με την βοήθεια της επιτυγχάνεται η μεταφορά, ή αλλιώς το point, των δεδομένων. Η πλήρης χρήση του **ESP32** βοηθάει παρέχοντας στο **σύστημα** ισχυρή επεξεργαστική ισχύ, ασύρματη επικοινωνία και δυνατότητα διαχείρισης πολλαπλών εισόδων και εξόδων. Λόγο των παραπάνω προτερημάτων το **σύστημα** αυτό καθίσταται κατάλληλο για IoT εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Στο κομμάτι αυτό θα γίνει η ανάλυση του πομπού. Η χρήση του πομπού στο συγκεκριμένο **σύστημα** ασφαλείας είναι η συλλογή εξωτερικών ερεθισμών από τους αισθητήρες. Αυτή η ανίχνευση γίνεται με την χρήση του αισθητήρα PIR. Κατά την ανίχνευση κάποιας παρουσίας στον χώρο, δημιουργείται ένα πακέτο δεδομένων το οποίο αποστέλνεται ασύρματα προς τον (receiver) **ESP32** με την χρήση ESP-NOW, ενός lightweight και αποδοτικού πρωτοκόλλου επικοινωνίας peer-to-peer που υποστηρίζεται από το chip του **μικροελεγκτή**. Η χρήση του παραπάνω πρωτοκόλλου εξασφαλίζει χαμηλή καθυστέρηση αλλά και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Η συνεισφορά του στο κύκλωμα αυτό είναι υψίστης σημασίας. Καθώς αποτελείται από τον **μικροελεγκτή** **ESP32** και έχει μεγάλη και γρήγορη επεξεργαστική ισχύ, διασφαλίζεται η ταυτόχρονη επεξεργασία δεδομένων. Ο ς διαθέτη τον αισθητήρα φωτός, οποίος κατά την αλλαγή της κατάστασης του δημιουργεί πακέτο επικοινωνίας με την ανάλογη κατάσταση του. Η «δουλειά» του δεν αποτελεί όμως μόνο αυτόν της συλλογής πληροφοριών, αλλά και την μεταφοράς των πακέτων προς τον τοπικό server αλλά και την ενημέρωση των οπτικών και ηχητικών αισθητήρων ενημέρωσης του χρήστη. Ο ς αποτελεί κομβικό σημείο καθώς μέσω του ESP-NOW πρωτοκόλλου δέχεται τα πακέτα κατάστασης του PIR, και στη συνέχεια μέσω του Low Powe Wifi μεταφέρει τα πακέτα στο Home Assistant ενημερώνοντας έτσι την κατάσταση στο dashboard.

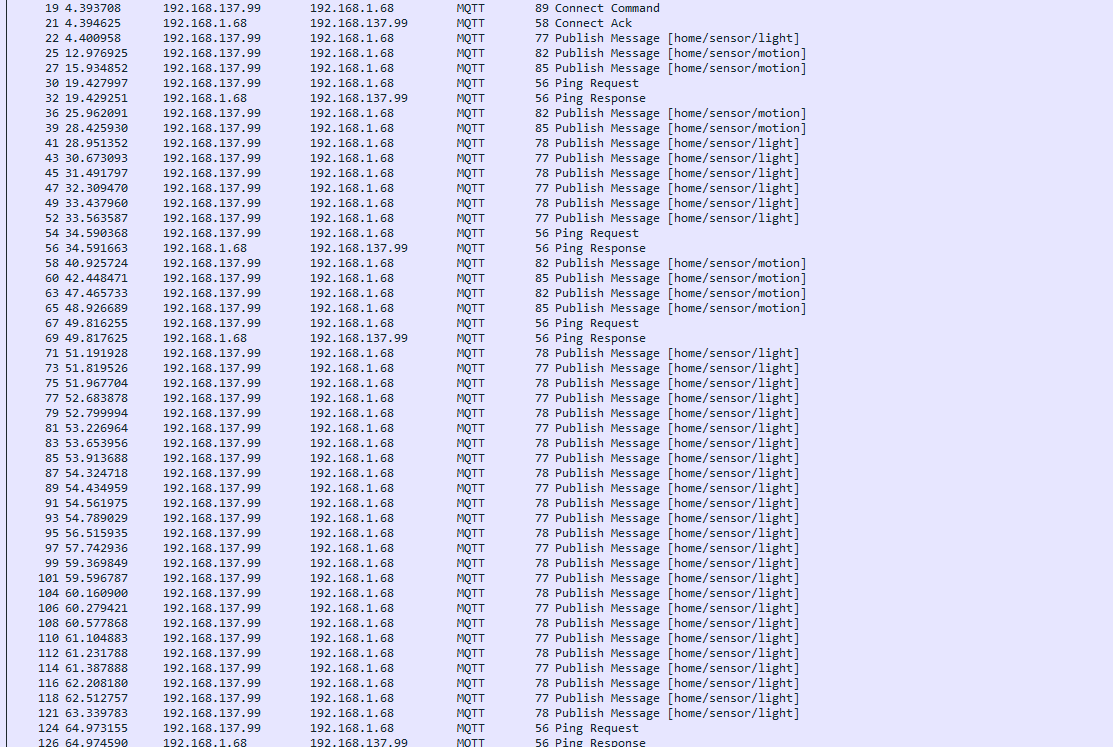
Η Αρχιτεκτονική του συστήματος αυτού υποστηρίζει τον διαχωρισμό των λειτουργιών και την απομόνωση των σφαλμάτων καθιστώντας το έτσι βολικό προς κάποιος προγραμματιστή ο οποίος θα το επιλέξει για να το επεκτείνει μελλοντικά καθώς καθίσταται ιδανικό προς ενσωμάτωση περισσότερων αισθητήρων και ΥΠΟ μονάδων. Όλα τα συστήματα έχουν δομηθεί έτσι ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα αλλά ταυτόχρονα και συνεργατικά επιτρέποντας έτσι την τοπική αλλά και την απομακρυσμένη αντίδραση.

