

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Πρώιμη ανίχνευση πυρκαγιών σε απομονωμένες
δασικές περιοχές με τη χρήση πολυδιάστατων
υπογραφών αερίων και επικοινωνίας με χαμηλή
κατανάλωση ενέργειας»



Του φοιτητή
Κουνατίδη Γεώργιου
Αρ. Μητρώου: 2019079

Επιβλέπων
Δρ. Χατζημίσσιος Περικλής
Καθηγητής

Σεπτέμβριος 2026

Τίτλος Δ.Ε. Πρώιμη ανίχνευση πυρκαγιών σε απομονωμένες δασικές περιοχές με τη χρήση πολυδιάστατων υπογραφών αερίων και επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Κωδικός Δ.Ε. 24106

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Κουνατίδης Γεώργιος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Χατζημίσιος Περικλής

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 15-01-2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 1-09-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κουνατίδη Γεώργιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στους γονείς μου και σε όσους προσπάθησαν και ποτέ τους δεν το έβαλαν κάτω»

Πρόλογος

Η επιλογή για το συγκεκριμένο θέμα προέκυψε διότι, ήθελα να αναπτύξω ένα ολοκληρωμένο σύστημα εφαρμόζοντας όλες τις γνώσεις απ' τα μαθήματα που διαμόρφωσαν τον τρόπο σκέψης μου, κατά το πέρας των σπουδών μου. Ένα ακόμη έναυσμα για την επιλογή το θέματος αποτέλεσε και η πρόκληση του σχεδιασμού ενός συστήματος, το οποίο δικαιολογεί το αποτύπωμα κατασκευής του σε σχέση με την ποιότητα ζωής που προσφέρει. Ολοκληρώνοντας το τελευταίο βήμα, νιώθω πιο σίγουρος για το τι μπορώ να πετύχω στη μετέπειτα πορεία μου.

Περίληψη

Το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών εμφανίζει ανοδική πορεία στις χώρες της Μεσογείου, με αποτέλεσμα να καίγονται δάση, να χάνονται περιουσίες και ανθρώπινες ζωές. Παράλληλα διαταράσσεται η χλωρίδα και πανίδα των πληγισίων περιοχών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την ανάπτυξη ενός πειραματικού συστήματος ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών σε απομονωμένες περιοχές, το οποίο συνδυάζει πολυδιάστατες υπογραφές αερίων, περιβαλλοντικές μετρήσεις, ασύρματη επικοινωνία χαμηλής κατανάλωσης με LoRaWAN και μηχανική μάθηση.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αποτελείται από τρία διασυνδεδεμένα στρώματα: αντίληψης, δικτύου και εφαρμογής. Έπειτα, υλοποιείται ένα σύστημα με τη χρήση LoRaWAN, το οποίο συλλέγει πολυδιάστατες υπογραφές αερίων και περιβαλλοντικά δεδομένα για την πρόιμη ανίχνευση πυρκαγιάς. Οι κόμβοι ενσωματώνουν μικροελεγκτή ESP32-C3, αισθητήρα BME688, πομποδέκτη RFM95W και συλλέγουν θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και μετρήσεις αντίστασης του αεριοευαίσθητου στοιχείου. Τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του The Things Stack, επεξεργάζονται σε Python, αποθηκεύονται στο InfluxDB και παρουσιάζονται στο Grafana. Παρέχονται ειδοποιήσεις για πιθανή πυρκαγιά και χαμηλή στάθμη μπαταρίας, συνοδευόμενες από τη θέση του κόμβου.

Το σύστημα αξιολογείται ως προς τη συμπεριφορά του στα πλαίσια της μετάδοσης, ανίχνευσης και ενεργειακής αυτονομίας. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν τη λειτουργικότητα του πρωτοτύπου, αλλά απαιτούνται ανεξάρτητη πειραματική επικύρωση, αξιολόγηση καθυστέρησης ανίχνευσης και ψευδών συναγερμών, βελτίωση αυτονομίας και εγκατάσταση πύλης εξωτερικού χώρου πριν επιβεβαιωθούν η γενικευσιμότητα και η επιχειρησιακή επίδοση σε διαφορετικά δασικά περιβάλλοντα.

«Early detection of wildfires in remote forest areas using Multidimensional gas signatures and low-power communication»

«George Kounatidis»

Abstract

Forest fires are increasing across Mediterranean countries, destroying forests and property, claiming human lives, and disrupting the flora and fauna of affected areas.

This thesis investigates the development of an experimental wildfire-detection system for remote areas, combining multidimensional gas signatures, environmental measurements, low-power wireless communication through LoRaWAN, and machine learning.

The proposed architecture comprises three interconnected layers: sensing, networking, and application. A LoRaWAN-based system collects multidimensional gas signatures and environmental data for early fire detection. Sensor nodes integrate an ESP32-C3 microcontroller, a BME688 sensor, and an RFM95W transceiver, recording temperature, relative humidity, atmospheric pressure, and resistance measurements from the gas-sensitive element. Data are transmitted through The Things Stack, processed in Python, stored in InfluxDB, and visualised in Grafana. Alerts for potential fires and low battery levels include the location of the corresponding node.

The system is evaluated for communication performance, detection capability, and energy autonomy. The results demonstrate the prototype's functionality. However, independent experimental validation, assessment of detection latency and false alarms, improved energy autonomy, and deployment of an outdoor gateway are required before its generalisability and operational performance across different forest environments can be established.

Ευχαριστίες

Μετά την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους/ες όσους/ες βοήθησαν, έστω και λίγο, με οποιοδήποτε τρόπο στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, ευχαριστώ τους γονείς και την οικογένεια μου, για την ηθική και οικονομική στήριξη που μου προσέφεραν απλόχερα τα χρόνια των σπουδών μου και για την υπομονή τους.

Έπειτα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους, που με βοήθησαν όταν ήμουν στα χειρότερα μου.

Ακαδημαϊκά μιλώντας, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον Δρ. Χατζημίσιο Περικλή, ο οποίος στήριξε την προσπάθειά μου και με καθοδήγησε κατάλληλα στη διατριβή μου. Τέλος, ευχαριστώ τους Musa Milli και Mehmet Milli για την ευγενική παραχώρηση του συνόλου δεδομένων τους, από το οποίο χρησιμοποιήθηκε ένα υποσύνολο στην παρούσα εργασία. Το dataset χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς σκοπούς.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συντομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ανάγκη για πρόωμη ανίχνευση δασικών πυρκαγιών	2
1.3 Τεχνολογικές προσεγγίσεις ανίχνευσης	2
1.4 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	3
1.5 Επίλογος.....	4
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο.....	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Δασικές πυρκαγιές και στάδια καύσης.....	5
2.3 Μέθοδοι ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών	6
2.4 Διαδίκτυο των Πραγμάτων και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	7
2.5 Τεχνολογίες LPWAN και WPAN	8
2.6 Μηχανική μάθηση για αναγνώριση προτύπων.....	9
2.6.1 Support Vector Machines	9
2.6.2 Adaptive Boosting	10
2.6.3 Extreme Gradient Boosting	10
2.7 Επίλογος.....	10
Κεφάλαιο 3ο: Σχετική βιβλιογραφία και υφιστάμενα συστήματα.....	11
3.1 Εισαγωγή	11
3.2 Συστήματα δορυφορικής παρατήρησης και τηλεπισκόπησης.....	11
3.3 Επίγεια οπτικά συστήματα ανίχνευσης	12
3.4 Εναέρια συστήματα ανίχνευσης με μη επανδρωμένα αεροσκάφη.....	13
3.5 Επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.....	13
3.6 Επίλογος.....	15

Κεφάλαιο 4ο:	Αρχιτεκτονική συστήματος	17
4.1	Εισαγωγή.....	17
4.2	Στρώμα ανίχνευσης/αντίληψης	18
4.2.1	Χωρική διάταξη.....	18
4.2.2	Αρχιτεκτονική κόμβου	20
4.3	Στρώμα δικτύου.....	21
4.3.1	The Things Stack.....	22
4.3.2	Ενεργοποίηση κόμβου.....	22
4.3.3	Uplink και downlink υπηρεσίες.....	23
4.4	Στρώμα εφαρμογής.....	24
4.5	Επίλογος.....	26
Κεφάλαιο 5ο:	Υλοποίηση	27
5.1	Εισαγωγή.....	27
5.2	Κόμβοι LoRaWAN	27
5.2.1	Προηγούμενες υλοποιήσεις.....	28
5.2.2	Μικροελεγκτής ESP32-C3 Zero.....	31
5.2.3	Αισθητήρας Adafruit BME688.....	33
5.2.4	Πομποδέκτης RFM95W	36
5.2.5	Τροφοδοσία και διαχείριση ενέργειας.....	37
5.2.6	Stevenson screen.....	38
5.2.7	Λογισμικό κόμβου και κύκλος λειτουργίας.....	40
5.3	Σχεδίαση PCB	42
5.4	Πύλη LoRaWAN.....	45
5.4.1	RAK5146.....	45
5.4.2	Διασύνδεση με το The Things Stack.....	46
5.5	Υπηρεσία παραλαβής και επεξεργασίας μέσω MQTT	47
5.5.1	Σύνδεση και παραμετροποίηση	48
5.5.2	Παραλαβή και έλεγχος μηνύματος.....	48
5.5.3	Ανάκτηση γεωγραφικής θέσης.....	48
5.5.4	Εκτέλεση του ταξινομητή.....	48
5.5.5	Εγγραφή και διαχείριση σφαλμάτων.....	48
5.6	Μοντέλα μηχανικής μάθησης.....	49
5.6.1	Χαρακτηριστικά και σύνολο δεδομένων	49
5.6.2	Προεπεξεργασία	49
5.6.3	Αξιολόγηση μοντέλων.....	50

5.6.4	Αξιολόγηση μοντέλων.....	50
5.7	Αποθήκευση δεδομένων.....	50
5.8	Ειδοποιήσεις χρήστη	52
5.9	Επίλογος.....	54
Κεφάλαιο 6ο:	Αξιολόγηση συστήματος με μετρήσεις στο πεδίο	55
6.1	Εισαγωγή.....	55
6.2	Μετρήσεις διάδοσης.....	55
6.2.1	Μετρήσεις διάδοσης υπό συνθήκες οπτικής επαφής.....	55
6.2.2	Μετρήσεις διάδοσης στο πεδίο.....	57
6.2.3	Μοντελοποίηση διάδοσης	58
6.3	Μετρήσεις με αισθητήρα υπό συνθήκες ελεγχόμενης καύσης.....	60
6.3.1	Πειραματική συλλογή δεδομένων	61
6.3.2	Πειραματική συλλογή δεδομένων	62
6.3.3	Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών.....	62
6.3.4	Ανάλυση μέσω t-SNE.....	63
6.4	Μέτρηση κατανάλωσης.....	65
6.5	Επίλογος.....	65
Κεφάλαιο 7ο:	Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις	67
7.1	Εισαγωγή.....	67
7.2	Συμπεράσματα και προοπτικές για το στρώμα αντίληψης.....	67
7.2.1	Συμπεράσματα για το στρώμα αντίληψης.....	67
7.2.2	Βελτίωση της ενεργειακής αυτονομίας των κόμβων.....	68
7.2.3	Τοπική επεξεργασία και λήψη απόφασης	68
7.3	Συμπεράσματα και προοπτικές για το στρώμα δικτύου.....	68
7.3.1	Συμπεράσματα για το στρώμα δικτύου	68
7.3.2	Αναβάθμιση της πύλης και της ασύρματης οπισθοζευκτικής επικοινωνίας	69
7.3.3	Βελτιστοποίηση της χωρικής διάταξης και κάλυψης	69
7.4	Συμπεράσματα και προοπτικές για το στρώμα εφαρμογής.....	70
7.4.1	Συμπεράσματα για το στρώμα εφαρμογής.....	70
7.4.2	Ενσωμάτωση πρόσθετων εξωτερικών πηγών δεδομένων	70
7.4.3	Περαιτέρω βελτίωση και γενίκευση των μοντέλων μηχανικής μάθησης.....	71
7.5	Επίλογος.....	71
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		72

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Προβλεπόμενες τάσεις βασικών κλιματικών παραγόντων κινδύνου [2].	2
Σχήμα 2.1: Κατανομή των συντελεστών εκπομπής CO, CO, CH ₄ και NH ₃ για διάφορους τύπους καύσης βιομάζας. Η καύση τύρφης χαρακτηρίζεται από προϊόντα ατελούς καύσης [22].	6
Σχήμα 4.1: Ροή δεδομένων.	18
Σχήμα 4.2: Ενδεικτική διάταξη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με τους κόμβους LoRaWAN περιμετρικά της εξαγωγικής δομής και τις πύλες στα κέντρα των εξάγωνων.	19
Σχήμα 4.3: Γεωμετρική απεικόνιση της κυψέλης επιτήρησης όταν οι αισθητήρες συμπεριφέρονται ισοτροπικά.	20
Σχήμα 4.4: Standard Heating Profile [49].	21
Σχήμα 4.5: Τα πεδία gateway_id υποδεικνύουν την ύπαρξη πύλης.	23
Σχήμα 4.6: Η εσωτερική αρχιτεκτονική του στρώματος εφαρμογής.	25
Σχήμα 5.1: Κύκλος λειτουργίας του κόμβου.	28
Σχήμα 5.2: Ο μικροελεγκτής στα αριστερά και δεξιά ο ρυθμιστής τάσης που υπάρχει πάνω του.	29
Σχήμα 5.3: Η αλλαγή του ρυθμιστή τάσης.	29
Σχήμα 5.4: Το Arduino pro mini μετά την αλλαγή του ρυθμιστή τάσης και την αφαίρεση LEDs.	30
Σχήμα 5.5: Η βελτιστοποίηση σε σχέση με τις μνήμες του Arduino pro mini.	30
Σχήμα 5.6: Λειτουργικό διάγραμμα του SoC ESP32-C3 [56].	31
Σχήμα 5.7: Διάταξη ακροδεκτών και διαθέσιμες λειτουργίες της αναπτυξιακής πλακέτας ESP32-C3-Zero [57].	32
Σχήμα 5.8: Τα εσωτερικά υποσυστήματα, το αριστερό κομμάτι αντιστοιχεί στο TPH υποσύστημα ενώ το δεξιά στο Gas [59].	34
Σχήμα 5.9: Ο μικροθερμαντήρας του αεριοευαίσθητου στοιχείου, η τροφοδοσία του συγκλίνει με το πλάτος της τροχιάς να είναι γύρω στα 10μm [59].	35
Σχήμα 5.10: Ο κλωβός τύπου Stevenson (όψη).	39
Σχήμα 5.11: Ο κλωβός τύπου Stevenson (κάτοψη).	40
Σχήμα 5.12: Ο κώδικας setup 1.	41
Σχήμα 5.13: Ο κώδικας setup 2.	42
Σχήμα 5.14: Τα 2 επίπεδα του PCB (αριστερά είναι το πάνω μέρος και δεξιά το κάτω μέρος της πλακέτας).	43
Σχήμα 5.15: Η τρισδιάστατη απεικόνιση του PCB (αριστερά είναι το πάνω μέρος και δεξιά το κάτω μέρος της πλακέτας).	43
Σχήμα 5.16: Τελικό αποτέλεσμα panelized τυπωμένης πλακέτας.	44
Σχήμα 5.17: Τελικό αποτέλεσμα μετά τις κολλήσεις.	44
Σχήμα 5.18: Η πύλη LoRaWAN της παρούσας υλοποίησης αριστερά η LoRa κεραία και δεξιά αυτή για το GPS.	46
Σχήμα 5.19: Η πλατφόρμα επικοινωνεί με την πύλη για την κατάστασή της.	47
Σχήμα 5.20: Λήψη μηνύματος άνω ζεύξης στο The Things stack.	47
Σχήμα 5.21: Οι πληροφορίες που αποθηκεύονται με τα αντίστοιχα πεδία τους.	51
Σχήμα 5.22: Η γραφική διεπαφή στο Grafana.	52
Σχήμα 5.23: Ειδοποίηση για πιθανή πυρκαγιά.	53
Σχήμα 5.24: Ειδοποίηση για χαμηλό φορτίο μπαταρίας κόμβου.	53
Σχήμα 6.1: Εικόνα του πεδίου κατά τις μετρήσεις διάδοσης.	58
Σχήμα 6.2: Χωρική κατανομή μετρήσεων RSSI.	58

Σχήμα 6.3: Σύγκριση προβλεπόμενου RSSI μεταξύ των μοντέλων Weissberger και ITU-R P.833-10.	60
Σχήμα 6.4: PCA FIRE/NO FIRE	63
Σχήμα 6.5: t-SNE απεικόνιση των FIRE/NO FIRE σημείων στο διδιάστατο χώρο	65
Σχήμα 7.1: Το όριο έκτασης του συστήματος.....	70

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βασικές πληροφορίες για τις τεχνολογίες επικοινωνίας.....	9
Πίνακας 3.1: Αξιολόγηση μεθόδων για την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών.....	15
Πίνακας 5.1: Συνδέσεις του μικροελεγκτή με τα υποσυστήματα	32
Πίνακας 5.2: Επιλογές για τη λειτουργία του BME688 [49]	33
Πίνακας 5.3: Βήματα του Heating Gas Profile 354	35
Πίνακας 5.4: LoRaWAN παράμετροι στο firmware.....	36
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μοντέλων μηχανικής μάθησης	50
Πίνακας 6.1: Μέση τιμή μετρούμενου RSSI συναρτήσει της απόστασης.....	56
Πίνακας 6.2: Βασικά είδη και ποσότητες φυτικής καύσιμης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν	61
Πίνακας 6.3: Οι κυριότεροι συντελεστές της PC ₁	63
Πίνακας 6.4: Οι κυριότεροι συντελεστές της PC ₂	63