# Enabling communication

Η υλοποίηση του παραπάνω συστήματος βασίζεται σε δύο βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας: Το πρωτόκολλο MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) και την λειτουργία του **ESP32** χαμηλής κατανάλωσης Light Sleep Mode , με τις οποίες βασίστηκε η επίτευξη των στόχων του project αυτού. Η ταυτόχρονη συνεργασία των δύο πρωτοκόλλων αυτών προσφέρει αξιοπιστία αλλά και υψηλή ταχύτητα στη μετάδοση των δεδομένων. Αξιοσημείωτη φυσικά πρέπει να παραμείνει και η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος η οποία είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη αυτόνομων εφαρμογών IoT.

To MQTT αποτελεί ένα πρωτόκολλο δημοσίευσης- εγγραφής, σχεδιασμένο για περιβάλλοντα με περιορισμένη πρόσβαση, υψηλή καθυστέρηση ή ανταπόκριση και ασταθή διαθεσιμότητα. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται για την ασύρματη αποστολή δεδομένων των αισθητηρίων, από τον **ESP32** προς τον τοπικό server Home Assistant μέσω του τοπικού broker. Καθώς υπάρχει η υποστήριξη QoS (Quality of Service) καθιστά το πρωτόκολλο αυτό αξιόπιστο και κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου με αυστηρές απαιτήσεις.

Παράλληλα, η λειτουργία Light Sleep Mode του **ESP32** , επιτρέπει την προσωρινή αναστολή της κύριας λειτουργίας του **μικροελεγκτή**, διατηρώντας ενεργά τα βασικά υποσυστήματα , όπως π.χ. η σύνδεση στο Wifi και τα wake up triggers. Με τον τρόπο αυτό η συσκευή μειώνει δραστικά την κατανάλωση ενέργειας σε ένα πολύ ικανοποιητικό σημείο, καθώς μπαίνει σε μια κατάσταση στην οποία «κοιμάται», δηλαδή σε μια κατάσταση μη αδράνειας, χωρίς όμως να χάνεται η δυνατότητα αφύπνισης από εξωτερικά ερεθίσματα, με την βοήθεια φυσικά των αισθητήρων. Η δυνατότητα αυτή είναι καθοριστική για το παρόν **σύστημα** συνεχούς επιτήρησης.  
  
Η συνδυαστική χρήση των MQTT και Light Sleep Mode επιτρέπει την κατασκευή ενός δικτυακά ενεργού αλλά ενεργειακά αποδοτικού συστήματος, συμβατού με τα πρότυπα λειτουργίας του σύγχρονου IoT. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των πακέτων.  
  
  
  
  
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη ροή δεδομένων και την ανταλλαγή πακέτων επικοινωνίας ανάμεσα στο **μικροελεγκτή** ESP και το **σύστημα** αυτοματισμού Home Assistant, μέσω του πρωτοκόλλου MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Η καταγραφή της επικοινωνίας έχει πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια του προγράμματος Wireshark, το οποίο μας επιτρέπει να αναλύσουμε σε βάθος τα πακέτα που διακινούνται στο δίκτυο. Σύμφωνα με την καταγραφή, η διεύθυνση IP του ESP είναι 192.168.137.99, ενώ η IP διεύθυνση του Home Assistant είναι 192.168.1.68.



Ξεκινώντας από το πακέτο με αριθμό 19, διαπιστώνουμε ότι το ESP στέλνει στο Home Assistant την εντολή Connect Command, η οποία σηματοδοτεί την πρόθεση του ESP να ξεκινήσει τη διαδικασία σύνδεσης με τον MQTT broker που φιλοξενείται στον server του Home Assistant. Η αποστολή αυτής της εντολής αποτελεί το πρώτο βήμα της διαδικασίας διαπραγμάτευσης για τη δημιουργία μίας ενεργής και αξιόπιστης σύνδεσης.

Σε συνέχεια αυτής της ενέργειας, το Home Assistant ανταποκρίνεται με την αποστολή του πακέτου Connect Acknowledge, το οποίο λαμβάνεται επιτυχώς από το ESP. Με τη λήψη του συγκεκριμένου πακέτου επιβεβαίωσης, η σύνδεση μεταξύ των δύο συσκευών έχει πλέον εδραιωθεί, και το ESP είναι συνδεδεμένο στον MQTT broker, έτοιμο τόσο να αποστέλλει όσο και να λαμβάνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Από αυτό το σημείο και έπειτα, το ESP μπορεί να λειτουργήσει είτε ως publisher είτε ως subscriber σε θέματα (topics) του MQTT πρωτοκόλλου. Για παράδειγμα, στο πακέτο με αριθμό 22, παρατηρούμε την πρώτη αποστολή πληροφορίας από μία συνδεδεμένη διάταξη αισθητήρα — συγκεκριμένα, από έναν αισθητήρα λέιζερ. Το σχετικό MQTT θέμα (topic) είναι home/sensor/light, και το μήνυμα που μεταδίδεται είναι sensor/lighton, το οποίο δηλώνει ότι η ακτίνα λέιζερ χτυπά κανονικά έναν φωτοαισθητήρα και δεν έχει διακοπεί. Εάν η ακτίνα του λέιζερ είχε διακοπεί, τότε το αντίστοιχο μήνυμα θα ήταν sensor/lightoff.

Αντίστοιχα, στο πακέτο με αριθμό 25, καταγράφεται μια δεύτερη αναφορά κατάστασης, αυτή τη φορά από έναν αισθητήρα ανίχνευσης κίνησης. Το μήνυμα που αποστέλλεται στο MQTT topic home/sensor/motion είναι sensor/motionoff, το οποίο δηλώνει ότι δεν ανιχνεύεται καμία κίνηση στο περιβάλλον. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί οποιαδήποτε κίνηση, το μήνυμα θα αλλάξει σε sensor/motionon, ενημερώνοντας έτσι τον Home Assistant για την παρουσία κίνησης.