Συντομογραφίες

ABP	Activation by Personalization
AdaBoost	Adaptive Boosting
ADC	Analog-to-Digital Converter
ADR	Adaptive Data Rate
AppKey	Application Key
AppSKey	Application Session Key
BLE	Bluetooth Low Energy
BW	Bandwidth
CS	Chip Select
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
ed	end device
EFFIS	European Fore Fire Information System
ESA	European Space Agency
FCnt	Frame Counter
FP	False Positives
FSK	Frequency Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GSM	Global System for Mobile Communications
HAL	Hardware Abstraction Layer
I2C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
JSON	JavaScript Object Notation
LBT	Listen Before Talk
LDO	Low-DropOut (Voltage)
LMIC	LoRaWAN-MAC-in-C
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LOS	Line Of Sight
LPWAN	Low Power Wide Area Network

LSTM	Long Short-Term Memory
LTE-M	Long-Term Evolution Machine type communication
MAE	Mean Absolute Error
MCCI	Microsystems Connexions Corporation International
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems
MISO	Master In-Slave Out
MOSI	Master Out-Slave In
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
NTN	Non-Terrestrial Networks
NwkSKey	Network Session Key
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift
OTAA	Over-the-Air Activation
PCA	Principal Component Analysis
PCB	Printed Circuit Board
PDR	Packet Delivery Ratio
PLS-DA	Partial Least Squares Discriminant Analysis
PM	Particulate Matter
RBF	Radial Basis Function
RISC-V	Reduced Instruction Set Computer – Five
RMSE	Root Mean Square Error
RPL	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTC	Real-Time Clock
SCK	Serial Clock
SF	Spreading Factor
SMA	Single Mode Antenna
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SRD	Short-Range Devices
SVM	Support Vector Machine
t-SNE	t-distributed Stochastic Neighbor Embedding
TEMA	Trusted Extremely Precise Mapping and Prediction for Emergency Management

ToA	Time on Air
TTS	The Things Stack
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
VOC	Volatile Organic Compound
VSC	Volatile Sulfuric Compounds
Wi-SUN FAN	Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks
XGBoost	Extreme Gradient Boosting
EETT	Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

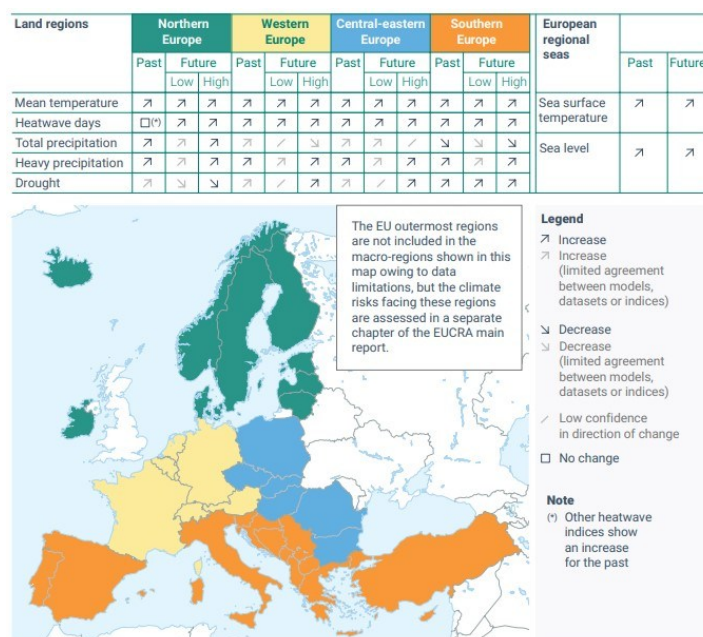
1.1 Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές θεωρούνται μία από τις πιο σημαντικές φυσικές απειλές που επιδρούν σε οικοσυστήματα, ανθρώπους και υποδομές στη Μεσόγειο. Η εμφάνιση και η εξέλιξή τους εξαρτώνται από την ποσότητα καύσιμου, την υγρασία της βλάστησης, το τοπικό τοπίο και τις κυριότερες μετεωρολογικές συνθήκες. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ξηρασία και ο άνεμος μπορούν να καθορίσουν πόσο γρήγορα εξαπλώνεται μια πυρκαγιά και πόσο μεγάλη θα γίνει η οικολογική καταστροφή [1], [2]. Η νότια Ευρώπη είναι σήμερα μία από τις περιοχές με τη μεγαλύτερη ευπάθεια στον κίνδυνο των δασικών πυρκαγιών. Αν η θερμοκρασία αυξάνεται και η ξηρασία γίνεται πιο έντονη, ο κίνδυνος θα μεγαλώσει τα επόμενα χρόνια [2], [3].

Η κλιματική αλλαγή δεν σημαίνει ότι θα υπάρχουν πάντα περισσότερες πυρκαγιές κάθε χρόνο. Δεν είναι πάντα ομοιόμορφη η κατανομή των πυρκαγιών, η αύξησή τους ή η καμένη γη, κάθε χρόνο. Ένα πολύ σημαντικό πράγμα, είναι ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβούν πολύ έντονες και εξαιρετικά μεγάλες πυρκαγιές. Μια μελέτη [4] εξέτασε 11.403 πυρκαγιές που έγιναν το καλοκαίρι σε χώρες της Μεσογείου, το καλοκαίρι από το 2008 έως το 2022. Το αποτέλεσμα ήταν ότι οι πολύ μεγάλες πυρκαγιές (megafires), ήταν μόνο το 6.8% από όλα τα επεισόδια. Αλλά αυτές οι λίγες πυρκαγιές αποτελούν το 57.6% της συνολικής καμένης έκτασης. Οι πυρκαγιές τέτοιας κλίμακας, απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες όπως η ξηρασία και πολλή καύσιμη ύλη που έχει συσσωρευτεί στο χρόνο. Επιπλέον, βραχυπρόθεσμες ακραίες συνθήκες, όπως πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ισχυροί άνεμοι, σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες συνθήκες είναι αυτές που δημιουργούν τις megafires [4].

Δεδομένα των τελευταίων ετών επιβεβαιώνουν τη σοβαρότητα του προβλήματος. Το 2023, η πυρκαγιά στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης και του Έβρου κατέληξε να κάψει 96,000ha και χαρακτηρίστηκε ως η μεγαλύτερη μεμονωμένη πυρκαγιά που είχε καταγραφεί τότε, στην Ευρωπαϊκή Ένωση [5]. Το 2024, η Ελλάδα και άλλες περιοχές της νοτιοανατολικής Ευρώπης υπήρξε μεγάλος αριθμός ημερών ακραίου κινδύνου και στην Ανατολική Αττική μια πυρκαγιά έκαψε περίπου 11,000ha [6]. Το 2025 η κατάσταση ήταν ακόμη πιο εντονότερη, σύμφωνα με τα στοιχεία του European Fore Fire Information System (EFFIS), συνολικά οι καμένες εκτάσεις στην ΕΕ μεγαλύτερες των 30ha, έφτασαν περίπου τα 1,034,552ha. Αυτή ήταν η μεγαλύτερη τιμή της διαθέσιμης χρονοσειράς [1]. Το 65% της συνολικής καμένης έκτασης το συγκέντρωσαν η Ισπανία και η Πορτογαλία, μέχρι το Φθινόπωρο καταγράφηκαν 380,877ha στην Ισπανία και 265,139ha. Παράλληλα, οι εκπομπές από δασικές πυρκαγιές στην Ευρώπη το 2025 έφτασαν στο υψηλότερο ετήσιο επίπεδο της καταγραφής του Copernicus Atmosphere Monitoring Service, που ξεκίνησε το 2003 [1].

Οι δασικές πυρκαγιές δεν αποτελούν μόνο οικολογική καταστροφή, καθώς οι μεγάλης κλίμακας μπορούν να προκαλέσουν ανθρώπινες απώλειες, οικονομική επιβάρυνση, καταστροφή κατοικιών και υποδομών. Επίσης, η καύση βιομάζας σε τέτοιο επίπεδο απελευθερώνει τοξικά αέρια, λεπτά αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter – PM), με αποτέλεσμα οι συνέπειες της πυρκαγιάς να επηρεάζει την ποιότητα του αέρα ακόμα και πιο μακριά από την εστία της φωτιάς [1], [3]. Όλα αυτά οδηγούν σε ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα αέρα και ενέχει κινδύνους για ανθρώπους με αναπνευστικά προβλήματα [7].



Σχήμα 1.1: Προβλεπόμενες τάσεις βασικών κλιματικών παραγόντων κινδύνου [2].

1.2 Ανάγκη για πρόωμη ανίχνευση δασικών πυρκαγιών

Οι πυρκαγιές ξεκινούν από μικρές εστίες και ανάλογα τις συνθήκες μπορούν να εξελιχθούν με ταχύτητα στο δάσος, το οποίο υποδεικνύει ότι ο χρόνος ανίχνευσης είναι ζωτικής σημασίας. Ο τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος, δεν είναι απαραίτητα η καταστολή του μετώπου της φωτιάς, όταν αυτή έχει ήδη προχωρήσει, αλλά η ανίχνευση και ο εντοπισμός της από τα πρώιμα της στάδια. Αυτό γιατί, πέρα από το χρόνο που θα ανιχνευθεί η εστία, πρέπει να ενημερωθούν έγκαιρα οι αρμόδιοι φορείς και να φτάσουν στο επίμαχο σημείο. Συνεπώς, η πρόωμη ανίχνευση αποτελεί σημαντικό τμήμα των σύγχρονων συστημάτων ανίχνευσης των δασικών πυρκαγιών [8], [9].

Η δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών που σχετίζονται με τα πρώτα στάδια της καύσης αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, μιας και ο καπνός φέρει αέρια και αιωρούμενα σωματίδια, η ακριβής σύνθεσή του διαφέρει ανάλογα το είδος των καυσίμων υλών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες [8]. Διάφορες μελέτες συστημάτων ανίχνευσης αερίων, έχουν δείξει ότι κατά τη διάρκεια της φάσης όπου επικρατεί αργής καύση (smoldering), εμφανίζονται σημαντικές συγκεντρώσεις πτητικές οργανικές ουσίες (Volatile Organic Compounds – VOCs) και άλλων αερίων, πριν καν την ανάπτυξη έντονης φλόγας [10].

Ωστόσο, η πρόωμη ανίχνευση αξιολογείται κυρίως από τον αριθμό των False Positives και όχι αποκλειστικά από το χρόνο που γίνεται η ανίχνευση. Σε ένα πραγματικό σύστημα οι αισθητήρες εκτίθενται σε πολλές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία και σύσταση του αέρα), σε συνθήκες που μοιάζουν με φωτιά, αλλά δεν είναι. Η βιβλιογραφία εξετάζει τη χρήση πολυδιάστατων μετρήσεων και τεχνικών αναγνώρισης προτύπων, ώστε να γίνεται διάκριση μεταξύ καταστάσεων πυρκαγιάς και άλλων ερεθισμάτων που δεν αντιστοιχούν σε πυρκαγιά [10], [11].

1.3 Τεχνολογικές προσεγγίσεις ανίχνευσης

Δεδομένου ότι το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών αποτελεί κίνδυνο σε πολλούς τομείς και αυξάνονται τα περιστατικά κάθε χρόνο, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογικές προσεγγίσεις για την ανίχνευσή τους. Οι Mohapatra και Trinh κατηγοριοποιούν τις τεχνολογικές προσεγγίσεις σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: Δορυφορικά συστήματα επιτήρησης, μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned

Aerial Vehicles – UAVs), επίγεια δίκτυα καμερών και επίγεια δίκτυα αισθητήρων [9]. Κάθε κατηγορία φυσικά, μπορεί να εμφανίζει πλεονεκτήματα και περιορισμούς, έναντι των άλλων.

Τα δορυφορικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν εξαιρετικά μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις, ενώ τα επίγεια δίκτυα καμερών με τη χρήση οπτικών και θερμικών καμερών μπορούν να αναγνωρίσουν φωτιάς εστίες εξετάζοντας τον καπνό, θερμικές ανωμαλίες και φλόγες. Τα UAV από την άλλη, συνήθως χρησιμοποιούν οπτικές και θερμικές κάμερες και προσφέρουν μεγαλύτερη κινητικότητα από τα επίγεια δίκτυα καμερών. Συνεπώς, τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την επιτήρηση, όσο και για την επιβεβαίωση μιας φωτιάς. Καμία από τις παραπάνω κατηγορίες δεν γίνεται να είναι λειτουργήσει από μόνη της ως καθολική λύση, διότι υπάρχουν διαφορετικοί περιορισμοί όσον αφορά την κάλυψη, την ορατότητα, την αυτονομία, το κόστος και το χρόνο απόκρισης [9], [12]. Οι προαναφερθείσες τεχνολογίες, παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Η προσέγγιση που σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και εξετάζεται στην παρούσα εργασία, αφορά τα επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs). Οι κόμβοι συγκεντρώνουν τοπικές πληροφορίες όπως θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση, συγκεντρώσεις αερίων ή αιωρούμενα σωματίδια και τις μεταδίδουν προς την κεντρική υποδομή της εφαρμογής, μέσω επίγειου δικτύου κυψελωτών επικοινωνιών (π.χ. GSM, LTE-M) ή μέσω μη επίγειων δορυφορικών δικτύων (Non-Terrestrial Networks – NTN), όπως το NTN LoRaWAN [13]. Η ανάπτυξη συστημάτων Internet of Things (IoT) που είναι δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και μεγάλης εμβέλειας, καθιστά δυνατή τη λειτουργία τους σε απομακρυσμένες δασικές περιοχές [8], [12], [14].

Οι De Rango et al. ανέπτυξαν το 2025 δίκτυο 44 αισθητήρων CO₂, με LoRaWAN και χρησιμοποίησαν autoencoders και LSTM (Long Short-Term Memory) για την ανίχνευση μεταβολών που σχετιζόταν με δασική πυρκαγιά. Η έρευνά τους έδειξε ότι, υπάρχει δυνατότητα εξαγωγής πληροφορίας από μεταβολές οι οποίες δεν είναι κατ' ανάγκη μεγάλες για να ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο κατώφλι, καθώς τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης παρήγαγαν ενδείξεις σε πολλαπλούς αισθητήρες [8]. Αντίστοιχα, οι Pires et al. παρουσίασαν το 2025 ένα καταναεμημένο σύστημα LoRa για αγροτικές και δασικές περιοχές, με αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, CO, ποιότητας αέρα και ταχύτητας ανέμου για τη συλλογή και επεξεργασία των εν λόγω δεδομένων [14],

Τέλος, με τη χρήση της μηχανικής μάθησης τα δεδομένα που συλλέγονται από τα παραπάνω συστήματα επεξεργάζονται περισσότερο από ποτέ. Συνεπώς, η απόφαση λαμβάνει υπόψιν ταυτόχρονα πολλά χαρακτηριστικά, όπως και τις σχέσεις μεταξύ τους, αντί απλά την υπέρβαση ενός κατωφλίου. Έτσι είναι δυνατή η αναγνώριση σύνθετων προτύπων, που σχετίζονται με την εμφάνιση μιας πυρκαγιάς και βελτιώνεται η διάκριση από φυσιολογικές ή παρεμβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες [8], [10], [11].

1.4 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Στο πλαίσιο αυτής της ανάγκης και για να διασφαλιστεί η άμεση και αξιόπιστη αναγνώριση μιας δασικής πυρκαγιάς, αυτή η εργασία ερευνά τη διαδικασία σχεδίασης, ανάπτυξης και πειραματικής αξιολόγησης ενός καταναεμημένου συστήματος πρώιμης ανίχνευσης. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε δασικές περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται στο σχηματισμό ενός καταναεμημένου δικτύου, στο οποίο οι επίγειοι κόμβοι συλλέγουν μετεωρολογικές πληροφορίες και τη πολυδιάστατη υπογραφή αερίων του αέρα. Έπειτα, κάθε κόμβος μεταδίδει μέσω του δικτύου, οι πληροφορίες επεξεργάζονται στο Cloud, μέσω μηχανικής μάθησης εξάγεται η πιθανότητα για την ύπαρξη φωτιάς στο σημείο και όλα τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε μια γραφική διεπαφή.

Στη συλλογή των δεδομένων περιλαμβάνεται η μέτρηση θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και έπειτα λαμβάνονται πολλαπλές μετρήσεις αντίστασης αερίων, με σκοπό το σχηματισμό της πολυδιάστατης υπογραφής αερίων. Οι μετρήσεις της αντίστασης στον MOX αισθητήρα, πραγματοποιούνται διαδοχικά και για κάθε βήμα ο θερμοαντήρας του αισθητήρα οδηγείται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, για συγκεκριμένο χρόνο βήματος.

Συνολικά, τα δεδομένα συλλέγονται και μεταδίδονται στην κεντρική υποδομή, όπου γίνεται η αποθήκευσή, η επεξεργασία, η ταξινόμηση και η οπτικοποίηση τους. Η επιλογή τεχνολογίας για την ασύρματη μετάδοση χαμηλής κατανάλωσης και μεγάλης εμβέλειας, λειτουργεί ως τρόπος αντιμετώπισης των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο, δηλαδή την έλλειψη ενεργειακής και τηλεπικοινωνιακής υποδομής στα δάση. Παρόμοιο πλαίσιο αρχιτεκτονικής έχει εξεταστεί σε πρόσφατα συστήματα πρώιμης ανίχνευσης με LoRa/LoraWAN [8], [12], [14]. Οι αξιότιμοι Ramadan et al. συνδύασαν επίγειους IoT κόμβους, LoRaWAN, UAV και υποδομή Cloud και έδειξαν ότι η ανίχνευση στα πειράματά τους έγινε εντός 1-5 λεπτών από την ανάφλεξη [12].

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος, το οποίο να μπορεί να διακρίνει συνθήκες όπου καίγεται βιομάζα, με άλλες όπου δεν υπάρχει καύση, ενώ παράλληλα τα False Positives (FP) διατηρούνται σε χαμηλό ποσοστό. Η αξιολόγηση όμως, δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην απόδοση του μοντέλου μηχανικής μάθησης, αλλά αντιμετωπίζει την προτεινόμενη λύση ως ολοκληρωμένο σύστημα. Συνεπώς, εξετάζονται επίσης η αξιοπιστία της ασύρματης σύνδεσης στις δασικές περιοχές, η δυνατότητα κάλυψης μια δασικής περιοχής και η ενεργειακή κατανάλωση.

Ανακεφαλαιώνοντας, η συνολική προτεινόμενη προσέγγιση επιδιώκει τη διερεύνηση της σκοπιμότητας ενός χαμηλού κόστους, ενεργειακά αποδοτικού και επεκτάσιμου συστήματος πρώιμης ανίχνευσης. Η προτεινόμενη χρήση του συστήματος είναι συμπληρωματική προς άλλα υφιστάμενα μέσα επιτήρησης δασικών περιοχών.

1.5 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το γενικό πλαίσιο των δασικών πυρκαγιών, με έμφαση στις συνθήκες που επικρατούν στα δάση των χωρών της Μεσογείου. Οι πυρκαγιές που εκτυλίχθηκαν τα τελευταία έτη, ιδιαίτερα αυτές που κατηγοριοποιούνται ως μεγάλης κλίμακας ή megafires, ήταν καταστροφικές τόσο για τη φύση, όσο και για τους ανθρώπους. Επίσης, οι προβλεπόμενες κλιματικές συνθήκες επιδεινώνουν το πρόβλημα αναδεικνύοντας τη σημασία ύπαρξης συστημάτων επιτήρησης των δασικών περιοχών, με σκοπό την όσο το δυνατό πιο πρώιμη ανίχνευση της εστίας, όπου ξεκινά η φωτιά.

Παρουσιάστηκαν συνοπτικά, οι κυριότερες τεχνολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα για την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSNs, τα οποία σε συνδυασμό με ασύρματη επικοινωνία χαμηλής κατανάλωσης και μεγάλης εμβέλειας και τη χρήση μηχανικής μάθησης, μπορούν να δράσουν καταλυτικά στην πρώιμη ανίχνευση μιας πυρκαγιάς. Εν συνεχεία, προσδιορίστηκε το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, η οποία είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός συστήματος που χρησιμοποιεί πολυδιάστατες υπογραφές αερίων και άλλων δεδομένων για την πρώιμη ανίχνευση καύσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τις δασικές πυρκαγιές και το απαραίτητο τεχνολογικό υπόβαθρο σχετικά με διάφορες τεχνολογίες που εξετάστηκαν, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

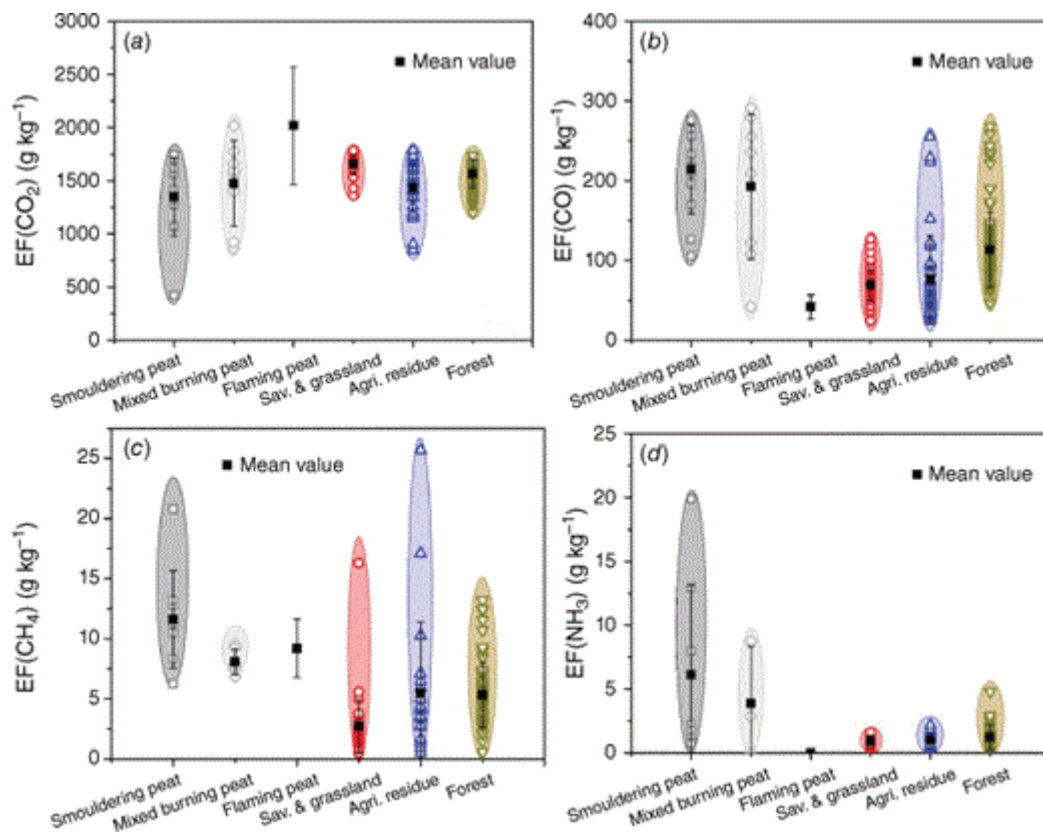
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο το οποίο θα φανεί χρήσιμο και λειτουργεί ως βάση για τα επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Αρχικά, εξετάζεται το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών, τα στάδια καύσης και το χημικό αποτύπωμά τους. Η συγκεκριμένη ανάλυση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι ορισμένα αέρια στα πρώιμα στάδια της φωτιάς προηγούνται της έντονης καύσης. Μάλιστα, υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις συγκεντρώσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στάδιο, όταν καίγεται φυτική ύλη. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται, οι κυριότερες τεχνολογικές προσεγγίσεις για την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών και η αρχή λειτουργίας των MOX αισθητήρων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυνατότητα δημιουργίας πολυδιάστατης υπογραφής από τον αισθητήρα, καθώς αυτή μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή. Τέλος, γίνεται μια επισκόπηση όσον αφορά τη συμβολή του IoT πάνω στην ανίχνευση δασικών πυρκαγιών, σε τεχνολογίες επικοινωνίας και σε μοντέλα μηχανικής μάθησης ως μέσο για την αναγνώριση προτύπων σε πολυδιάστατες υπογραφές.

2.2 Δασικές πυρκαγιές και στάδια καύσης

Η δασική πυρκαγιά αποτελεί σύνθετο φυσικοχημικό φαινόμενο, η εξέλιξή του οποίου καθορίζεται από την αλληλεπίδραση της καύσιμης ύλης, μετεωρολογικών συνθηκών και τοπογραφίας. Παράγοντες όπως η περιεκτικότητα της βλάστησης σε υγρασία, η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η κλίση του εδάφους μεταβάλλουν σημαντικά την πιθανότητα ανάφλεξης και τη μετέπειτα συμπεριφορά της πυρκαγιάς [15].

Η θέση και η κατανομή της καύσιμης ύλης επηρεάζουν την ανάφλεξη και τον τρόπο διάδοσης της φωτιάς. Η καύσιμη αυτή ύλη διακρίνεται με πολλούς τρόπους, ένας εξ αυτών είναι ο διαχωρισμός της συναρτήσει της θέσης από την επιφάνεια του εδάφους, ως εξής: υπεδάφια, επί του εδάφους και εναέρια. Η υπεδάφια καύσιμη ύλη περιλαμβάνει ρίζες και οργανικά στρώματα σε αποσύνθεση, η επιφανειακή περιλαμβάνει χόρτα, ποώδη βλάστηση, θάμνους και ξύλα, ενώ η εναέρια περιλαμβάνει βιομάζα από θάμνους/δέντρα που βρίσκονται ψηλότερα από το έδαφος [16], [17]. Μια περισσότερη συστηματική προσέγγιση της ορολογίας, προτείνουν οι Huidobro et al., οι οποίοι παρατηρώντας ότι η διεθνής βιβλιογραφία χρησιμοποιεί διαφορετικούς όρους, προτείνουν για την εναρμόνιση της ορολογίας κατηγοριοποίηση με βάση 5 άξονες: την αιτία εκδήλωσης, την κατάσταση στην οποία εκδηλώνεται, τη βλάστηση που καίγεται, το μέγεθος του περιστατικού και τη γεωγραφική περιοχή στην οποία χρησιμοποιείται ένας συγκεκριμένος όρος [18].

Όσον αφορά το πρώιμο στάδιο στο οποίο επικεντρώνεται η παρούσα εργασία, υπάρχει ατελής καύση το οποίο σημαίνει ότι λόγω της ανεπάρκειας οξυγόνου, δεν υπάρχει πλήρης οξειδωση. Ένας από τους βασικότερους δείκτες ατελούς καύσης είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) [19]-[21]. Μπορούν επίσης να εμφανίζονται αυξημένες συγκεντρώσεις κοντά στη φωτιά ή σε στήλη πυρκαγιάς (fire plume), το διοξείδιο του αζώτου και άλλα οξείδια του αζώτου [19]-[21]. Η φορμαλδεΐδη εμφανίζεται επίσης κατά την καύση βιομάζας [21]. Στο [22] αναφέρεται ότι παρατηρούνται σημαντικές εκπομπές μεθανίου (CH₄) στην υποβόσκουσα καύση τύρφης και εξετάζουν τον συνδυασμό με άλλα αέρια για το σχηματισμό χαρακτηριστικών υπογραφών αερίων της καύσης. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται αποτελέσματα από τα πειράματά τους, στα οποία εξηγείται ποια αέρια χαρακτηρίζουν την πρώιμη καύση. Τέλος, η παρουσία πτητικών οργανικών ενώσεων είναι αναμενόμενη, συνήθως ως μίγμα και όχι ως μεμονωμένες ενώσεις [21], [23].



Σχήμα 2.1: Κατανομή των συντελεστών εκπομπής CO , CO_2 , CH_4 και NH_3 για διάφορους τύπους καύσης βιομάζας. Η καύση τύρφης χαρακτηρίζεται από προϊόντα ατελούς καύσης [22].

2.3 Μέθοδοι ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών

Η σύγχρονη βιβλιογραφία περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών που μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δορυφορικά συστήματα, εναέρια συστήματα και UAVs, επίγεια δίκτυα καμερών και επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [9]. Μια δική μου παρατήρηση είναι πως η αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την έκταση και ένταση του συμβάντος.

Τα δορυφορικά συστήματα, επιτρέπουν την παρακολούθηση εξαιρετικά μεγάλων περιοχών έχοντας πολλαπλά κανάλια πληροφοριών, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα συστήματα για την παρακολούθηση εξελισσόμενων πυρκαγιών και καμένης έκτασης. Οι περιορισμοί αυτής της προσέγγισης είναι η χωρική και χρονική ανάλυση, η νέφωση και η ανάγκη να έχει δημιουργηθεί μια ικανή θερμική υπογραφή για να ανιχνευθεί μια πυρκαγιά.

Τα UAVs έχουν ίδια φιλοσοφία με τα δορυφορικά συστήματα, δηλαδή βασίζονται σε οπτικές, θερμικές, πολυφασματικές κάμερες και παρέχουν εξαιρετικά μεγαλύτερη ευελιξία από τους δορυφόρους. Η χρήση τους ενδείκνυται για αναζήτηση ενεργών μετώπων, χαρτογράφηση των εστιών της πυρκαγιάς, ωστόσο η λειτουργία τους εξαρτάται από την αυτονομία τους, τις καιρικές συνθήκες και την γεωγραφική κάλυψη.

Τα επίγεια συστήματα καμερών βασίζονται συνήθως σε οπτική ή θερμική ανίχνευση και μπορούν να επιτηρούν μεγάλες περιοχές, όταν αυτά τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις συνδυάζουν ως τρόπο ανίχνευσης, την αλγοριθμική επεξεργασία εικόνων με μηχανική μάθηση. Βέβαια, η απόδοση εξαρτάται από την οπτική επαφή και την ύπαρξη επαρκούς καπνού, φλόγας ή θερμικής αντίθεσης. Οι Mohapatra και Trinh επισημαίνουν ότι, οι εγγύτητα των αισθητήρων με

πιθανή εστία μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να αντιληφθούν τις μεταβολές πριν καν δημιουργηθεί ορατή ποσότητα καπνού [9].

Η τελευταία προσέγγιση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, είναι η χρήση επίγειων αισθητήρων, οι οποίοι παρακολουθούν φυσικές ή χημικές μεταβλητές στο περιβάλλον. Στους ανιχνευτές πυρκαγιάς χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων αισθητήρες θερμοκρασίας, φλόγας, καπνού και αερίων, όπου κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία και διαφορετικό ρυθμό False Positives [24]. Οι Chen et al., ανέπτυξαν σύστημα που συνδύαζε την εξέλιξη του καπνού με CO και CO₂, δείχνοντας έτσι ότι ο συνδυασμός των σημάτων αυτών, είναι ικανός να ανιχνεύσει περιπτώσεις που δεν ενεργοποιούνταν ένας συμβατικός αισθητήρας καπνού, μειώνοντας το χρόνο συναγερμού [25].

Καταλήγοντας στο γεγονός ότι, στις εφαρμογές πρώιμης ανίχνευσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός πολλών χαρακτηριστικών, τα οποία συνδέονται με τα στάδια της φωτιάς και όχι απλώς η υπέρβαση κάποιου κατωφλίου θερμοκρασίας ή συγκέντρωσης μιας χημικής ένωσης. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα γίνεται πιο ανθεκτικό, όσον αφορά τη ελαχιστοποίηση του ρυθμού False Positives.

2.4 Διαδίκτυο των Πραγμάτων και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αποτελεί δίκτυο επικοινωνίας όπου κάθε αντικείμενο που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο επιτρέπει τη σύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων. Στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, οι συσκευές δύναται να είναι καταναμημένοι κόμβοι οι οποίοι συλλέγουν πληροφορία και τη μεταδίδουν προς μια κεντρική υποδομή. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων κινείται στο ίδιο πλαίσιο, όπου κάθε κόμβος αποτελείται από υποσυστήματα. Κύρια υποσυστήματα συνήθως είναι οι αισθητήρες, η μονάδα επεξεργασίας, το/α ραδιοσύστημα/τα για την ασύρματη μετάδοση και η πηγή ενέργειας του κόμβου. Τέλος, οι συλλεχθείς πληροφορίες μεταδίδονται είτε απευθείας, είτε μέσω άλλων κόμβων σε ένα συγκεντρωτή, από τον οποίο μπορούν να προωθηθούν σε μια εφαρμογή για την αποθήκευση, επεξεργασία και παρουσίαση.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι κατάλληλη για την επιτήρηση δασικών περιοχών καθώς επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων in situ, δηλαδή απευθείας από το πεδίο ενδιαφέροντος. Οι Zhao et al. υλοποίησαν πραγματικό IoT σύστημα σε δάσος με περιβαλλοντικούς αισθητήρες, LoRa και NB-IoT (NarrowBand Internet of Things), παρουσιάζοντας τη δυνατότητα ενός τέτοιου συστήματος, όσον αφορά τα κομμάτια της συλλογής και μετάδοσης σε κεντρικό εξυπηρετητή [26].

Οι απαιτήσεις ενός τέτοιου δικτύου έχουν αρκετές διαφορές σε σχέση με κάποιο οικιακό ή βιομηχανικό. Αρχικά, οι απαιτήσεις για το σχεδιασμό μπορούν να θεωρηθούν οι εξής με βάση την [27]:

- Η γεωγραφική κάλυψη και την εμβέλεια συναρτήσει του πεδίου
- Το εύρος ζώνης και τους ρυθμούς δεδομένων
- Η ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών
- Η καθυστέρηση και τη διαθεσιμότητα
- Ο αριθμός των υποστηριζόμενων συσκευών του δικτύου
- Το κόστος και η συντήρηση των συσκευών

Στην παρούσα εργασία ως κύριες απαιτήσεις θεωρούνται οι εξής τέσσερις (4):

- Η κάλυψη
- Η ενεργειακή κατανάλωση
- Ο αριθμός των υποστηριζόμενων συσκευών
- Το κόστος

2.5 Τεχνολογίες LPWAN και WPAN

Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες επικοινωνίας που κατηγοριοποιούνται ως LPWAN και WPAN, ωστόσο στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούν οι κυριότερες που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Είναι σκόπιμο να ορίσουμε ότι οι Wireless Personal Area Network (WPAN) τεχνολογίες προορίζονται κυρίως για επικοινωνίες μικρής και μέτριας εμβέλειας, ενώ οι Low Power Wide Area Network επικεντρώνονται στη μετάδοση μικρού όγκου δεδομένων σε μεγάλη απόσταση, με μικρή κατανάλωση ενέργειας. Ένας τρόπος για να το σκεφτεί κανείς είναι να θεωρήσει ότι υπάρχει ένας χώρος με τρεις διαστάσεις, στις οποίες οι άξονες είναι η εμβέλεια, ο όγκος δεδομένων και η κατανάλωση ενέργειας. Το ιδανικό αλλά μη εφικτό σύστημα, έχει στους άξονες της εμβέλειας και του όγκου δεδομένων υψηλές τιμές και ταυτόχρονα εξαιρετικά χαμηλή τιμή στον άξονα της ενεργειακής κατανάλωσης. Όσον αφορά τις WPAN τεχνολογίες, αυτές που έχουν ενδιαφέρον είναι οι Bluetooth Low Energy (BLE) και ZigBee.

Η BLE είναι μια τεχνολογία μικρής απόστασης, λειτουργεί στην ISM ζώνη των 2.4 GHz και χρησιμοποιεί διαμόρφωση Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK). Η τοπολογία του είναι Scatternet. Διαθέτει 40 RF κανάλια και χρησιμοποιεί frequency hopping, για να μην καταλαμβάνονται επ' αόριστον τα κανάλια και να μπορούν να παραμείνουν ανενεργές οι συσκευές για εξοικονόμηση ενέργειας [27].