Προχωρώντας στο πακέτο με αριθμό 30, παρατηρούμε ότι το ESP στέλνει ένα Ping Request, δηλαδή ένα αίτημα επιβεβαίωσης σύνδεσης προς τον MQTT broker. Η αποστολή αυτού του πακέτου έχει ως σκοπό να διασφαλίσει ότι η σύνδεση παραμένει ενεργή και λειτουργική, καθώς το ESP λειτουργεί σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας (power-saving mode), γεγονός που απαιτεί περιοδικούς ελέγχους της σύνδεσης για την αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης.

Τέλος, στο πακέτο 32, το Home Assistant απαντά στο προηγούμενο αίτημα με ένα Ping Response, το οποίο επιβεβαιώνει την επιτυχή λήψη του ping και πιστοποιεί ότι η σύνδεση παραμένει υγιής και ενεργή. Η ανταλλαγή αυτών των πακέτων ελέγχου είναι κρίσιμη σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών χαμηλής ισχύος και του κεντρικού συστήματος.

Συνοψίζοντας, η παραπάνω ανάλυση πακέτων αποδεικνύει την ορθή λειτουργία της επικοινωνίας μεταξύ του ESP και του Home Assistant, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο MQTT, επιτρέποντας την αξιόπιστη αποστολή και λήψη δεδομένων από αισθητήρες που συμμετέχουν στο **σύστημα** αυτοματισμού.

# Παρομοιεσ εφαρμογεσ και η συγκριση μευαξυ αυτησ

* 1. **Παρόμοιες εφαρμογές/λύσεις**

Σε ένα κόσμο συνεχούς εξέλιξης η ανάγκες των ανθρώπων αυξάνονται βαθμιαία. Η τεχνολογική εξέλιξη, αν την βλέπαμε σε ένα γράφημα εξέλιξης προς χρόνο, θα βλέπαμε πλέον ξεκάθαρα πως η καμπύλη της είναι πλέον μόνιμα ανοδική. Με την εξέλιξη αυτή προέρχονται και πολλές λύσεις πάνω σε πολλά προβλήματα της ανθρωπότητας, όπως μια πιο εύκολη οπτική επαφή , αλλά και ανάγκη για πιο σύγχρονα και έξυπνα συστήματα. Στον χώρο της ασφάλειας, η υιοθέτηση «έξυπνων ενσωματωμένων» λύσεων αποτελεί πλέον βασικό χαρακτηριστικό, τόσο σε εμπορικά προϊόντα, όσο και σε ερευνητικές εφαρμογές.

Στην σύγχρονη αγορά βλέπουμε μια μεγάλη ποικιλία από πολλά προϊόντα του ίδιου είδους, τα οποία τελικά καταλήγουν να είναι τόσο διαφορετικά. Πολύ τρανά παραδείγματα αποτελούν τα συστήματα ασφαλείας της Xiaomi. Πιο συγκεκριμένα, το **σύστημα** της Xiaomi Mi Smart Sensor Set, συνδυάζει μια ποικιλία από αισθητήρες κίνησης, μαγνητικές επαφές για πόρτες και παράθυρα και gateaway επικοινωνίας μέσω ZigBee, επιτρέποντας έτσι την απευθείας ενσωμάτωση με το cloud service του, το Mi Home. Αντίστοιχα το Ring Alarm System, της Amazon, προσφέρει παρόμοιους αισθητήρες με κάμερες και σύνδεση στο cloud service τους με μεσολαβητή την Alexa. Και οι δύο εφαρμογές αποτελούν ολοκληρωμένα συστήματα ασφαλείας. Ωστόσο μετά την αγορά τος, προκειμένου να λειτουργούν ορθά και με πλήρη λειτουργικότητα, απαιτείται η αγορά παραπάνω εξαρτημάτων, πέραν του πακέτου των αισθητήρων, και την μηνιαία αγορά συνδρομής.

Από την άλλη πλευρά, το ερευνητικό επίπεδο, πολλές πανεπιστήμια, όπως και ερευνητικά κέντρα, προτείνουν λύσεις βασισμένες στις πλατφόρμες ανάπτυξης σειρά ESP και Arduino (κυρίως mega), οι οποίες δίνουν έμφαση του ανοιχτού κώδικα (open source), τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και την τοπική επεξεργασία δεδομένων (edge computing). Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρατηρούμε σε διάφορα κοινωνικά σημεία αλλά και στρώματα της κοινωνίας μας, όπως σε έξυπνες φάρμες, έξυπνα σπίτια και αυτόνομα συστήματα. Τα παρόν συστήματα αξιοποιούν με την χρήση του **μικροελεγκτή** **ESP32**, MQTT και άλλες lightweight τεχνολογίες για επικοινωνία χωρίς μεγάλο ενεργειακό κόστος. Οι λύσεις αυτές συχνά παρουσιάζονται σε πολλά ανεξάρτητα επιστημονικά συνέδριά, αλλά και δημοσιεύσεις IEEE, προσφέροντας έτσι ένα ευρύ πλάνο για μελλοντική ανάπτυξη.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των εμπορικών και τον ερευνητικών υλοποιήσεων βρίσκεται στα βάθη της φιλοσοφίας των δημιουργών τους. Τα εμπορικά πακέτα φύλαξης, στοχεύουν σε χρήστες με ελάχιστες τεχνικές γνώσης και υλοποίησης. Αντίθετα, οι ερευνητικές ανοιχτές λύσεις, όπως αυτή που πραγματεύεται τον παρόν κείμενο, δίνουν έμφαση στη παραμετροποίηση, την αποπολληπλοκότητα και την τεχνολογική επεκτασιμότητα.

* 1. **Συγκριτική Ανάλυση**

Στο πλαίσιο ανάπτυξης σύγχρονων εφαρμογών IoT (Διαδικτύου των Πραγμάτων), η συγκριτική αξιολόγηση με ήδη υλοποιημένες λύσεις αποτελεί βασικό βήμα για την ουσιώδες αξιολόγηση και αποδοτικότητα ενός συστήματος. Η συνεχής ανάπτυξη, εμπορικών αλλά ερευνητικών λύσεων , καθιστά πλέον απαραίτητη την συστηματική ανάπτυξη μεθόδων σύγκρισης. Βασικά κριτήρια : η ενεργειακή κατανάλωση, η αξιοπιστία μετάδοσης, η χρόνος απόκρισης του εκάστοτε συστήματος και η ευκολία υλοποίησης με βάση το συνολικό κόστος.