Το ZigBee είναι μια τεχνολογία μικρής απόστασης, full stack, βασισμένη στα φυσικά και MAC επίπεδα του IEEE 802.15.4, λειτουργεί και αυτό στην ISM ζώνη των 2.4 GHz και χρησιμοποιεί διαμόρφωση Offset Quadrature Phase Shift (O-QPSK). Το πρότυπο προβλέπει και λειτουργεί σε άλλες συχνότητες αλλά με διαφορετικές διαμορφώσεις. Οι συσκευές κατηγοριοποιούνται σε Coordinator, Routers και End Devices και επιτρέπει τη δημιουργία διάφορων τοπολογιών, όπως και multi-hop δίκτυα [27].

Ένα μεγάλο θέμα με τις παραπάνω τεχνολογίες είναι ότι όταν λειτουργούν στα 2.4 GHz, αυτό συνεπάγεται σημαντική πρόσθετη εξασθένιση σε περιβάλλον βλάστησης. Αυτό φάνηκε σε πειραματικές μελέτες όπου καταγράφηκε σημαντική εξασθένιση στην παρουσία πυκνής βλάστησης [28]. Το 2012 προτάθηκε το IEEE 802.15.4g το οποίο είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί στα 868 MHz στην Ευρώπη, το οποίο αυξάνει την εμβέλεια, μπορεί να χρησιμοποιήσει αρκετές διαμορφώσεις και πάνω σε αυτό στηρίζεται το Wi-SUN FAN [29].

Το Wi-SUN FAN (Wireless Smart Ubiquitous Network Field Area Network) είναι επίσης ένα full stack πρωτόκολλο, κατηγοριοποιείται ως low-power mesh network και χρησιμοποιείται σε μεγάλης κλίμακας IoT υποδομές. Η έκδοση Wi-SUN FAN 1.0 χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο FSK, με ρυθμούς 50, 100 και 150 kbps. Παράλληλα χρησιμοποιεί frequency hopping και CSMA/CA για την αποφυγή συγκρούσεων [30]. Εν αντιθέσει με την πλειοψηφία των κλασικών LPWAN συστημάτων τύπου αστέρα, το Wi-SUN βασίζεται σε multi-hop mesh τοπολογία. Χωρίς να γίνει μεγάλη αναφορά στη στοίβα, χρησιμοποιεί το IPv6 και το πρωτόκολλο RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), επιτρέποντας την προώθηση δεδομένων από κόμβους που είναι μακριά από το δρομολογητή συνόρου (border router) και δίνοντας του ιδιότητες self-organizing και self-healing [30].

Στην κατηγορία των LPWAN τεχνολογιών, μια από τις πιο διαδεδομένες είναι η LoRaWAN, όπου είναι τοπολογία αστέρα, πιο συγκεκριμένα star-of-stars. Η τεχνολογία που επιλέγεται είναι το LoRaWAN πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση LoRa. Αξίζει να σημειωθεί ότι το LoRaWAN, δεν είναι ταυτόσημο του LoRa. Το LoRa είναι μια τεχνική διαμόρφωσης εξάπλωσης φάσματος chirp (Chirp Spread Spectrum, CSS), κατά την οποία η πληροφορία κωδικοποιείται σε chirp σήματα. Τα σήματα αυτά μεταβάλλονται γραμμικά στο χρόνο εντός συγκεκριμένου εύρους ζώνης. Το LoRa αφορά αποκλειστικά το φυσικό επίπεδο της επικοινωνίας LoRaWAN (πρωτόκολλο επιπέδου MAC/δικτύου), με λίγα λόγια είναι το υπόστρωμα μετάδοσης του LoRaWAN. Η τεχνολογία LoRa είναι σχεδιασμένη

για επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, με χαμηλό ρυθμό δεδομένων και αυξημένη ευαισθησία δέκτη, είναι εξαιρετικά ανθεκτική σε θόρυβο, παρεμβολές και εμπόδια. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την εμβέλεια είναι η ισχύς εκπομπής, ο συντελεστής εξάπλωσης (Spreading Factor - SF) και το εύρος ζώνης, αυτοί μπορούν να οριστούν στη συσκευή ως σταθερές.

Μια εναλλακτική LPWAN τεχνολογία είναι το NB-IoT, το οποίο είναι μια κυψελωτή τεχνολογία του 3GPP και λειτουργεί σε licensed φάσμα. Χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 180 kHz και είναι σχεδιασμένο για υψηλό ρυθμό δεδομένων με αυξημένη κάλυψη, υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει αυτόνομα εντός υπάρχοντος καναλιού [27]. Εδώ η τελική συσκευή επικοινωνεί με την υποδομή κινητής τηλεφωνίας, συνεπώς δεν χρειάζεται η ιδιωτική εγκατάσταση κάποιας πύλης, αλλά να υπάρχει κάλυψη απ' το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Παρακάτω ο Πίνακας 2.1 με συνολικές τις βασικές πληροφορίες για κάθε πρωτόκολλο:

Πίνακας 2.1: Βασικές πληροφορίες για τις τεχνολογίες επικοινωνίας

Τεχνολογία	Ζώνη/PHY	Τοπολογία	Βασικό Χαρακτηριστικό
BLE	2.4 GHz	Scatternet	Short range
ZigBee	IEEE 802.15.4	Star/Tree/Mesh	Short range
Wi-SUN	IEEE 802.15.4g	Multi-hop Mesh	IPv6 RPL
LoRaWAN	<1 GHz	Star-of-Stars	Long Range
NB-IoT	180 kHz cellular	Cellular	Long Range

Στην προκειμένη περίπτωση, οι δύο τεχνολογίες που αξιολογούνται θετικά με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στο 2.4 και για τις δασικές απομονωμένες περιοχές, είναι το LoRaWAN και το Wi-SUN. Για το σύστημα επιλέγεται τελικά το LoRaWAN, αλλά θα μπορούσε κάλλιστα να λειτουργήσει και με το Wi-SUN επίσης.

2.6 Μηχανική μάθηση για αναγνώριση προτύπων

Η μηχανική μάθηση αναφέρεται στη μέθοδο υπολογισμού όπου γνωρίζοντας τη είσοδο εξάγονται πρότυπα και σχέσεις μεταξύ των δεδομένων, χωρίς να έχει γίνει κάποιος προγραμματισμός για το πώς λειτουργεί το σύστημα. Στα προβλήματα ταξινόμησης, ο στόχος είναι η μάθηση μια σχέσης που έχει ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών με μια κλάση.

Σύμφωνα με τους Brunton και Kutz, οι προαναφερθείσες μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν ως επιβλεπόμενες και μη. Παρουσιάζουν μεθόδους όπως η clustering, γραμμικούς ταξινομητές, Support Vector Machines και classification trees. Το βιβλίο τους αφιερώνει ειδικά την Ενότητα 5.7 στα Support Vector Machines και την Ενότητα 5.8 στα classification trees, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο πραγματεύονται νευρωνικά δίκτυα βαθιάς μάθησης [31]. Στην παρούσα εργασία ως είσοδος χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα 13 χαρακτηριστικών, στο οποίο αποτυπώνεται η στιγμιαία λαμβανόμενη απόκριση του πεδίου. Τα μοντέλα που εξετάζονται είναι τα AdaBoost (Adaptive Boosting), SVM (Support Vector Machine και XGBoost (Extreme Gradient Boosting) χωρίς να αποκλείεται η χρήση άλλων μοντέλων μηχανικής μάθησης βέβαια.

2.6.1 Support Vector Machines

Το SVM αποτελεί επιβλεπόμενη μέθοδο μηχανικής μάθησης και χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα ταξινόμησης. Αυτή η μέθοδος προσπαθεί να προσδιορίσει το υπερεπίπεδο στο οποίο

διαχωρίζονται οι κλάσεις των δεδομένων, πάνω στο χώρο των χαρακτηριστικών. Μάλιστα, επιδιώκει να το κάνει αυτό με το μεγαλύτερο δυνατό περιθώριο (margin), αυτό καθορίζεται από τα δείγματα που βρίσκονται πλησιέστερα στο όριο του διαχωρισμού. Αυτά τα δείγματα ονομάζονται διανύσματα υποστήριξης (Support vectors) και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη θέση του υπερεπιπέδου. Στην περίπτωση που τα δεδομένα δεν μπορούν να διαχωριστούν γραμμικά, το SVM μπορεί να χρησιμοποιήσει συναρτήσεις πυρήνα (kernel functions), το οποίο επιτρέπει την προβολή των δεδομένων σε χώρο υψηλότερης διάστασης. Ένας από τους συνηθέστερους πυρήνες είναι ο RBF (Radial Basis Function) kernel. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το SVM, για τη δυαδική ταξινόμηση με βάση το δεκατριςδιάστατο διάνυσμα.

2.6.2 Adaptive Boosting

Το AdaBoost αποτελεί ensemble learning μέθοδο, δηλαδή συνδυάζονται διαδοχικά πολλαπλοί, ασθενείς ταξινομητές (weak learners), με σκοπό τη δημιουργία ισχυρότερου μοντέλου. Αρχικά, το AdaBoost δεν αποτελεί μείγμα εμπειρογνομώνων, διότι εκφράζεται ανεξάρτητα από την παρατήρηση. Όλα τα δείγματα του συνόλου θεωρούνται ότι έχουν ίση βαρύτητα, όταν γίνει η εκπαίδευση του πρώτου ταξινομητή, ό,τι ταξινομήθηκε λάθος αποκτά μεγαλύτερη βαρύτητα, ώστε οι επόμενοι ταξινομητές να δώσουν μεγαλύτερη βάση σε αυτά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για έναν αριθμό διαδοχικών ταξινομητών και οι επιμέρους προβλέψεις συνδυάζονται σε μια τελική πρόβλεψη. Με αυτή τη προσέγγιση το AdaBoost σχηματίζει ένα ισχυρό μοντέλο από ασθενείς ταξινομητές. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται το σύνολο δεδομένων στο AdaBoost, για να συγκριθεί με τις υπόλοιπες μεθόδους.

2.6.3 Extreme Gradient Boosting

Το XGBoost αποτελεί κι αυτό ensemble learning μέθοδο και βασίζεται στην τεχνική gradient boosting. Η μέθοδος κατασκευάζει διαδοχικά μοντέλα, τα οποία συνήθως είναι δένδρα αποφάσεων, όπου κάθε δένδρο προσπαθεί να διορθώσει τα λάθη των προηγούμενων. Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης, το XGBoost χρησιμοποιεί τη συνάρτηση κόστους του προβλήματος και υπολογίζει την κατεύθυνση όπου πρέπει να βελτιωθεί η πρόβλεψη. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται το σύνολο δεδομένων στο XGBoost, για να συγκριθεί με τις υπόλοιπες μεθόδους.

2.7 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ανάλυση των εκλύσεων μιας δασικής πυρκαγιάς συναρτήσει του σταδίου στο οποίο βρίσκεται, από διάφορες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν οι κύριες εκπομπές είναι CO, CO₂, CH₄, NH₃ και πτητικές οργανικές ουσίες. Έπειτα έγινε μια εισαγωγή στις μεθόδους με τις οποίες ανιχνεύονται δασικές πυρκαγιές και μια εισαγωγή στα IoT ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και στα κριτήρια αξιολόγησης διάφορων τεχνολογιών επικοινωνίας. Τέλος, αναφέρθηκαν κάποια πρωτόκολλα επικοινωνίας τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την παρούσα εφαρμογή και έγινε μια επεξήγηση διάφορων μεθόδων επιβλεπόμενης μάθησης για ταξινόμηση.

Κεφάλαιο 3ο: Σχετική βιβλιογραφία και υφιστάμενα συστήματα

3.1 Εισαγωγή

Όπως σύντομα έγινε αναφορά στην ενότητα 2.3, η σχετική βιβλιογραφία μπορεί να διακριθεί σε διαφορετικά συστήματα ή αλλιώς διαφορετικές μεθόδους για την ανίχνευση μιας πυρκαγιάς. Η διάκριση γίνεται σε τέσσερις κατηγορίες όπου έχουμε, τα δορυφορικά συστήματα, τα επίγεια οπτικά δίκτυα καμερών, τα εναέρια συστήματα ανίχνευσης με UAVs και τα επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς [9]. Παρόμοια ταξινόμηση κάνουν και οι Carta et al., δίνοντας περισσότερη έμφαση στην ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης [32].

Η κατηγοριοποίηση δεν σημαίνει απαραίτητα πως η λειτουργία τους πρέπει να είναι ανεξάρτητη και επαρκής, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η τάση υβριδικών προσεγγίσεων όπου διαφορετικές πηγές δεδομένων και τεχνολογίες συνδυάζονται για ένα πιο έμπιστο σύστημα. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι κατηγορίες αυτών των συστημάτων είτε ως ερευνητικές είτε ως επιχειρησιακές, δίνεται περισσότερη έμφαση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς αποτελούν το θέμα της παρούσας εργασίας. Η κοινή αξιολόγηση των συστημάτων αυτών γίνεται με βάση τα κριτήρια: α) Χρόνος ανίχνευσης, β) Χωρική κάλυψη, γ) Ενεργειακή κατανάλωση και αυτονομία, δ) κόστος, στ) Απαιτούμενη υποδομή.

3.2 Συστήματα δορυφορικής παρατήρησης και τηλεπισκόπησης

Οι δορυφόροι που παρατηρούν τη γη χρησιμοποιώντας ορατές και υπέρυθρες φασματικές περιοχές για να ανιχνεύσουν ενεργές θερμικές ανωμαλίες, hotspots, καπνό, καμένες εκτάσεις και επίσης παρατηρούν την εξέλιξη μιας υφιστάμενης πυρκαγιάς. Σχετικά συστήματα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τα MODIS, VIIRS, Landsat και GOES [9]. Ιδιαίτερα σημαντική για τον εντοπισμό ενεργών πυρκαγιών είναι η αξιοποίηση των περιοχών του μέσου και μακρού υπέρυθρου φάσματος. Η θερμική ακτινοβολία ενός ενεργού μετώπου αλλάζει σημαντικά τη λαμπρότητα των αντίστοιχων pixels, επιτρέποντας την αναγνώριση θερμικών ανωμαλιών σε σχέση με το περιβάλλον υπόβαθρο. Άλλες φασματικές ζώνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόρριψη ψευδών ενδείξεων που προκαλούνται από νέφη, υδάτινες επιφάνειες, ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και άλλα [9].

Για την επιτήρηση ενός χωρίου από τον δορυφόρο δεν απαιτούνται υποδομές, αυτό είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης. Συνεπώς, οι δορυφόροι μπορούν να επιτηρούν περιοχές απομονωμένες και μη, για τον εντοπισμό εστιών, την παρακολούθηση ενεργών πυρκαγιών, αλλά και την αποτίμηση της καμένης έκτασης μετά από πυρκαγιά.

Ο μεγαλύτερος περιορισμός αυτής της προσέγγισης είναι η μικρή χρονική συχνότητα και η χαμηλή χωρική ανάλυση. Η αξιόπιστη ανίχνευση προϋποθέτει ότι η πυρκαγιά έχει δημιουργήσει αρκετή θερμική ή οπτική υπογραφή, το οποίο συνεπάγεται πως δεν θα καταφέρει να ανιχνεύσει φωτιές μικρότερης κλίμακας που είναι ακόμα στο πρώιμό τους στάδιο [9]. Οι Mohapatra και Trinh αναφέρουν ότι, η ίδια περιοχή παρατηρείται από ορισμένα δορυφορικά μέσα με περίοδο μερικών ωρών, αυτό περιορίζει τη χρήση τους από πραγματικά πρόωπη ανίχνευση [9].

Η Ελλάδα παρουσιάζει το Hellenic Fire System και τον Μάιο του 2026 εκτοξεύτηκαν τέσσερις CubeSats στο πλαίσιο του Ελληνικού Εθνικού Προγράμματος Μικροδορυφόρων. Το σύστημα αναπτύχθηκε από την OroraTech σε συνεργασία με την Ελληνική Κυβέρνηση και τον ESA (European Space Agency), το οποίο αποτελεί την εθνική δορυφορική υποδομή με στόχο την ανίχνευση και

παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών [33]. Μάλιστα τον Ιούλιο του 2026 το σύστημα επέστρεψε την πρώτη θερμική εικόνα πάνω από την Ελλάδα [34]. Αυτό καταδεικνύει ότι η δορυφορική ανίχνευση έχει προχωρήσει από ερευνητικό αντικείμενο και έχει ενσωματωθεί σε υποδομές που μπορούν πλέον να αξιοποιηθούν. Ωστόσο, οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν για αυτό το σύστημα στην αναγνώριση πολύ μικρών εστιών, οδηγούν στην ανάγκη ανάπτυξης επίγειων και εναέριων τεχνολογιών που μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά, ως προς τα δορυφορικά συστήματα.

3.3 Επίγεια οπτικά συστήματα ανίχνευσης

Μια διαφορετική προσέγγιση αποτελούν τα επίγεια οπτικά συστήματα τα οποία τοποθετούνται σε ψηλά σημεία με μεγάλο οπτικό πεδίο. Αυτά τα συστήματα παρέχουν συνεχή εποπτεία του προκαθορισμένου πεδίου και παρέχουν υψηλή χωρική ανάλυση.

Τα χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν το χρώμα, την κίνηση, την υφή και τη μορφολογία του εδάφους σε κάθε εικόνα, δημιουργώντας έτσι μια πολυδιάστατη εικόνα η οποία στις σύγχρονες υλοποιήσεις εισάγεται σε νευρωνικά δίκτυα και ιδιαίτερα σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα [9], [32]. Κύριο υποσύστημα σε αυτή την προσέγγιση αποτελούν οι θερμικές κάμερες, οι οποίες επιτρέπουν την ανίχνευση θερμικών ανωμαλιών ακόμα κι αν δεν υπάρχει επαρκής φωτισμός. Οι Arpani et al., συνδύασαν έναν τέτοιο αισθητήρα θερμικής απεικόνισης (AMG8833), ο οποίος επιστρέφει ένα 8x8 πίνακα με τη θερμοκρασία που λαμβάνει (συνεπώς 64 τιμές), τον μικροελεγκτή Arduino, GPS και ασύρματη επικοινωνία LoRa [35]. Η εργασία τους αποδεικνύει ότι η ανίχνευση μιας τοπικής μεθόδου θερμικής ανίχνευσης παραμένει ανεξάρτητη από την εμβέλεια της επικοινωνίας. Παράλληλα, η ανάπτυξη βαθιών νευρωνικών δικτύων αυξάνει σημαντικά τις δυνατότητες των επίγειων οπτικών συστημάτων. Οι Carta et al. χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις, από μοντέλα YOLOv5, EfficientDet και EfficientNet, ως συνδυασμούς διαφορετικών μοντέλων, επιδιώκοντας να ελαχιστοποιήσουν ψευδείς θετικές περιπτώσεις που προέρχονται από αντικείμενα ή οπτικά φαινόμενα που μοιάζουν με φλόγες, όπως ο ήλιος ή η δύση του ηλίου [32].

Η Pano AI χρησιμοποιεί σταθμούς τοποθετημένους σε υψηλά σημεία, οι οποίοι πραγματοποιούν πανοραμική παρατήρηση 360°. Οι εικόνες αναλύονται από cloud-based μοντέλα για αναγνώριση καπνού και οι πιθανές ανιχνεύσεις επαληθεύονται πριν την αποστολή ειδοποιήσεων. Επιπλέον, το σύστημα αξιοποιεί triangulation για την εκτίμηση των συντεταγμένων ενός συμβάντος [36]. Το InsightFD της Insight Robotics κινείται στο ίδιο πλαίσιο, όπου συνδυάζονται ηλεκτρο-οπτικοί και υπέρυθροι αισθητήρες με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και προηγμένους αλγορίθμους για την ανίχνευση του καπνού [37]. Παρόμοια λογική χρησιμοποιείται στο σύστημα της Torch Systems, με τη διαφορά ότι η προσέγγιση του είναι πολυτροπική καθώς συνδυάζει οπτικά, ηχητικά και περιβαλλοντικά δεδομένα, μάλιστα η πλατφόρμα τους ενσωματώνει δορυφορική και τοπογραφική χαρτογράφηση των κόμβων, το οποίο ουσιαστικά ενσωματώνει ετερογενείς πηγές δεδομένων [38].

Συνολικά, τα επίγεια οπτικά συστήματα μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές εστίες φωτιάς και να καλύψουν μια μεγάλη περιοχή, δεδομένου ότι το υποσύστημα μηχανικής όρασης που χρησιμοποιείται έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η απόδοση τους εξαρτάται από την ορατότητα, την τοπογραφία και την ανάπτυξη ικανής θερμικής υπογραφής. Επίσης, η συνεχής επεξεργασία εικόνας αυξάνει το υπολογιστικό και το ενεργειακό κόστος. Αυτοί οι περιορισμοί οδηγούν στην ανάπτυξη του συστήματος πάνω εναέρια μέσα.

3.4 Εναέρια συστήματα ανίχνευσης με μη επανδρωμένα αεροσκάφη

Τα UAVs αποτελούν έναν ιδιαίτερα ευέλικτο τύπο πλατφόρμας σε σχέση με τα σταθερά οπτικά συστήματα, δεδομένου ότι τα UAVs έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το ύψος, τη θέση και τη διαδρομή τους ανάλογα με την απαίτηση της εκάστοτε αποστολής. Μπορούν να φέρουν φορτία όπως RGB, θερμικές, υπέρυθρες ή πολυφασματικές κάμερες, συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την πρώτη ανίχνευση και επιβεβαίωση ή ακόμα και παρακολούθηση μιας πυρκαγιάς.

Ένα UAV, για παράδειγμα, αντί να παραμένει σε μια θέση όπως ένας σταθερός πύργος, μπορεί να κινηθεί κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος, να αποφύγει τα φυσικά εμπόδια και να συλλέξει δεδομένα από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αυτό, από μόνο του, θα ήταν ένα ισχυρό πλεονέκτημα σε περιοχές με πολύπλοκο ανάγλυφο. Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ενέργειας από τον κινητήρα και το ωφέλιμο φορτίο περιορίζει σημαντικά τη διάρκεια πτήσης. Γενικά, για το λόγο αυτό, ένα UAV δεν είναι η πιο κατάλληλη επιλογή για την αδιάκοπη παρακολούθηση μιας μεγάλης δασικής περιοχής [9].

Οι Ramadan et al. προτείνουν μια υβριδική προσέγγιση όπου συνδυάζονται επίγειοι IoT κόμβοι, οι οποίοι χρησιμοποιούν LoRaWAN και τον BME688, ένα αυτόνομο UAV με οπτική κάμερα και τεχνικές μηχανικής μάθησης [12]. Μάλιστα, αυτή η υβριδική προσέγγιση χρησιμοποιεί το εναέριο μέσο για την επαλήθευση του συναγερμού αλλά και για την μετέπειτα παρακολούθηση της εστίας. Στα πειράματά τους έφτασαν ακρίβεια 99.46% για το μοντέλο ταξινόμησης εικόνας [12].

Το Ευρωπαϊκό έργο TEMA (Trusted Extremely Precise Mapping and Prediction for Emergency Management), παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Συντονίζεται από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και έχει ως στόχο την αυτοματοποίηση της δημιουργίας τρισδιάστατων χαρτών περιοχών φυσικών καταστροφών (πριν, κατά τη διάρκεια και μετά) και εξετάζεται η πρόβλεψη της εξέλιξής τους, σε πραγματικό χρόνο. Ουσιαστικά δημιουργείται digital twin για την περιοχή. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως συνδυάζει ετερογενείς πηγές δεδομένων [39]. Μέσω του έργου αναπτύχθηκε το σύνολο δεδομένων BLAZE, στο οποίο υπάρχουν γύρω στις 5,400 labeled RGB εικόνες από UAV, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από πυρκαγιές. Το BLAZE προορίζεται για προβλήματα ταξινόμησης εικόνων και segmentation καμένων εκτάσεων, επίσης συνοδεύεται από την αξιολόγηση Deep Neural Networks μοντέλων [40]. Τον Ιούλιο του 2026 οι Φωτίου, Μυγδάλης και Πήτας δημοσιεύουν την εργασίας τους, το RoboFireFuseNet, όπου προτείνουν ένα μοντέλο συγχώνευσης RGB και υπέρυθρης εικόνας σε πραγματικό χρόνο [41].

Η χρήση των UAVs μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο στη χωρική παρατήρηση, επιβεβαίωση συμβάντων και παρακολούθηση της εξέλιξης των πυρκαγιών. Ωστόσο, η συνεχής παρατήρηση ενέχει ενεργειακούς περιορισμούς, οι οποίοι μπορούν να λυθούν με την ανάπτυξη επίγειων δικτύων αισθητήρων.

3.5 Επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ίσως η πιο παλιά μέθοδος για την ανίχνευση πυρκαγιών/φωτιάς, από τους ανιχνευτές φωτιάς σε δωμάτια ή ακόμα και σε κτήρια. Η φιλοσοφία αυτής της προσέγγισης είναι πως η εγγύτητα με κάποια πιθανή εστία φωτιάς και η περιοδική αποστολή περιβαλλοντικών μετρήσεων, μπορεί να λειτουργήσει καταλυτικά στην έγκαιρη ανίχνευση και κατάσβεση της φωτιάς. Αυτή η εγγύτητα είναι που επιτρέπει θεωρητικά την αναγνώριση μεταβολών πριν καν αυτές εξελιχθούν σε μεγάλης κλίμακας οπτικό ή θερμικό αποτέλεσμα.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ενεργειακή αυτονομία, καθώς δεν είναι δυνατή η παροχή ενέργειας από το δίκτυο, στο πεδίο εφαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται

κατάλληλος χειρισμός των συστημάτων, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση, ο κύκλος λειτουργίας και να εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές στον κύκλο λειτουργίας (duty cycle). Παράλληλα, η ασύρματη μετάδοση σε δασικό περιβάλλον επηρεάζεται από τη βλάστηση, ενώ η εγκατάσταση πολλών συσκευών ανεβάζει το κόστος συντήρησης.

Οι Arjun και Hanumanthaiiah πρότειναν ιεραρχική WSN αρχιτεκτονική για την έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιών [42]. Κάθε περιοχή οργανώνεται σε ζώνες και περιλαμβάνει low-level κόμβους και cluster heads. Κάθε κόμβος αποτελείται από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, αερίων, ενώ συμπληρωματικά και από υπέρυθρες κάμερες [42]. Αρχικός δείκτης για την ύπαρξη φωτιάς είναι η θερμοκρασία, όταν ξεπεραστεί ένα προκαθορισμένο όριο, ενεργοποιούνται πρόσθετοι αισθητήρες. Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές εξοικονομούν ενέργεια σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας [42].

Πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση παρουσιάζουν οι Dampage et al., όπου οι κόμβοι που τοποθέτησαν καταγράφουν θερμοκρασία, σχετική υγρασία, φωτεινότητα και τη συγκέντρωση CO [43]. Αρχικά, πραγματοποιείται μια ανάλυση αναλογία κατωφλιού στον ίδιο τον κόμβο και τα δεδομένα αποστέλλονται για περαιτέρω ανάλυση όταν υπάρξει σημαντική μεταβολή. Ο κεντρικός σταθμός εφαρμόζει μοντέλο μηχανικής μάθησης, το οποίο εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας 7,000 δείγματα σε fire και no-fire καταστάσεις υπό διαφορετικές συνθήκες [43]. Στην εργασία τους παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα από πραγματικές δοκιμές, όπου το συνολικό σύστημα πέτυχε ακρίβεια 90%, ενώ η αποκλειστική εφαρμογή του μοντέλου μηχανικής μάθησης στα αντίστοιχα πειράματα παρουσίασε ακρίβεια 86.84% [43].

Οι αισθητήρες αερίου για την αναγνώριση της καύσης και άλλων τύπων φωτιάς με χρήση της PLS-DA και της SVM έχουν αναλυθεί από τους Solorzano et al. [10]. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης μπορούν να εκπέμπονται μεγάλες ποσότητες CO και VOCs. Επιπλέον, οι συγγραφείς αναφέρουν δύο σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή συστημάτων αισθητήρων αερίου: η παρεμβολή από ψευδείς πηγές και η μεταβαλλόμενη με τον χρόνο φύση της απόκρισης του συστήματος. Παρά τους περιορισμούς, τα πειράματα που έγιναν έδειξαν ότι τα συστήματα με βάση τους αισθητήρες αερίων, μπορούν να παρέχουν ταχύτερη ειδοποίηση, από τους συμβατικούς ανιχνευτές καπνού [10].

Ιδιαίτερη σημασία για την ελληνική έρευνα έχει το MAESTRO (Managing Forest Fires via IoT Technologies), το οποίο αναπτύχθηκε στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Πρόκειται για ολοκληρωμένο σύστημα τηλεμετρίας, το οποίο εκτιμά τον κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιάς, την ανίχνευσή της και εκτιμά την εξάπλωση αυτής. Η αρχιτεκτονική του αποτελείται από χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης IoT κόμβους, το LoRaWAN στο στρώμα δικτύου και cloud υποδομή για την αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων. Επίσης, οι χρήστες ενημερώνονται έγκαιρα από το σύστημα [44].

Υπάρχουν εμπορικά επίγεια συστήματα αισθητήρων τα οποία έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στο πεδίο, χαρακτηριστικό παράδειγμα το οποίο είναι κοντά στην παρούσα εργασία, αποτελεί το Silvanet της Dryad Networks. Η τρέχουσα γενιά (4^η) χρησιμοποιεί τον BME690 και αισθητήρες για PM2.5 και PM10, ασύρματη επικοινωνία μέσω του LoRaWAN ή δορυφορικής σύνδεσης και η τροφοδοσία των συσκευών γίνεται με φωτοβολταϊκή συλλογή ενέργειας και supercapacitors. Με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης αναγνωρίζεται η υπογραφή μιας πυρκαγιάς, τα στοιχεία του χρόνου και απόστασης ανίχνευσης, όπως και άλλες τεχνικές λεπτομέρειες για το σύστημά τους, αποτελούν προδιαγραφές του κατασκευαστή [45]. Παρόμοια προσέγγιση έχει και η N5 Sensors, όπου ανέπτυξαν ένα σύστημα το οποίο αναγνωρίζει μεταβολές σε PM, CO και άλλα χημικά στοιχεία. Αλγόριθμοι

τεχνητής νοημοσύνης συγκρίνουν τρέχουσες μετρήσεις με το φυσιολογικό περιβάλλον προκειμένου να ανιχνευθεί πυρκαγιά. Η τεχνολογία επικοινωνίας είναι το LTE-M/NB-IoT [46].

Η σύγκριση των μεθόδων αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα, σε κλίμακα από 1 έως 4, όπου το 1 αντιστοιχεί στη χαμηλότερη επίδοση, ενώ το 4 στην υψηλότερη επίδοση για κάθε κριτήριο:

Πίνακας 3.1: Αξιολόγηση μεθόδων για την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών

Κατηγορία	Χρόνος ανίχνευσης	Χωρική κάλυψη	Ενεργειακή αυτονομία	Κόστος υλοποίησης	Απαιτήσεις υποδομής	Κύριος περιορισμός
Satellite	2	4	4	1	1	Χωρική και Χρονική ανάλυση
WCN	4	2	2	3	3	Ορατότητα
UAVs	3	3	1	2	2	Χρόνος Πτήσης
WSN	4	1	3	4	4	Πυκνότητα

3.6 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι κυριότερες τεχνολογικές προσεγγίσεις με τα οποία ανιχνεύονται οι δασικές πυρκαγιές. Τα δορυφορικά συστήματα αποτελούν εξαιρετικά μεγάλη χωρική κάλυψη, εξαιρετικά μεγάλη ενεργειακή αυτονομία και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση πυρκαγιών σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα επίγεια οπτικά δίκτυα προσφέρουν μεγάλη χωρική κάλυψη και ελάχιστο χρόνο ανίχνευσης, καθώς με τη χρήση πολλών ειδών καμερών φέρουν μεγαλύτερη πληροφορία, ενώ με τη χρήση βαθιάς μηχανικής μάθησης είναι δυνατή η αναγνώριση καπνού και φλόγας. Σε αντίθεση με τα UAVs, τα οποία προσφέρουν κινητικότητα και είναι εξαιρετικά για την επιβεβαίωση, ακριβή εντοπισμό και παρακολούθηση της πυρκαγιάς. Η περιορισμένη αυτονομία των UAVs, καθιστά τη χρήση τους δυσκολότερη ως αποκλειστικό μέσο ανίχνευσης και συνεχούς επιτήρησης. Τα WSNs έχουν άμεση επαφή με το περιβάλλον και αξιοποιούν τις μεταβολές από διάφορες ατμοσφαιρικές μεταβλητές για να ανιχνεύσουν πρώιμα μια πυρκαγιά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτή την προσέγγιση έχει, η χρήση μηχανικής μάθησης για την αναγνώριση καύσης, πριν καν αυτή γίνει ορατή. Με βάση της συγκριτική ανάλυση της βιβλιογραφίας, στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένα WSN το οποίο συνδυάζει τόσο το υλισμικό όσο και το λογισμικό αυτής της προσέγγισης, όπου χρησιμοποιείται ο αισθητήρας BME688 για την ανίχνευση, το πρωτόκολλο LoRaWAN και υπάρχει υποδομή cloud για την αποθήκευση, ανάλυση και παρουσίαση των μετρήσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος.

Κεφάλαιο 4ο: Αρχιτεκτονική συστήματος

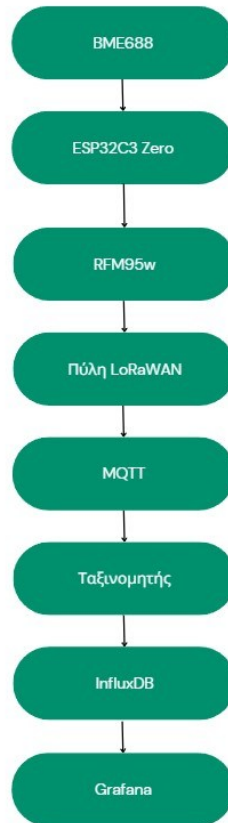
4.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του εν λόγω συστήματος πρώιμης ανίχνευσης πυρκαγιάς. Βασικοί στόχοι του συστήματος είναι οι παρακάτω:

- Η συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων και μετρήσεων σχετικών με τη σύσταση του αέρα από κατανεμημένους κόμβους.
- Η ασύρματη μετάδοση από τους κόμβους μέχρι την πλησιέστερη/ες LoRaWAN πύλη/ες. Αυτός ο στόχος αποτελεί σημαντική πρόκληση, διότι χρειάζεται η πληροφορία να φθάσει, όχι μόνο από τους κόμβους στην εκάστοτε πύλη, αλλά κι από την πύλη στο Διαδίκτυο. Η λύση σε αυτή την πρόκληση είναι η χρήση ασύρματης οπισθοζευκτικής επικοινωνίας (backhaul), το οποίο θα πρέπει να υποστηρίζει η πύλη. Σαν backhaul μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίκτυο κινητής επικοινωνίας, το οποίο έχει κάλυψη στο πεδίο εγκατάστασης του συστήματος.
- Εξαιρετικά σημαντική είναι η αποθήκευση των περιβαλλοντικών δεδομένων συναρτήσει της τοποθεσίας του εκάστοτε κόμβου. Πέρα απ' τα προαναφερόμενα δεδομένα, αποθηκεύονται επίσης και πληροφορίες για το όνομα, ένας δείκτης για το κάθε μήνυμα, ένα ποσοστό που δείχνει πόση διάρκεια έχει ακόμα η μπαταρία, ο δείκτης ισχύος λαμβανόμενου σήματος RSSI (σε dBm), ο λόγος σήματος προς θόρυβο SNR (σε dB), το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του εν λόγω κόμβου. Γενικότερα, είναι σημαντικό σε τέτοιες εφαρμογές να υπάρχει εικόνα για την κατάσταση του συστήματος, αφού βρίσκεται μακριά και σκοπός είναι μείνει για χρόνια εκεί.
- Ένας ακόμη βασικός στόχος, είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Ο κόμβος χρειάζεται να είναι φθηνός στην παραγωγή.
- Κάθε κόμβος χρειάζεται να έχει θετικό κοινωνικό-περιβαλλοντικό ισοζύγιο. Είναι απαραίτητο το ανθρακικό αποτύπωμα, να δικαιολογεί την προστιθέμενη αξία που παρέχει στην προστασία της ανθρώπινης ζωής και των δασικών περιοχών.
- Εν κατακλείδι, χρειάζεται να επεξεργαστούν οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν ούτως ώστε να παρουσιαστούν στον τελικό χρήστη, μέσω γραφικής διεπαφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από την κλήση του μοντέλου μηχανικής μάθησης, για την εκτίμηση παρουσίας φωτιάς, μέρος της επεξεργασίας είναι και η αποσυμπίεση των δεδομένων όταν αυτά προωθούνται στη πλατφόρμα The Things Stack (αυτό γίνεται με τη χρήση του Payload Formatter για την άνω ζεύξη).