Η παρόν υλοποίηση και ανάπτυξη επάνω στον **μικροελεγκτή** **ESP32**, σε συνδυασμό με τα δύο πρωτόκολλα επικοινωνίας ESP-NOW και MQTT, επιτυγχάνεται η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κυρίως με την βοήθεια την ενσωματώσεως της λειτουργίας του **ESP32** , light sleep mode. Αντιθέτως, οι περισσότερες εμπορικές «λύσεις» βασίζονται σε συνεχείς και υψηλή κατανάλωση ενέργειας, χωρίς να έχουν ενσωματώσει κάποιο τρόπο εξοικονόμηση της. Τέλος οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται σε συνεχή απαίτηση μόνιμης επικοινωνίας με τον εκάστοτε διακοσμητή αυξάνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος.

Σε επίπεδο αξιόπιστης μετάδοσης, αλλά και προστασίας του, το πρωτόκολλο επικοινωνίας ESP-NOW λειτουργεί σταθερά σε τοπικά περιβάλλοντα χωρίς την απαίτηση κάποιου router ή cloud, προσφέροντας έτσι χαμηλό latency και άμεση επικοινωνία μεταξύ των nodes. Αντιθέτως, τα εμπορικά συστήματα είναι επιρρεπή σε καθυστερήσεις και αποτυχίες σύνδεσης καθώς εξαρτώνται από την πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Ένα σημαντικό κομμάτι το οποίο ενδιαφέρει τον χρήστη, αλλά και τον κατασκευαστή, αποτελεί ο χρόνος απόκρισης. Η παρούσα υλοποίηση καταφέρνει να ανταποκρίνεται εντός ελαχίστων χιλιοστών του δευτερολέπτου κατά την μεταβολή των αισθητήρων. Αυτό επιτυγχάνεται λόγο της μεγάλης επεξεργαστικής ισχύς του **μικροελεγκτή**. Ο έλεγχος εισόδων και η αποστολή στις εξόδους γίνονται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα ενώ ταυτόχρονα αναλαμβάνει και την αποπολληπλοκότητα του κώδικα. Συγκριτικά, εμπορικές λύσεις που χρησιμοποιούν μεσάζοντα και απαιτούν διαδίκτυο (του οποίου η ταχύτητα παίζει σοβαρό λόγο) για να αποστέλλουν δεδομένα σε κάποιον εξωτερικό server, παρουσιάζουν αυξανόμενους χρόνους απόκρισης, ειδικά σε συνθήκες υψηλού φορτίου.

Τέλος, ο μεγαλύτερος παράγοντας για έναν καταναλωτή δεν είναι άλλος από το κόστος. Στις εμπορικές λύσεις , διατίθεται ένα «έτοιμο», στημένο πακέτο, το οποίο όμως το κοστολόγιο του είναι υψηλό, όχι μόνο κατά την αγορά του, αλλά και για την συντήρηση του, καθώς συνήθως απαιτεί και κάποια μηνιαία συνδρομή. Από την άλλη το παρόν **σύστημα** είναι ευέλικτο προς κάθε νοικοκυριό. Ο κάθε χρήστης μπορεί να επιλέξει την ποσότητα των αισθητήρων και τον οργάνων αναγνωρίσεις ανάλογα με το κόστος για το οποίο είναι διατεθειμένος να καταβάλει. Τέλος η ανοιχτή φύση του λογισμικού που χρησιμοποιεί αποτρέπει μια πλήρη παραμετροποίηση και επέκταση χωρίς την ανάγκη κάποιας επιπλέον συνδρομής.

Εν κατακλείδι, το πόρισμα των παραπάνω προτάσεων είναι πως η υλοποίηση αυτή αποτελεί την λύση στα υψηλά κόστη, την υψηλή κατανάλωση ενέργειας, την αξιοπιστία επικοινωνίας αλλά και το μηνιαίο κόστος. Τα παραπάνω καταναλωτικά προβλήματα «λύνονται» με την εφαρμογή του συστήματος που πραγματεύεται το έγγραφο αυτό.

* 1. **Επιλογή Και Προσέγγιση**

Προκειμένου να αναπτύξουμε ένα αυτόματο, αλλά και έξυπνο **σύστημα** αυτοματισμού ασφαλείας βασισμένο στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), μετρήθηκαν και αξιολογήθηκαν εναλλακτικές λύσεις, τόσο εμπορικές, όσο και ερευνητικές. Η τελική επιλογή των χαρακτηριστικών και τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν με βάση πρακτικά κριτήρια όπως : η ενεργειακή απόδοση, η λειτουργικότητα σε πραγματικό χρόνο και η δυνατότητα ανεξάρτητης λειτουργίας χωρίς την απαίτηση κάποιας συνδρομής για χρήση cloud.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ κύριων τεχνολογιών σε σχέση με την προτεινόμενη προσέγγιση και τις εναλλακτικές τις λύσεις

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Κριτήριο Σύγκρισης | Υλοποίηση με **ESP32** | Εμπορικές Υλοποιήσεις  Χρήσεις Cloud | LoRa- based IoT **Σύστημα** |
| Ενεργειακή Κατανάλωση | Πολύ χαμηλή με Light Sleep Mode | Υψηλή λόγο μόνιμης ανατροφοδότησης | Πολύ χαμηλή, σχεδιασμένο για αυτονομία |
| Τύποι αισθητήρων | Αναλογικοί αισθητήρες | Πολλά είδη | Περιορισμένοι αναλογική για απομακρυσμένη χρήση |
| Συχνότητα Δειγματοληψίας | Άμεση αντίδραση,  <10ms | 1-5sec | 10-50sec (λόγο duty cycle) |
| Επεξεργασία | Edge Processing | Cloud-centric | Συνδυασμός edge + getaway |
| Ανάγκη για Internet για λειτουργία | Δεν είναι απαραίτητη | Ναι, είναι βασικό | Όχι |
| Καθυστέρηση | Πολύ χαμηλή (<50ms) | Υψηλή (>=200ms) | Μέτρια, λόγο duty cycle |
| Πολυπλοκότητα | Βασικές γνώσης κώδικα | Εύκολη (Plug & Play) | Υψηλό, απαιτεί γνώσεις |
| Κόστος Υλοποίησης | Πολύ χαμηλό | Υψηλό | Μέτριο, ανάλογα την προέλευσή |