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος λήφθηκαν υπόψιν οι ιδιαίτερες συνθήκες του πεδίου, ήτοι η ύπαρξη ανισόπεδου εδάφους, μεσογειακής βλάστησης και άγριων ζώων. Υπό αυτές τις συνθήκες, υιοθετήθηκε μια απλή διαστρωματωμένη προσέγγιση, η οποία αποτελείται από τρία (3) βασικά επίπεδα: το στρώμα ανίχνευσης/αντίληψης, το στρώμα δικτύου και το στρώμα εφαρμογής. Ο διαχωρισμός του συστήματος σε στρώματα δεν υποδηλώνει τη δράση των στρωμάτων ως ανεξάρτητες και αυτόντες οντότητες. Αντιθέτως, τα στρώματα ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω καθορισμένων διεπαφών σχηματίζοντας έτσι μια ενιαία αλυσίδα.

Η ροή δεδομένων του συστήματος είναι σειριακή, ξεκινώντας από τη συλλογή των δεδομένων και τη μετάδοσή τους, μέχρι τη επεξεργασία, αποθήκευση και οπτικοποίηση αυτών. Παρά τον σχετικά απλό σχεδιασμό σε μόλις 3 στρώματα, ο διαχωρισμός σε υποσυστήματα επιτρέπει στην εύκολη αξιολόγηση,



Σχήμα 4.1: Ροή δεδομένων

συντήρηση και επέκταση, αν και όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικότερα το στρώμα ανίχνευσης/αντίληψης, το στρώμα δικτύου και το στρώμα εφαρμογής.

Η συνολική ροή των δεδομένων περιγράφεται στο Σχήμα 4.1.

4.2 Στρώμα ανίχνευσης/αντίληψης

Το στρώμα ανίχνευσης/αντίληψης είναι το σημείο του συστήματος που είναι σε απευθείας επαφή με τις εξωτερικές συνθήκες και το περιβάλλον. Το στρώμα υλοποιείται από καταναμεμημένους αισθητήριους κόμβους, οι οποίοι πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε επιλεγμένα σημεία της δασικής περιοχής. Προηγούμενες ερευνητικές εργασίες έχουν εξετάσει διάφορα ύψη στα οποία βρίσκονται οι αισθητήριοι κόμβοι αλλά και αποστάσεις μεταξύ κόμβων, σε σχετικές εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι Ojo et al. τοποθέτησαν την πύλη LoRaWAN σε ύψος 3 μέτρων, οι κόμβοι εγκαταστάθηκαν σε ύψος περίπου 1.7 μέτρων [47], ενώ οι Sharma et al. τοποθέτησαν τους κόμβους και την κεντρική πύλη σε ύψος 3-4 μέτρα [48]. Στην εργασία των Ramadan et al., η οποία χρησιμοποιεί BME688 και LoRaWAN εγκατέστησαν τους αισθητήριους κόμβους σε ύψος 3 μέτρων και είχαν απόσταση 50 μέτρων μεταξύ τους, στο πλαίσιο της πειραματικής τους διάταξης [12]. Με βάση τα παραπάνω, στην προτεινόμενη χωρική διάταξη που ακολουθεί, οι κόμβοι τοποθετούνται σε ύψος 3 μέτρων και οι πύλες όσο ψηλότερα γίνεται.

4.2.1 Χωρική διάταξη

Η οργάνωση του στρώματος ανίχνευσης θεωρείται μια επαναλαμβανόμενη εξαγωνική διάταξη, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Ενδεικτική διάταξη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με τους κόμβους LoRaWAN περιμετρικά της εξαγωνικής δομής και τις πύλες στα κέντρα των εξάγωνων

Οι εξαγωνικές διατάξεις θα αναφέρονται στο εξής ως κυψέλες επιτήρησης. Η κυψέλη επιτήρησης έχει κατά προσέγγιση στις κορυφές της, τους κόμβους LoRaWAN, ενώ στη μέση υπάρχει μια πύλη LoRaWAN.

Η απόσταση μεταξύ των κόμβων θεωρείται περί τα 80 μέτρα. Γίνεται η παραδοχή δηλαδή, ότι κάθε κόμβος, είναι ικανός για ανίχνευση καύσης σε ακτίνα περίπου 40 μέτρων γύρω από τη θέση του, υπό φυσιολογικές συνθήκες. Η παραδοχή γίνεται για τις ανάγκες της αρχιτεκτονικής σχεδίασης. Η απόσταση αυτή δεν θεωρείται σταθερό χαρακτηριστικό του αισθητήρα BME688, καθώς η ανίχνευση καύσης εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης, το στάδιο της καύσης, τη διεύθυνση και ένταση του ανέμου, τη θέση του αισθητήρα και τη γεωμορφολογία του εδάφους.

Η εξαγωνική γεωμετρία επιλέχθηκε διότι, καθιστά το σύστημα επεκτάσιμο, χωρίς να αλλάζει τη βασική αρχιτεκτονική. Επί της ουσίας δημιουργείται ένα πλέγμα με μια πύλη στο κέντρο κάθε κυψέλης επιτήρησης. Οι κόμβοι στα όρια μιας κυψέλης μπορούν να συμμετέχουν λειτουργικά και στην επιτήρηση γειτονικών κυψελών. Το εμβαδόν του εξάγωνου αν κάθε ακμή του είναι 80 μέτρα:

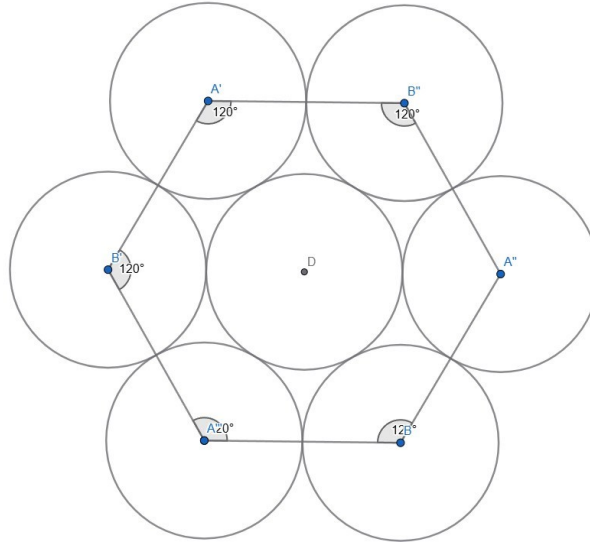
$$E_{hex} = \frac{3\sqrt{3}}{2} * a^2 \approx 16,628 \tau\mu \quad (4.1)$$

Το εμβαδόν όπου μπορεί να ανιχνευθεί καύση από τους αισθητήρες (θεωρώντας ότι ο αισθητήρας συμπεριφέρεται ισοτροπικά) είναι απλά το εμβαδόν 6 κύκλων με ακτίνα 40 μέτρα, δηλαδή:

$$E_{S1} = 6\pi\rho^2 \approx 30,160 \tau\mu \quad (4.2)$$

Το συνολικό εμβαδόν της κυψέλης επιτήρησης (θεωρώντας ότι ο αισθητήρας συμπεριφέρεται ισοτροπικά) είναι:

$$E_{total} = E_{hex} + 6\pi\rho^2 - 2\pi\rho^2 \approx 36,734 \tau\mu \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.3: Γεωμετρική απεικόνιση της κυψέλης επιτήρησης όταν οι αισθητήρες συμπεριφέρονται ισοτροπικά

Εδώ αφήνεται κενό μέσα στην κυψέλη επιτήρησης το οποίο είναι εύκολα υπολογίσιμο αν κανείς εκμεταλλευτεί τη γεωμετρία, δηλαδή θεωρήσει τους 6 κυκλικούς τομείς των 120° , 2 κύκλους με ακτίνα 40 μέτρα, βρει το εμβαδόν και το αφαιρέσει από αυτό της εξίσωσης 4.1:

$$E_{gap} = E_{hex} - 2\pi\rho^2 \approx 6,575 \tau\mu \quad (4.4)$$

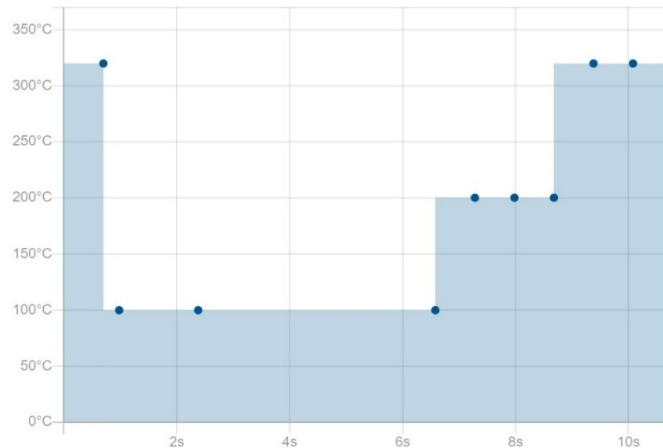
Αξίζει να σημειωθεί ότι, η προτεινόμενη διάταξη δεν μπορεί να εξαλείψει τα κενά που δημιουργούνται, ωστόσο μπορεί να τα περιορίσει. Σαν λύση στο κενό που δημιουργείται στο κέντρο της κυψέλης επιτήρησης, μπορεί επαρκώς να λυθεί με την τοποθέτηση ενός ακόμη αισθητήρα στην πύλη. Το εμβαδόν των κενών που δημιουργούνται μέσα στη κυψέλη επιτήρησης είναι το εξής:

$$E_{gaps} = E_{gap} - \pi\rho^2 \approx 1548 \tau\mu \quad (4.5)$$

Η τελική διάταξη της κυψέλης ανίχνευσης με τα κενά που δημιουργούνται απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Για την τοποθέτηση του συστήματος σε ένα τυπικό δάσος, θα πρέπει (θεωρώντας ότι δεν είναι ανισόπεδο) για να εκτιμηθεί ο αριθμός των κυψελών επιτήρησης να χρησιμοποιηθεί ως εμβαδόν κυψέλης η εξίσωση (4.1).

4.2.2 Αρχιτεκτονική κόμβου

Ο αισθητήριος κόμβος αποτελείται από το μικροελεγκτή, τον αισθητήρα BME688, τον πομποδέκτη RFM95w και μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ιόντων λιθίου στα 3.7V τύπου 18650. Ο αισθητήρας μετρά θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και την ηλεκτρική αντίσταση του μεταλλοξειδωτικού στοιχείου. Η μέτρηση του στοιχείου αυτού, πραγματοποιείται για την ανάλυση της σύστασης του αέρα γύρω απ' τον αισθητήρα. Δεν περιορίζεται σε μια μέτρηση (δηλαδή μια τιμή), αντιθέτως ακολουθεί το Heating Profile 354, ο μικροθερμαντήρας του αισθητήρα πραγματοποιεί 10 διαδοχικές μετρήσεις, όπου κάθε μέτρηση οδηγείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.4: Standard Heating Profile [49]

Το συγκεκριμένο προφίλ αναφέρεται στο φύλλο δεδομένων της Bosch ως Standard Heating Profile [49], στο Σχήμα 4.4 η μέτρηση της αντίστασης λαμβάνεται στις βούλες. Συνεπώς, το συνολικό διάνυσμα αποτελείται από 13 χαρακτηριστικά, αυτό αποστέλλεται στο στρώμα δικτύου και έπειτα για ανάλυση στο στρώμα εφαρμογής και είναι:

$$x = [T, RH, P, Gas_0, Gas_1, \dots, Gas_9] \quad (4.6)$$

Ο αισθητήριος κόμβος απαιτεί τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Αισθητήρας BME688: Μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και σύστασης αέρα συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων και μετρήσεων σχετικών με τη σύσταση του αέρα από καταναμεμημένους κόμβους.
- Μικροελεγκτής: Διαχειρίζεται τις εξωτερικές συσκευές, επεξεργάζεται και κωδικοποιεί τα δεδομένα.
- Πομποδέκτης RFM95w: Επιτρέπει την αποστολή των LoRaWAN πλαισίων στην άνω ζεύξη και τη λήψη LoRaWAN πλαισίων στην κάτω ζεύξη, μέσω της διαμόρφωσης LoRa.
- Αυτόνομη τροφοδοσία κόμβου: Μπαταρία ιόντων λιθίου στα 3.7V, τύπου 18650.
- Stevenson Screen: Αποτελεί το εξωτερικό περίβλημα για τον αισθητήρα. Διασφαλίζει την αξιοπιστία στις μετρήσεις προστατεύοντας τον αισθητήρα από άμεση ακτινοβολία, βροχόπτωση και έντονες ριπές αέρα.

Οι εξωτερικές συσκευές, υποστηρίζουν το διαδεδομένο πρωτόκολλο SPI (Serial Peripheral Interface), το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση. Είναι γρήγορο, σύγχρονο και υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία. Κάθε συσκευή διαθέτει διαφορετική γραμμή επιλογής CS (Chip Select). Το μόνο αρνητικό με το SPI, είναι ότι προαπαιτεί την επιλογή μόνο μιας συσκευής κάθε χρονική στιγμή.

4.3 Στρώμα δικτύου

Το στρώμα δικτύου είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά δεδομένων από του κόμβους στο backend. Η τεχνολογία που επιλέγεται είναι το LoRaWAN πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση LoRa. Το LoRaWAN δίνει επίσης μηχανισμούς σύνδεσης, διευθυνσιοδότησης, ασφάλειας και διαχείρισης. Η τοπολογία LoRaWAN χαρακτηρίζεται ως star-of-stars (τοπολογία αστέρα), ήτοι οι κόμβοι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, ούτε προωθούν πακέτα άλλων συσκευών. Το έργο που επιτελεί μια πύλη είναι η μετατροπή των LoRa πακέτων, σε πλαίσια τα οποία έπειτα προωθεί προς τον εξυπηρετητή δικτύου (Network Server).

4.3.1 The Things Stack

Η πλατφόρμα παρέχει 3 βασικούς ρόλους οι οποίοι βοηθούν στην υλοποίηση μετέπειτα:

- Εξυπηρετητή δικτύου (Network Server)
- Εξυπηρετητή σύνδεσης (Join Server)
- Εξυπηρετητή εφαρμογής (Application Server)

Ο εξυπηρετητής δικτύου παραλαμβάνει πλαίσια που προωθούν οι πύλες (στην υλοποίηση η προώθηση γίνεται με UDP), επαληθεύει ότι ανήκει μια συσκευή στο δίκτυο, απορρίπτει πλαίσια που είναι διπλότυπα και ελέγχει τους μετρητές πλαισίων. Επίσης, κάθε LoRa πακέτο μπορεί να ληφθεί ταυτόχρονα από μια ή περισσότερες πύλες, αυτό φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

Ο Join Server, είναι υπεύθυνος για την αυθεντικοποίηση της συσκευής και για την παραγωγή κλειδιών συνεδρίας. Υπάρχουν 2 διαδικασίες για να ενεργοποιηθεί μια τερματική συσκευή στο LoRaWAN, η διαδικασία Over-The-Air Activation (στο εξής OTAA) και η Activation by Personalization (στο εξής ABP). Ο λόγος ύπαρξης ξεχωριστού υποσυστήματος για την ενεργοποίηση των συσκευών, είναι για να “αποσυμφορηθεί” η επεξεργασία των εισερχόμενων μηνυμάτων από τον Application Server, με λίγα λόγια να είναι διαχωρισμένη. Η ABP πρακτικά παρακάμπτει τον εν λόγω εξυπηρετητή, διότι τα κλειδιά της δεν αλλάζουν, είναι hard coded στη μνήμη της συσκευής. Για λόγους ασφάλειας, αυτή η διαδικασία ενεργοποίησης δεν προτείνεται. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, έχει χρησιμοποιηθεί η OTAA, η οποία περιγράφεται στην ενότητα 4.3.2.

Ο εξυπηρετητής εφαρμογής διαχειρίζεται τα ωφέλιμα δεδομένα που αποστέλλονται. Τα δεδομένα εδώ φθάνουν αποκρυπτογραφημένα, χρησιμοποιούνται τα κλειδιά συνόδου δικτύου (NwkSKey) και εφαρμογής (AppSKey), ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση είναι ο AES-128. Έπειτα, εφαρμόζει τον κατάλληλο payload formatter και καθιστά τα δεδομένα διαθέσιμα σε εξωτερικές εφαρμογές, μέσω Integrations.

Η χρήση του The Things Stack μειώνει σημαντικά το χρόνο υλοποίησης και τον απαιτούμενο κώδικα στο backend διότι παρέχει ένα ενοποιημένο σύστημα για τη διαχείριση του δικτύου.

4.3.2 Ενεργοποίηση κόμβου

Για να είναι εφικτή η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ της πύλης και του κόμβου απαιτείται η ενεργοποίησή του. Όπως αναφέρθηκε στην 4.3.1, οι διαδικασίες για να ενεργοποιηθεί μια συσκευή είναι δύο (όπως ορίζει το πρότυπο LoRaWAN), OTAA και ABP. Αυτές οι διαδικασίες υποστηρίζονται από το The Things Stack, ωστόσο έχουν διαφορές στη σύνδεση, ασφάλεια, διαχείριση κλειδιών και στην ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου.