**Ανάλυση των Κριτηρίων**

1. Ενεργειακή κατανάλωση: εν λόγο **μικροελεγκτή**ς , **ESP32**, με την δυνατότητα χρήση του Light Sleep Mode, καταστέλλοντας έτσι τις βασικές του λειτουργίες, επιτρέπει την εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας όταν το **σύστημα** παραμένει ανενεργό. Αυτό το πλεονέκτημα είναι κρίσιμο για συσκευές οι οποίες βασίζονται με τη λειτουργία κάποιας μπαταρίας χωρίς επίβλεψη.
2. Τύποι αισθητήρων: Η χρήση των αισθητήρων που έχουν εφαρμοστεί στο παρόν **σύστημα** όπως ο PIR σε συνδυασμό με την αισθητήρα φωτός, είναι ικανοί να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες ασφαλείας για ανίχνευση εισβολών από μία είσοδο ή έναν κεντρικό χώρο. O **ESP32** προσφέρει πλήρης υποστήριξη για τέτοιου είδους εισόδων χωρίς επιπλέον υλικό.
3. Τοπικό vs Cloud: Η προτεινόμενη λύσει λειτουργεί αποκλειστικά τοπικά, χωρίς να απαιτεί την μόνιμη σύνδεση στο διαδίκτυο. Το συγκεκριμένο μοντέλο προάγει την αυτονομία και την αξιοπιστία καθώς δεν εξαρτάται από την σύνδεση σε απομακρυσμένους server.
4. Πολυπλοκότητα υλοποίησης: Αν και η παρούσα υλοποίηση απαιτεί βασικές γνώσεις μικροελεγκτών και βασικού προγραμματισμού C, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και έλεγχο σε σχέση με τις εμπορικές, κλειστού κώδικα, εφαρμογές.
5. Ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο: Η επικοινωνία ESP-NOW, σε συνδυασμό με την τοπική ανάλυση σήματος του **μικροελεγκτή**, εξασφαλίζει την άμεση αντίδραση από τις εξωτερικές αλλαγές. Σε αντίθεση, οι cloud-based εφαρμογές παρουσιάζουν υψηλή, συγκριτικά με τον **ESP32**, καθυστέρηση λόγω δικτύου και του server-side λογισμικού.

# Επικοινωνιακές Προκλήσεις

Η ανάπτυξη ενός ομοιόμορφου, κατανεμημένα, συστήματος IoT, όπως αυτό το οποίο παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, απαιτεί άμεση αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους κόμβων (nodes). Η επιλογή του πρωτοκόλλου ESP-NOW για μια τοπική επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων και του κεντρικού κόμβου, σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT για τη μεταφορά των δεδομένων τους στον τοπικό server Home Assistant μέσω Wifi, συχνά επιφέρουν μια ποικιλία από διάφορες επικοινωνιακές προκλήσεις.

* 1. **ESP-NOW σε Περιβάλλον με Παρεμβολές**

Το πρωτόκολλο ESP-NOW αναπτύχθηκε από την εταιρία Espressif με σκοπό να την ανταλλαγή μικρού όγκου δεδομένων μεταξύ της σειράς μικροελεγκτών ESP (**ESP32** και ESP8266) συσκευών χωρίς την αναγκαία σύνδεση σε κάποιο access point. Ωστόσο το παρόν πρωτόκολλο λειτουργεί στα 2.4GHz, η οποία ζώνη λειτουργίας τείνει σε κάποιες περιπτώσεις να είναι επιρρεπής σε παρεμβολές από άλλες ασύρματες τεχνολογίες όπως Wifi και Bluetooth.

Σε περιβάλλοντά, κυρίως πόλεων, με υψηλή πυκνότητα ασύρματων συσκευών το πρωτόκολλο ESP-NOW μπορεί να επηρεαστεί, οδηγώντας σε απώλεια πακέτων ή καθυστερήσεις. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά προτείνουμε κάποιες λύσεις για να αποφύγουμε τα παραπάνω προβλήματα. Με την χρήση watchdog timers, οποίοι προστίθενται προγραμματιστικά και κυκλωματικά, προκείμενου να ανιχνεύουν την διακοπή του συστήματος και να την επαναφέρουν. Επίσης προτείνεται η χρήση ενός σταθερού καναλιού λειτουργίας που «αποφεύγει» τα πιο πολυσύχναστα Wi-Fi\_\_\_33 κανάλια.

**5.2 Χειρισμός real-time και Καθυστέρηση**

Το παρόν **σύστημα** έχει σχεδιαστεί να μεταφέρει δεδομένων σε πραγματικό χρόνο προς το Home Assistant. Καθώς, δεδομένου ότι, αποδοτικότητα του ESP-NOW είναι γρήγορη και αποδοτική για χρήση τοπικής μετάδοσης, η μετάδοση στο Wifi και στη συνέχεια στο MQTT broker εισάγει καθυστέρηση. Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί στην αναμονή σύνδεσης στο Wifi, όταν ο κόμβος (node) βρίσκεται σε light sleep mode και «ξυπνά». Ωστόσο ένα κομμάτι το οποίο πρέπει να πάρουμε σαν παράμετρο είναι η μεγάλη πληροφοριακή συμφόρηση στο router προκειμένου να προσέχουμε ποιο θα χρησιμοποιήσουμε.

* 1. **Ασφάλεια Επικοινωνίας**

Η ασφάλεια της επικοινωνίας είναι κρίσιμη για την προστασία των δεδομένων. Το ESP-NOW προσφέρει βασική κρυπτογράφηση, αλλά απαιτεί χειροκίνητη διαχείριση των κλειδιών. Το MQTT χωρίς TLS είναι ευάλωτο σε επιθέσεις. Προτεινόμενές λύσεις με βάση την έρευνα που διεξάγαγέ δε θα μπορούσαν να είναι άλλες από της εξής : Μέσω του firmware να γίνεται ένα τοπικό φιλτράρισμα των MAC διευθύνσεων και επιβεβαίωση των πακέτων με CRC για την αποφυγή επαναλαμβανόμενων επιθέσεων.

Συμπερασματικά, η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και σταθερού IoT συστήματος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σωστή επιλογή και διαχείριση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου έργου, η χρήση του ESP-NOW για την τοπική μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων (nodes), σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο MQTT για την αποστολή αυτών στον τοπικό server, επέφερε μερικές τεχνικές προκλήσεις που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή τόσο από τον χρήστη, όσο και από τον προγραμματιστή.

Το ESP-NOW, παρόλο που προσφέρει ταχύτητα και ευκολία χωρίς να απαιτεί σύνδεση σε Wifi, παρουσιάζει προβλήματα σε περιβάλλοντα με αυξημένες ασύρματες παρεμβολές, όπως πολυκατοικίες ή περιοχές με πολλές συσκευές που χρησιμοποιούν wif και Bluetooth επικοινωνίες. Αυτά τα προβλήματα, όπως η απώλεια πακέτων ή οι μικρές καθυστερήσεις, μπορούν να περιοριστούν με έξυπνες αντικαταστάσεις, όπως η επιλογή σταθερού και λιγότερο φορτωμένου καναλιού, ή η προσθήκη watchdog timers για την αποφυγή «κολλημάτων».

Ταυτόχρονα, η μετάβαση των δεδομένων αυτών από τον κόμβο (node) προς το Wifi και στη συνέχεια στον MQTT broker, φέρνει καθυστερήσεις, ειδικά όταν η συσκευή «ξυπνάει» ή αλλιώς βγαίνει από sleep mode ή όταν το router είναι ήδη επιβαρυμένο από πολλαπλές εισόδου δεδομένων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ορθή διαχείριση της light sleep mode έκδοσης και η χρήση αξιόπιστου εξοπλισμού Wifi, αποτελούν βάσιμα κριτικά σημεία για τη συνολική σταθερότητα του συστήματος.

Τέλος, ο παράγοντας της ασφάλειας δεν μπορεί να αγνοηθεί. Αν και το πρωτόκολλο ESP-NOW παρέχει κάποια βασική προστασία, είναι απαραίτητο να προσθέτουμε επιπλέον μηχανισμούς, όπως έλεγχο των MAC διευθύνσεων και χρήση CRC για την επαλήθευση των πακέτων που κατέρχονται στον **μικροελεγκτή**. Όλα τα παραπάνω υποδεικνύουν πως παρά τις δυσκολίες, είναι εφικτό να χτιστεί ένα σταθερό και ασφαλές **σύστημα**, αρκεί να υπάρχουν οι κατάλληλες προβλέψεις και ρυθμίσεις από την αρχή της σχεδίασης του.

Στο επόμενο θέμα θα αναλύσουμε μερικές προτεινόμενες επεκτάσεις οι οποίες είναι «ταιριαστές» με το παρόν κύκλωμα ασφαλείας το οποίο υλοποιήσαμε. Τα πιθανός υλικά που παραθέτονται δεν είναι απαιτητικά για την χρήση του, καθώς όπως έχει προ αναφερθεί, λειτουργεί και είναι αποτελεσματικό με τα αισθητήρια που χρησιμοποιούμε στην παρούσα υλοποίηση.

# Προτεινόμενες Προσθέσεις

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εκτενής ανάλυση και προτάσεις για την επέκταση του συστήματος ασφαλείας που περιεγράφηκε προηγουμένως, αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες για μεγαλύτερη αξιοπιστία, κάλυψη και λειτουργικότητα. Η ανάλυση αυτή εστιάζει στη χρήση του πρωτοκόλλου LoRa για ασύρματη επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, την ενσωμάτωση καμερών, τη σύνδεση με υπηρεσίες cloud, αλλά και άλλες καινοτόμες δυνατότητες όπως η τεχνητή νοημοσύνη, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η ενσωμάτωση με υπάρχοντα συστήματα αυτοματισμού.

Η τεχνολογία LoRa είναι μια ασύρματη τεχνολογία επικοινωνίας που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Λειτουργεί σε συχνότητες ISM, όπως τα 868 MHz μέχρι 928MHz στην Ευρώπη, και προσφέρει εμβέλεια έως και 10 χιλιόμετρα σε αγροτικές περιοχές και περίπου 2-5 χιλιόμετρα σε αστικές περιοχές. Η χρήση της σε συστήματα ασφαλείας επιτρέπει την τοποθέτηση αισθητήρων σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως αποθήκες, αγροκτήματα ή εξοχικές κατοικίες, χωρίς την ανάγκη για καλωδίωση ή συνεχή παροχή ρεύματος, ενώ η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας εξασφαλίζει τη λειτουργία των συσκευών για μεγάλα χρονικά διαστήματα με τη χρήση μπαταριών η και ηλιακόν πάνελ .

Το Home Assistant, ως πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα για τον αυτοματισμό του σπιτιού, επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφόρων τεχνολογιών και πρωτοκόλλων. Η σύνδεση του LoRa με το Home Assistant γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου MQTT, το οποίο διευκολύνει την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ συσκευών. Για την υλοποίηση αυτής της ενσωμάτωσης απαιτείται η χρήση ενός gateway που θα λαμβάνει τα σήματα LoRa και θα τα μετατρέπει σε MQTT μηνύματα για αποστολή στο Home Assistant. Υπάρχουν ήδη διαθέσιμες λύσεις όπως το OpenMQTTGateway που υποστηρίζουν αυτή τη λειτουργία.

Η προσθήκη καμερών ενισχύει σημαντικά το **σύστημα** ασφαλείας, προσφέροντας οπτική επιβεβαίωση των γεγονότων που καταγράφουν οι αισθητήρες. Οι κάμερες μπορούν να ενεργοποιούνται αυτόματα με την ανίχνευση κίνησης ή παραβίασης, καταγράφοντας εικόνες ή βίντεο που αποστέλλονται στο χρήστη ή αποθηκεύονται στο cloud. Η ενσωμάτωσή τους με το Home Assistant είναι δυνατή μέσω πλατφορμών όπως το ESPHome ή το RTSP, προσφέροντας πλήρη έλεγχο και εποπτεία.

Η σύνδεση με υπηρεσίες cloud δίνει τη δυνατότητα για απομακρυσμένη πρόσβαση, αποθήκευση δεδομένων και προηγμένη ανάλυση. Πλατφόρμες όπως το Firebase, το AWS IoT Core και το Azure IoT Hub επιτρέπουν τη συλλογή και διαχείριση δεδομένων από συσκευές IoT, προσφέροντας λειτουργίες όπως η ανάλυση και η πρόβλεψη συμβάντων. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει τη λειτουργικότητα του συστήματος και το καθιστά πιο ευέλικτο.

Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αναβαθμίσει σημαντικά το επίπεδο ασφαλείας, επιτρέποντας την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες και κάμερες με σκοπό την αναγνώριση προτύπων και την πρόβλεψη πιθανών απειλών. Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να ανιχνεύσουν ανωμαλίες ή να αναγνωρίσουν πρόσωπα και αντικείμενα σε εικόνες, μειώνοντας έτσι τα ψευδώς θετικά και επιτρέποντας πιο στοχευμένες και άμεσες αντιδράσεις.

Για περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόσβαση σε δίκτυο ρεύματος ή όπου απαιτείται αδιάλειπτη λειτουργία, είναι δυνατή η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Μέσω ηλιακής ενέργειας μπορούν να φορτίζονται οι μπαταρίες των συσκευών του συστήματος την ημέρα, επιτρέποντας μακροχρόνια λειτουργία χωρίς ανάγκη συντήρησης ή αντικατάστασης των μπαταριών.

Το **σύστημα** ασφαλείας μπορεί να συνδυαστεί με υπάρχοντα συστήματα αυτοματισμού όπως έξυπνα φώτα, θερμοστάτες και μέσα ψυχαγωγίας, επιτρέποντας σενάρια όπως η αυτόματη ενεργοποίηση φωτισμού όταν εντοπιστεί κίνηση ή η αποστολή ειδοποιήσεων με κάθε παραβίαση. Το Home Assistant υποστηρίζει πληθώρα συσκευών και πρωτοκόλλων, επιτρέποντας ευέλικτο και αποδοτικό έλεγχο.

Η ενσωμάτωση ήδη έξυπνων συσκευών μπορεί να παρέχει ένα έξτρα στρώμα προστασίας, όπως οι έξυπνες λάμπες, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση που κάποιο αισθητήριο εντοπίσει αλλαγή και στείλει μέσω του mqtt την αλλαγή, μπορούν οι έξυπνες λάμπες που είναι συνδεδεμένες στο home assistant να ανάψουν για την ειδοποίηση ότι κάποιος αισθητήρας εντόπισε αλλαγή. Μια άλλη έξυπνη συσκευή είναι τα wifi enabled ηχεία που στην περίπτωση που υπάρχει και εντοπίστηκε εισβολέας μπορούν να λειτουργήσουν σαν σειρήνα για την ειδοποίηση του κόσμου εντός του κτιρίου η και αποθάρρυνση του εισβολέα.

Ωστόσο, η τεχνολογία LoRa συνοδεύεται και από προκλήσεις ασφάλειας, καθώς έχει καταγραφεί ότι τα δίκτυα της μπορεί να είναι ευάλωτα σε επιθέσεις, όπως παρεμβολή σήματος ή πλαστογράφηση συσκευών. Για την ενίσχυση της ασφάλειας προτείνεται η χρήση κρυπτογράφησης, η τακτική αναβάθμιση λογισμικού και η εφαρμογή ελέγχου ταυτότητας ώστε να επαληθεύεται η νομιμότητα των συσκευών στο δίκτυο.

Η προσθήκη εξειδικευμένων αισθητήρων μπορεί να ενισχύσει την ακρίβεια του συστήματος. Οι αισθητήρες mmWave, όπως αυτοί της Texas Instruments, έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν ανθρώπινη παρουσία ακόμη και πίσω από εμπόδια όπως τοίχοι ή κουρτίνες, προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια από τους παραδοσιακούς αισθητήρες PIR και λειτουργούν χωρίς να επηρεάζονται από το φως ή τη θερμοκρασία. Οι υπέρυθροι αισθητήρες, είτε ανακλαστικοί είτε με διακοπή δέσμης, μπορούν να τοποθετηθούν σε εισόδους, θυρίδες ή παράθυρα λειτουργώντας ως ηλεκτρονικά μάτια για την ανίχνευση κίνησης. Ένα σύνηθες παράδειγμα είναι ο συνδυασμός laser και φωτοδίοδου για ακριβή καταγραφή ανοίγματος θυρών ή παραθύρων. Οι αισθητήρες Hall effect μπορούν να ανιχνεύουν την παρουσία μαγνητικών πεδίων και είναι ιδανικοί για τον εντοπισμό της κατάστασης (ανοιχτό/κλειστό) θυρών και παραθύρων μέσω μαγνητών.

Η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών και αισθητήρων προσφέρει μια συνολική αναβάθμιση της αξιοπιστίας και της λειτουργικότητας ενός σύγχρονου συστήματος ασφαλείας, ενισχύοντας την προστασία και διευρύνοντας τις δυνατότητές του σε πλήθος περιβαλλόντων και σεναρίων χρήσης.

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας LoRa σε συστήματα ασφαλείας προσφέρει μια αποδοτική λύση για την παρακολούθηση και τον έλεγχο συσκευών σε απομακρυσμένες περιοχές. Η χρήση του Home Assistant ως πλατφόρμα διαχείρισης επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση διαφόρων συσκευών και τεχνολογιών, ενώ η προσθήκη καμερών, cloud υπηρεσιών, τεχνητής νοημοσύνης και η χρήση αισθητήρων τελευταίας τεχνολογίας όπως mmWave ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

##### VII Συμπερασμα

Το **σύστημα** που δημιουργήσαμε δείχνει πως μπορούμε να φτιάξουμε μια πλήρη και λειτουργική λύση ασφαλείας με σχετικά απλά και οικονομικά μέσα. Με τη χρήση **ESP32**, αισθητήρων κίνησης και φωτός, buzzer και οθόνης OLED, πετύχαμε ένα έξυπνο δίκτυο που μπορεί να εντοπίσει οντότητες, να εμφανίσει ειδοποιήσεις, να στείλει δεδομένα και να ενεργοποιήσει ήχο για άμεση προειδοποίηση. Όλα αυτά συνδέονται με WiFi και το Home Assistant μέσω MQTT, δίνοντάς μας και απομακρυσμένο έλεγχο.

Η χρήση του ESP-NOW μάς έδωσε τη δυνατότητα για τοπική επικοινωνία χωρίς την χρήση router, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κάτι πολύ χρήσιμο για φορητές ή απομακρυσμένες εγκαταστάσεις. Επιπλέον, με την επιλογή του light sleep σε σημεία που δεν απαιτείται συνεχής λειτουργία, μειώνεται ακόμη περισσότερο η κατανάλωση ρεύματος.

Φυσικά υπάρχουν ακόμα προκλήσεις , όπως οι περιορισμοί στην απόσταση του ESP-NOW και ζητήματα με την ασύρματη σύνδεση. Ωστόσο, μέσα από την ενότητα με τις προτάσεις, έχουμε παραθέσει μια μεγάλη ποικιλία προτάσεων για την μεγαλύτερη ανάπτυξη της εφαρμογής αυτής παραδίδοντας και τα προτερήματα του καθενός.

Συνολικά, πρόκειται για μια λύση που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε σπίτια όσο και σε επαγγελματικούς χώρους, με πολλές δυνατότητες επέκτασης στο μέλλον. Το πιο σημαντικό είναι ότι μας δίνει την ευελιξία να προσαρμόζουμε το **σύστημα** ανάλογα με τις ανάγκες μας, αξιοποιώντας τις σύγχρονες τεχνολογίες με έξυπνο και πρακτικό τρόπο.

##### References

Στο πλαίσιο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Περικλή Χατζημίσιο για την βοήθεια και καθοδήγηση του στην εφαρμογή αυτή.

1. Eridani, Dania, et al. “Comparative Performance Study of ESP-NOW, Wi-Fi, Bluetooth Protocols Based on Range, Transmission Speed, Latency, Energy Usage and Barrier Resistance.” *IEEE Xplore*, 1 Sept. 2021, ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9573246.
2. “ESPHome.” *ESPHome*, esphome.io/.
3. Espresiff. “Introduction to Low Power Mode for Systemic Power Management - **ESP32** - — ESP-IDF Programming Guide V5.4.1 Documentation.” *Espressif.com*, 2016, docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/**esp32**/api-guides/low-power-mode/low-power-mode-soc.html.
4. ---. “Sleep Modes - **ESP32** - — ESP-IDF Programming Guide Latest Documentation.” *Docs.espressif.com*, docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/**esp32**/api-reference/system/sleep\_modes.html.
5. Espressif. “ESP-NOW Wireless Communication Protocol | Espressif Systems.” *Www.espressif.com*, www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now.
6. ---. ***ESP32*** *Series Datasheet Including*. 2024.
7. “IEEE Industrial Electronics Society - Transactions on Industrial Informatics.” *Www.ieee-Ies.org*, www.ieee-ies.org/pubs/transactions-on-industrial-informatics.
8. mlesniew. “GitHub - Mlesniew/PicoMQTT: ESP MQTT Client and Broker Library.” *GitHub*, 2023, github.com/mlesniew/PicoMQTT.
9. Murtaza, Maker. “**ESP32** Communication: A Complete Overview.” *Mpythonboard*, 10 Sept. 2024, www.mpythonboard.com/blogs/blogs/**esp32**-communication-a-complete-overview?srsltid=AfmBOortLt9kWJZuiDKVsCCpgzrZ2jKbwcWN2olsXDAjAr9OHzFqoeiq. Accessed 18 May 2025.
10. Rai, Pertab, and Murk Rehman. “**ESP32** Based Smart Surveillance System.” *IEEE Xplore*, 1 Jan. 2019, ieeexplore.ieee.org/document/8673463.
11. Seoane, Victor, et al. “Performance Evaluation of CoAP and MQTT with Security Support for IoT Environments.” *Computer Networks*, vol. 197, Oct. 2021, p. 108338, https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108338.
12. Thangavel, Dinesh, et al. “Performance Evaluation of MQTT and CoAP via a Common Middleware.” *IEEE Xplore*, 1 Apr. 2014, ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6827678. Accessed 29 June 2022.
13. Tutorial, Random Nerds. “Getting Started with ESP-NOW (**ESP32** with Arduino IDE) | Random Nerd Tutorials.” *Random Nerd Tutorials*, 29 Jan. 2020, randomnerdtutorials.com/esp-now-**esp32**-arduino-ide/.
14. “Use ESP NOW and WiFi Simultaneously on **ESP32**.” *Arduino Forum*, 22 Sept. 2022, forum.arduino.cc/t/use-esp-now-and-wifi-simultaneously-on-**esp32**/1034555. Accessed 18 May 2025.