Στη διαδικασία ενεργοποίησης OTAA, ο κόμβος έχει αρχικά ένα αναγνωριστικό συσκευής με μέγεθος 64 bits το DevEUI (μοναδικό, πρέπει να τηρεί προδιαγραφές IEEE EUI-64), ένα αναγνωριστικό που θα χρειαστεί για να περάσει το Join αίτημα με μέγεθος 64 bits το AppEUI ή JoinEUI (μοναδικό, IEEE EUI-64 διευθύνσεις) και ένα root κλειδί ασφαλείας που χρησιμοποιείται για τη κρυπτογράφηση με μέγεθος 128 bits το AppKey. Το AppKey χρησιμοποιείται και για άλλες διαδικασίες όπως η δημιουργία ασφαλών κλειδιών συνόδου. Στο πρώτο μήνυμα ο κόμβος θα κάνει μια Join αίτηση προς το δίκτυο, αν αυτό επαληθευθεί, τότε το The Things Stack απαντά με Join Accept. Έτσι, δημιουργείται για το συγκεκριμένο κόμβο μια διεύθυνση DevAddr και δυναμικά τα κλειδιά συνόδου που πρέπει να έχει ο κόμβος για τα επόμενα μηνύματα.

```
rx_metadata": [
  {
    "gateway_ids": {
      "gateway_id": "[REDACTED]",
      "eui": "[REDACTED]"
    },
    "time": "2026-04-18T15:50:51.382941Z",
    "timestamp": 3595256588,
    "rssi": -103,
    "channel_rssi": -103,
    "snr": 4,
    "location": {
      "latitude": "[REDACTED]",
      "longitude": "[REDACTED]",
      "altitude": 26,
      "source": "SOURCE_REGISTRY"
    },
    "uplink_token": "[REDACTED]"
  },
  {
    "channel_index": 1,
    "received_at": "2026-04-18T15:50:51.418836771Z"
  }
],
{
  "gateway_ids": {
    "gateway_id": "[REDACTED]",
    "eui": "[REDACTED]"
  },
  "timestamp": 547954148,
  "rssi": -31,
  "channel_rssi": -31,
  "snr": 14.8,
  "frequency_offset": "6184",
  "location": {
    "latitude": "[REDACTED]",
    "longitude": "[REDACTED]"
  }
}
```

Σχήμα 4.5: Τα πεδία gateway_id υποδεικνύουν την ύπαρξη πύλης

Η διαδικασία ενεργοποίησης ΟΤΑΑ καταναλώνει περισσότερη ενέργεια κατά την αρχική σύνδεση, διότι πρέπει να γίνει δεκτός ο κόμβος από το δίκτυο, ήτοι να κάνει το Join αίτημα και μετά να αναμένει το Join Accept σε κάποιο παράθυρο λήψης. Η πρόσθετη ενεργειακή επιβάρυνση αφορά το πρώτο μήνυμα του κόμβου προς το δίκτυο, εκτός αν έχει χαθεί η σύνοδος όπου θα πρέπει να ξαναγίνει η ενεργοποίηση. Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση κόμβων που τροφοδοτούνται με μπαταρία, συνεπάγεται πως για να μην χαθούν τα στοιχεία συνόδου κατά τη διάρκεια βαθύ ύπνου (που γίνεται περιοδικά για εξοικονόμηση μπαταρίας) χρειάζεται να αποθηκεύονται σε μνήμη που διατηρείται κατά τον βαθύ ύπνο ή σε πτητική μνήμη. Σε περίπτωση που χάνονται αυτά τα στοιχεία συνόδου, ο κόμβος καταλήξει να κάνει πολλές προσπάθειες ή αλλιώς αιτήματα Join και μετά από ένα σημείο δεν θα λαμβάνονται υπόψιν τα αιτήματά του. Αυτό γίνεται για να περιοριστούν οι Replay επιθέσεις. Η διαδικασία ενεργοποίησης ΟΤΑΑ, είναι πιο ασφαλής, εύκολα διαχειρίσιμη και προτείνεται από το The Things Stack.

Στη διαδικασία ενεργοποίησης ABP, ο κόμβος συνδέεται απευθείας στο δίκτυο χωρίς να γίνει η χειραγιά Join. Τα κλειδιά που χρησιμοποιούνται βρίσκονται στο firmware του μικροελεγκτή (ή στη μνήμη του) και παραμένουν σταθερά. Αυτά τα κλειδιά είναι η διεύθυνση της συσκευής DevAddr, το κλειδί συνόδου δικτύου NwkSKey και το κλειδί συνόδου εφαρμογής AppSKey. Αυτό σημαίνει ότι ο κόμβος ξεκινά να στέλνει αμέσως δεδομένα, χωρίς να χρειάζεται η αποστολή αίτησης για Join και να περιμένει για Join Accept, με αυτό τον τρόπο γλιτώνει την αρχική κατανάλωση που η OTAA δαπανά. Ωστόσο, εάν εκτεθούν τα κλειδιά η αντικατάστασή τους θα χρειαστεί να γίνει με τον επαναπρογραμματισμό του εκάστοτε κόμβου και από το The Things Stack.

Στην παρούσα εφαρμογή οι κόμβοι τροφοδοτούνται από μπαταρία και αποτελεί σύστημα κρίσιμο για την ανθρώπινη ζωή και τη διατήρηση δασικών οικοσυστημάτων. Για λόγους ασφάλειας, η επιλογή της ΟΤΑΑ δικαιολογείται παρότι υπάρχει ένα μικρό αρχικό ενεργειακό κόστος.

4.3.3 Uplink και downlink υπηρεσίες

Τα μηνύματα που μεταδίδουν οι κόμβοι στην άνω ζεύξη πρέπει να εναρμονίζονται με την Ελληνική νομοθεσία [50] και την Fair Use Policy του δημόσιου The Things Stack Sandbox [51]. Ο περιοριστικός παράγοντας είναι κατά κύριο λόγο η πολιτική του The Things Stack. Οι υπολογισμοί για τον χρόνο

εκπομπής ενός LoRa πακέτου (γνωστό κι ως Time on Air - ToA) προκύπτουν από το άθροισμα των χρόνων εκπομπής του preamble και payload. Η Semtech παρουσιάζει τις εξισώσεις για να βρεθεί ο χρόνος εκπομπής ενός LoRa πακέτου στο φύλλο οδηγιών [52]. Με βάση τις εξισώσεις στο φύλλο οδηγιών, καταλήγω ότι ο εναέριος χρόνος ενός LoRa πακέτου είναι: 164.35ms, το οποίο σημαίνει ότι μια συσκευή μπορεί να μεταδώσει περίπου 182 μηνύματα σε μια ώρα. Από τη στιγμή που κάθε συσκευή μεταδίδει κάθε 520 δευτερόλεπτα μέσα στην ημέρα, πρακτικά έχουν ληφθεί γύρω στα 166 uplink μηνύματα. Αυτό αφήνει επίσης ένα καλό περιθώριο περίπου 2.7 δευτερολέπτων ή περίπου 16 μηνυμάτων, ανά κόμβο σε μια μέρα. Το δημόσιο TTN Sandbox δίνει επίσης και 10 μηνύματα για κάτω ζεύξη.

4.4 Στρώμα εφαρμογής

Το τελευταίο επίπεδο της αρχιτεκτονικής του συστήματος είναι το στρώμα εφαρμογής και είναι υπεύθυνο για την παραλαβή, την επεξεργασία, την αποθήκευση και την παρουσίαση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από του αισθητήριους κόμβους. Σε αντίθεση με το πρώτο στρώμα που αλληλοεπιδρούσε άμεσα με το πεδίο και το στρώμα δικτύου που μετέφερε τα μηνύματα, το στρώμα εφαρμογής μετατρέπει τα δεδομένα σε πληροφορία χρήσιμη για τον τελικό χρήστη. Με βάση αυτή την πληροφορία μπορούν να ληφθούν αποφάσεις, είτε για την επέμβαση κάποιας αρχής με σκοπό την κατάσβεση πιθανής φωτιάς, είτε για τη συντήρηση των απομακρυσμένων συσκευών.

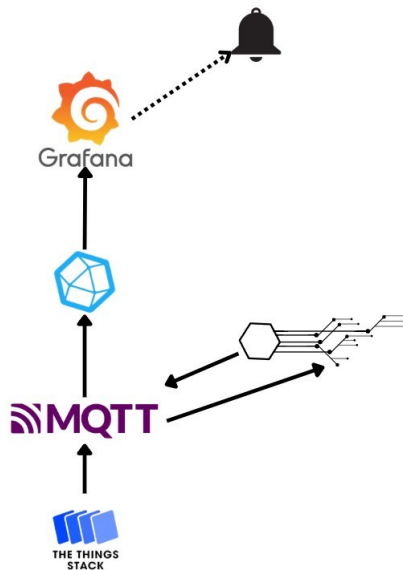
Η είσοδος του στρώματος είναι αποκωδικοποιημένα μηνύματα άνω ζεύξης, που έρχονται από τον εξυπηρετητή εφαρμογής του The Things Stack. Αυτά τα μηνύματα περιέχουν πληροφορίες σε μορφή JSON, υπάρχουν οι περιβαλλοντικές μετρήσεις του κόμβου, συμπληρωματικές πληροφορίες για την αναγνώρισή του, το εναπομείναντα φορτίο της μπαταρίας σε ποσοστό, ο αύξων αριθμός μηνυμάτων για το κόμβο και μεταδεδομένα του δικτύου για την ποιότητα της ασύρματης ζεύξης.

Η μεταφορά από των The Things Stack προς την εφαρμογή επιτυγχάνεται μέσω του πρωτοκόλλου MQTT. Το Things Stack λειτουργεί ως MQTT broker, ενώ η εφαρμογή python (εφαρμογή επεξεργασίας) λειτουργεί ως subscriber. Η εφαρμογή python εγγράφεται στο θέμα δημοσίευσης των μηνυμάτων άνω ζεύξης και ασύγχρονα λαμβάνει κάθε μήνυμα. Το μοντέλο επικοινωνίας δημοσίευση/εγγραφή (publish/subscribe) αποσυνδέει λογικά το στρώμα δικτύου με το στρώμα εφαρμογής.

Μετά την παραλαβή νέου μηνύματος, ελέγχεται η δομή του, έπειτα αναζητείται το πεδίο `decoded_payload`, ούτως ώστε να εξαχθούν οι δεκατρείς μεταβλητές που απαιτούνται από τον ταξινομητή (μοντέλο μηχανικής μάθησης). Αυτές οι μεταβλητές είναι το διάνυσμα χαρακτηριστικών της εξίσωσης 4.6.

Το διάνυσμα αυτό εισάγεται στο ήδη εκπαιδευμένο μοντέλο ταξινόμησης, οι κλάσεις είναι δύο (FIRE, NO_FIRE). Σκοπός του μοντέλου είναι να αναγνωριστούν μοτίβα που σχετίζονται με δεδομένα (διανύσματα χαρακτηριστικών) που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια ελεγχόμενων πειραμάτων καύσης. Η έξοδος του μοντέλου είναι η εκτιμώμενη πιθανότητα ύπαρξης φωτιάς.

Η εκτιμώμενη πιθανότητα ύπαρξης φωτιάς, μαζί με τις περιβαλλοντικές μετρήσεις, το εναπομείναντα φορτίο της μπαταρίας, το αναγνωριστικό του κόμβου και τα μεταδεδομένα της ζεύξης συνενώνονται και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, το ιστορικό κάθε κόμβου διατηρείται και η μελλοντική ανάλυση των μετρήσεων στο χρόνο καθίσταται δυνατή.



Σχήμα 4.6: Η εσωτερική αρχιτεκτονική του στρώματος εφαρμογής

Η γεωγραφική θέση της κάθε συσκευής ανακτάται από το The Things Stack, με την η εφαρμογή να πραγματοποιεί ένα αίτημα στο Device Registry, εφόσον δεν περιλαμβάνεται στο μήνυμα άνω ζεύξης. Οι συντεταγμένες αποθηκεύονται προσωρινά στην cache για να μην γίνονται συνέχεια αιτήσεις για κάθε μήνυμα. Η παραπάνω ακολουθία υλοποιείται στον κώδικα MQTT της εφαρμογής.

Η παρουσίαση των δεδομένων μπορεί να γίνει με τη χρήση γραφικών διεπαφών. Σκοπός είναι ο τελικός χρήστης να μπορεί να παρακολουθήσει την κατάσταση των κόμβων, τις περιβαλλοντικές μετρήσεις, την πιθανότητα πυρκαγιάς, την ποιότητα της ζεύξης και την κατάσταση της μπαταρίας. Εξίσου σημαντικό είναι η οπτικοποίηση διάφορων μετρήσεων, συναρτήσει της τοποθεσίας των κόμβων (πχ σε heatmaps).

Τέλος, πέρα από την οπτικοποίηση επίσης σημαντική είναι η παραγωγή και αποστολή ειδοποιήσεων. Δεν μπορεί να υπάρχει ολόκληρη ανθρώπινη επίβλεψη πάνω στη γραφική διεπαφή. Γι' αυτό αποστέλλεται ειδοποίηση μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου όταν η πιθανότητα υπερβεί το καθορισμένο όριο. Η εν λόγω ειδοποίηση περιέχει το αναγνωριστικό του κόμβου, τη πιθανότητα φωτιάς, ατμοσφαιρικές πληροφορίες (θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση), γεωγραφικό πλάτος και μήκος και την τοποθεσία του κόμβου σε χάρτη. Μια ακόμη ειδοποίηση που είναι ζωτικής σημασίας για το σύστημα, είναι αυτή που αποστέλλεται όταν το φορτίο της μπαταρίας ενός κόμβου πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι η αποστολή ξεχωριστής ειδοποίησης, όταν ένας κόμβος δεν έχει στείλει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Υπάρχει η δυνατότητα για αποστολή ειδοποιήσεων σε λογαριασμούς ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, SMS και σε άλλα δικτυακά μέσα (Slack, Microsoft Teams, Telegram, Discord κ.α.). Η ειδοποίηση μέσω SMS πραγματοποιείται με τη χρήση Webhook.

Το στρώμα εφαρμογής είναι αρθρωτό (modular), συνεπώς τα υποσυστήματά του μπορούν να αναβαθμιστούν ή να αντικατασταθούν, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο κάποια στιγμή. Αυτό καθίσταται εφικτό διότι ο τρόπος επικοινωνίας κάθε διακριτού υποσυστήματος χρησιμοποιεί καθορισμένες διεπαφές. Τα υποσυστήματα στα οποία ισχύει αυτό είναι η υπηρεσία MQTT, ο εκπαιδευμένος ταξινομητής (ή μοντέλο μηχανικής μάθησης), η βάση δεδομένων, η διεπαφή οπτικοποίησης και η υπηρεσία αποστολής ειδοποιήσεων. Η εσωτερική αρχιτεκτονική φαίνεται στο Σχήμα 4.6.

4.5 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκε όσο το δυνατόν, η λογική αρχιτεκτονική του συστήματος πρώιμης ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών και η διάρθρωσή του σε 3 βασικά στρώματα. Με το πρώτο στρώμα να είναι το στρώμα αντίληψης, το οποίο αποτελείται από καταναμεμημένους αισθητήριους κόμβους και αλληλοεπιδρά απευθείας με το περιβάλλον. Κάθε κόμβος αποτελείται από ένα αισθητήρα BME688, ο οποίος συλλέγει θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση καθώς και την πολυδιάστατη υπογραφή της σύστασης του αέρα γύρω του.

Το στρώμα δικτύου, αναλαμβάνει τη μεταφορά των μετρήσεων προς το υπολογιστικό τμήμα του συστήματος. Οι μεγαλύτερες αρμοδιότητες είναι η ασφαλής και ενεργειακά αποδοτική μεταφορά και η διαχείριση των συσκευών στο δίκτυο. Η επικοινωνία γίνεται με τη χρήση του πρωτοκόλλου LoRaWAN, χρησιμοποιούνται πύλες οι οποίες προωθούν πλαίσια στην πλατφόρμα The Things Stack. Η εν λόγω πλατφόρμα παρέχει τους απαραίτητους εξυπηρετητές (δικτύου, σύνδεσης και εφαρμογής) για να διαχειριστεί την ενεργοποίηση των συσκευών (κόμβων), την ασφάλεια και την προώθηση δεδομένων προς εξωτερικές εφαρμογές.

Τέλος το στρώμα εφαρμογής, παραλαμβάνει τα αποκωδικοποιημένα δεδομένα, εισάγει κάποια απ' αυτά στο μοντέλο μηχανικής μάθησης (ταξινομητής), αποθηκεύει στη βάση δεδομένων το αποτέλεσμα, τα αισθητήρια δεδομένα και κάποια μεταδεδομένα από το The Things Stack για κάθε κόμβο. Έπειτα, γίνεται η οπτικοποίηση σε γραφική διεπαφή για τον τελικό χρήστη. Είναι εφικτή επίσης η αποστολή ειδοποιήσεων για πιθανή πυρκαγιά ή άλλα γεγονότα στο χρήστη σε πολλά μέσα. Η συνολική αρχιτεκτονική είναι αρθρωτή και επιτρέπει τη συντήρηση, αναβάθμιση ή ακόμα και αλλαγή τεχνολογιών στα υποσυστήματα. Ειδικότερα στο στρώμα αντίληψης είναι εφικτή και η επέκτασή του, όπου αυτό γίνεται με την τοποθέτηση περισσότερων κόμβων, μαζί με τις αντίστοιχες πύλες.

Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η υλοποίηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Αναλύονται τα εξαρτήματα των κόμβων, η λογική σχεδίαση του κόμβου, το λογισμικό των κόμβων, η μέριμνα για τις συνθήκες του πεδίου και την προστασία του κόμβου, η σχεδίαση της πλακέτας του κόμβου, η εγκατάσταση της πύλης LoRaWAN και η υλοποίηση υπηρεσιών επεξεργασίας, αποθήκευσης, οπτικοποίησης και ειδοποίησης.

Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση

5.1 Εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η λογική αρχιτεκτονική του συστήματος και οι λειτουργίες κάθε στρώματος, θα κινηθεί και η υλοποίηση που επιλέχθηκε. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράφει η πρακτική υλοποίηση των υποσυστημάτων για τη συλλογή, μετάδοση, επεξεργασία, αποθήκευση και παρουσίαση των δεδομένων.

Η υλοποίηση περιλαμβάνει στοιχεία από το υλικό και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Στο πεδίο βρίσκονται οι αισθητήριοι κόμβοι οι οποίοι έχουν για μικροελεγκτή τον ESP32-C3 Zero της Espressif (αναπτυξιακή πλακέτα της Waveshare), τον αισθητήρα BME688 της Bosch, τον πομποδέκτη RFM95w της HopeRF (ο οποίος χρησιμοποιεί το Semtech SX1276 chipset) και μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ιόντων λιθίου. Οι κόμβοι ακολουθούν τοπολογία αστέρα και επικοινωνούν με πύλη LoRaWAN, αυτή αποτελείται από έναν συγκεντρωτή RAK5146 (ο οποίος χρησιμοποιεί το Semtech SX1303 chipset) και ένα μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 4 Model B.

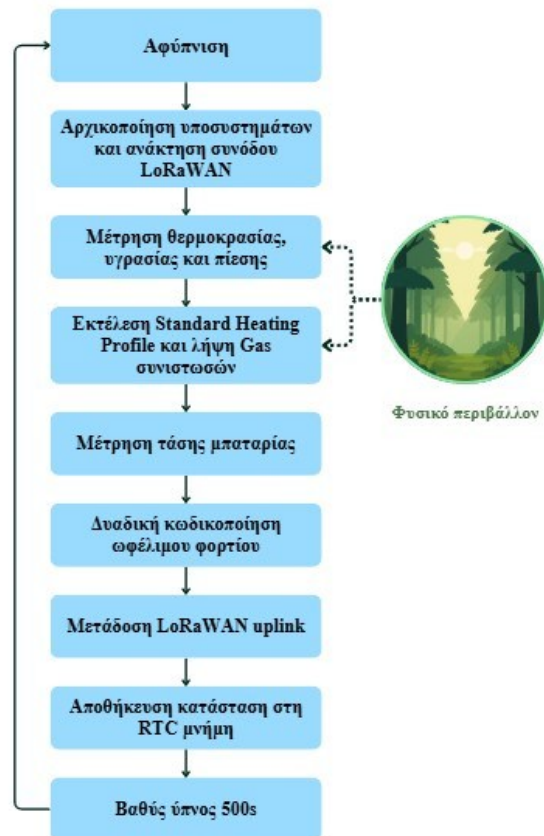
Το επόμενο κομμάτι της υλοποίησης εξετάζει τη χρήση της πλατφόρμας The Things Stack, η οποία αποτελεί τη δικτυακή υποδομή LoRaWAN. Τα μηνύματα που φθάνουν στο The Things Stack αφού χωριστούν σε πεδία με τη χρήση του Payload Formatter, προωθούνται μέσω MQTT σε μια Python εφαρμογή, όπου γίνεται η εκτέλεση του μοντέλου μηχανικής μάθησης (επί της ουσίας, ταξινομητής) και αυτή εξάγει ένα ποσοστό ύπαρξης φωτιάς. Το αποτέλεσμα του μοντέλου και άλλες πληροφορίες αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Ως βάση δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η InfluxDB, ενώ η οπτικοποίηση των δεδομένων γίνεται με την πλατφόρμα Grafana. Το Grafana επίσης είναι υπεύθυνο για την παραγωγή και αποστολή ειδοποιήσεων όταν η πιθανοφάνεια φωτιάς είναι μεγάλη ή κάποιος κόμβος έχει μικρό φορτίο μπαταρίας.

Σκοπός του κεφαλαίου δεν είναι η αξιολόγηση του συστήματος, αλλά η αναλυτική παρουσίασή της υλοποίησης και λειτουργίας του. Η αξιολόγηση με δοκιμές ως προς την επικοινωνία, τα πειράματα καύσης και η ενεργειακή αυτονομία του κόμβου παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.2 Κόμβοι LoRaWAN

Ο αισθητήριος κόμβος ως βασικό στοιχείο συλλογής δεδομένων στο πεδίο, σχεδιάστηκε με γνώμονα την χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, το μικρό μέγεθος, τη δυνατότητα αντοχής στο πεδίο (που είναι δασικές απομονωμένες περιοχές) και την υποστήριξη επικοινωνίας LoRaWAN.

Στα πλαίσια της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE. Μέσω αυτού, μπορούν να ελεγχθούν οι ενέργειες του μικροελεγκτή κατά ένα μεγάλο ποσοστό, όχι όμως απόλυτα. Ο μικροελεγκτής είναι αυτός που σε μεγάλο βαθμό καθορίζει τη ροή των ενεργειών και συνεπώς την κατανάλωση ενέργειας. Για την επικοινωνία με τις συσκευές BME688 και RFM95w χρησιμοποιούνται οι βιβλιοθήκες Bosch-BME68x-Library της boschsensortec [49] και την MCCI LoRaWAN LMIC [53]. Η τελευταία βιβλιοθήκη είναι προϊόν της MCCI, το LMIC σημαίνει LoRaWAN Mac In C και πρόκειται για ένα state machine. Για την αμφίδρομη επικοινωνία του μικροελεγκτή με τις συσκευές στον κόμβο, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο SPI (Serial Peripheral Interface).



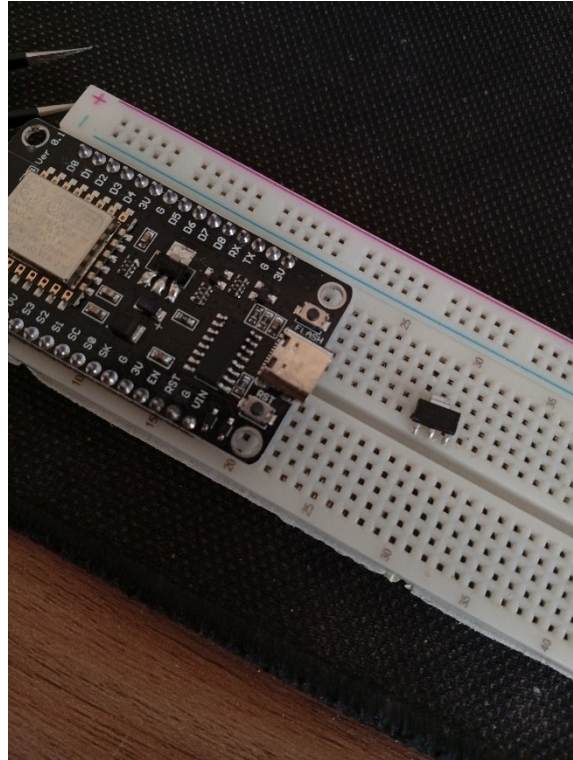
Σχήμα 5.1: Κύκλος λειτουργίας του κόμβου

5.2.1 Προηγούμενες υλοποιήσεις

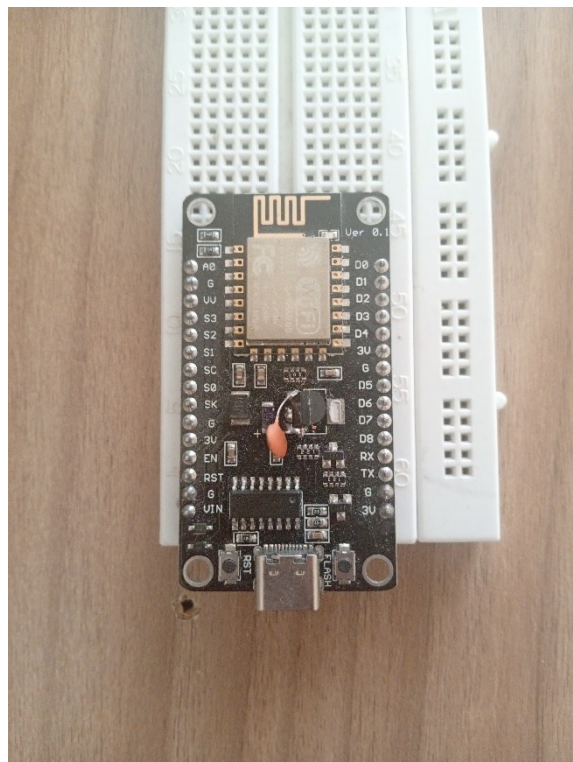
Πριν την κατασκευή της τελικής υλοποίησης του κόμβου, πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές υλοποιήσεις. Οι αρχικές υλοποιήσεις, έγιναν με τη βοήθεια ράστερ και βραχυκυκλωτήρων για να εκτιμηθεί αν τηρούν τους βασικούς στόχους που ορίστηκαν στο 4.1.

Στην πρώτη υλοποίηση έγινε η χρήση του BME688 με τη λειτουργία ισχύος Continuous mode η οποία ενδύκνεται για testing [49], ως μικροελεγκτής μια αναπτυξιακή πλακέτα ESP8266 (NodeMCU), ένα LoRa πομποδέκτη XL1276 (συχνότητα λειτουργίας τα 433MHz) και το Neo-6m gps module. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση ο NodeMCU είχε μεγάλη κατανάλωση ακόμα και κατά τη διάρκεια βαθύ ύπνου. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν η αλλαγή του ρυθμιστή τάσης AMS1117 [54], με έναν MCP1700 [55]. Η αποκόλληση του ρυθμιστή μπορεί να γίνει με τσιμπίδα ή για ένα καλύτερο αποτέλεσμα με κολλητήρι και αρκετό καλάι.

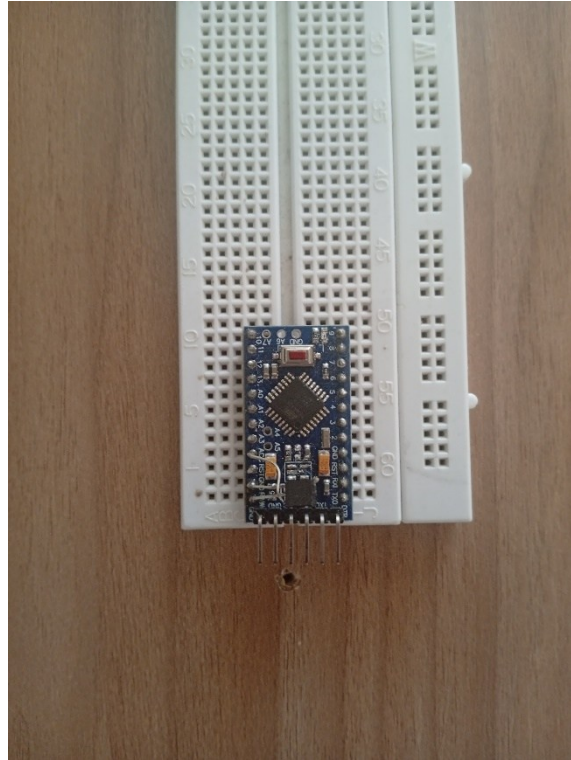
Στις εικόνες 5.2, 5.3, 5.4 φαίνεται ο ρυθμιστής τάσης, ο μικροελεγκτής και η αλλαγή.



Σχήμα 5.2: Ο μικροελεγκτής στα αριστερά και δεξιά ο ρυθμιστής τάσης που υπάρχει πάνω του.



Σχήμα 5.3: Η αλλαγή του ρυθμιστή τάσης.



Σχήμα 5.4: Το Arduino pro mini μετά την αλλαγή του ρυθμιστή τάσης και την αφαίρεση LEDs.

```
Sketch uses 31994 bytes (104%) of program storage space. Maximum is 30720 bytes.
Global variables use 1956 bytes (95%) of dynamic memory, leaving 92 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes.
Sketch too big; see https://support.arduino.cc/hc/en-us/articles/360013825179 for tips on reducing it.
text section exceeds available space in board

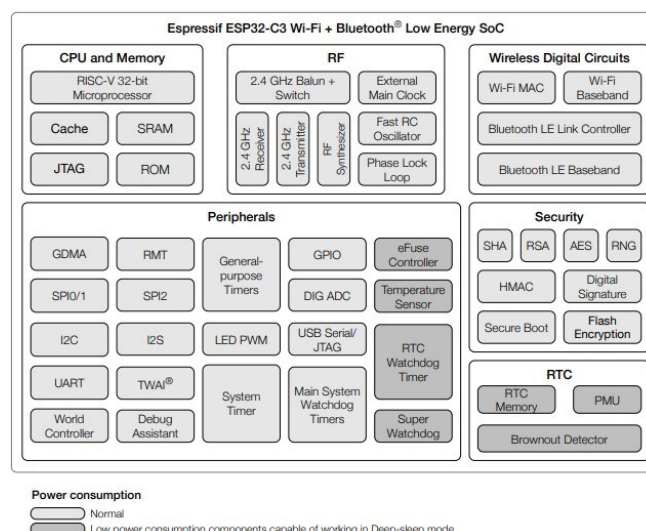
Compilation error: text section exceeds available space in board
```

Σχήμα 5.5: Η βελτιστοποίηση σε σχέση με τις μνήμες του Arduino pro mini

Ωστόσο το πραγματικό πρόβλημα εδώ δεν ήταν μόνο το μεγάλο ρεύμα ηρεμίας του ρυθμιστή (Quiescent current) ή η τάση αποκοπής (Dropout voltage) του, αλλά η χρήση GPS ενώ ο κόμβος θεωρείται στάσιμος. Μεγάλο πρόβλημα στην κατανάλωση είναι επίσης και η συνεχής λειτουργία του αισθητήρα η οποία είναι ενεργοβόρα. Τα δεδομένα που συλλέγονταν σε αυτή την υλοποίηση ήταν θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και η ηλεκτρική αντίσταση του μεταλοξειδωτικού στοιχείου.

Κατά τη δεύτερη υλοποίηση, χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής Arduino pro mini 3v3 (ο οποίος αποτελεί πλακέτα ανάπτυξης με βάση το μικροελεγκτή της Atmel ATMEGA328). Εδώ οι κινήσεις ήταν σχετικά παρόμοιες, δηλαδή αλλαγή του ρυθμιστή τάσης με τον MCP1700 και η αφαίρεση όλων των φωτοδίοδων από το μικροελεγκτή.

Οι κρίσιμες αλλαγές ήταν η αφαίρεση του gps module, η αφαίρεση φωτοδίοδων από τον BME688, η χρήση της standard gas scan λειτουργίας [49] και η αλλαγή σε εγκεκριμένο LoRa πομποδέκτη RFM95w (συχνότητα λειτουργίας 868MHz). Στην αρχή δοκιμάστηκε το υποσύστημα ραδιοδιάδοσης, όπου η κατανάλωση ήταν εξαιρετικά χαμηλή. Έπειτα ο αισθητήρας με τη standard gas scan λειτουργία, ο αισθητήρας καταναλώνει περισσότερο από το μικροελεγκτή κάτι που είναι αναμενόμενο. Κατά τη φόρτωση του firmware στο μικροελεγκτή με όλα τα υποσυστήματα, δεν υπήρχε αρκετός χώρος ούτε στις RAM και ROM μνήμες. Έγινε η προσπάθεια να ξαναγραφτεί ο κώδικας και να βελτιστοποιηθεί,



Σχήμα 5.6: Λειτουργικό διάγραμμα του SoC ESP32-C3 [56].

αλλά και να περιοριστεί το μέγεθος των βιβλιοθηκών πέρα από αυτή του LoRaWAN, διότι αποτελεί state machine κι απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Τα αποτελέσματα της μείωσης εικονίζονται στο Σχήμα 5.5.

Η λύση με τον Arduino pro mini θα ήταν ιδανική, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης 40μΑ σε λειτουργία βαθύ ύπνου και περίπου 3mA σε Active Mode.

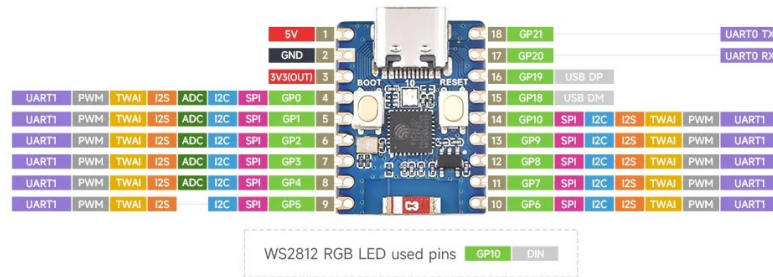
5.2.2 Μικροελεγκτής ESP32-C3 Zero

Μετά τις δοκιμές και αρκετά πρωτότυπα, ως κεντρική μονάδα του αισθητήριου κόμβου επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής ESP32-C3 Zero της Espressif (αναπτυξιακή πλακέτα Waveshare). Η συγκεκριμένη πλακέτα επιλέχθηκε διότι έχει μικρό μέγεθος, υποστηρίζει λογική 3.3V, έχει τους απαραίτητους ακροδέκτες για να συνδεθούν τα 3 υποσυστήματα (RFM95w, BME688, μετρητής τάσης μπαταρίας) και έχει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση στη λειτουργία βαθύ ύπνου. Το διάγραμμα λειτουργιών του εν λόγω μικροελεγκτή φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

CPU και μνήμη: Η αναπτυξιακή πλακέτα είναι βασισμένη στο μικροελεγκτή ESP32-C3 της Espressif ο οποίος έχει ένα μονοπύρηνιο 32bit μικροεπεξεργαστή με RISC-V αρχιτεκτονική. Ο επεξεργαστής εκτελεί τον αλγόριθμο και συντονίζει τις λειτουργίες των υποσυστημάτων. Η στατική RAM 400kB όπου εκεί αποθηκεύονται οι μεταβλητές και προσωρινά δεδομένα κατά την εκτέλεση του προγράμματος, μια μνήμη ROM 348kB όπου αποθηκεύεται το πρόγραμμα εκκίνησης και βασικές λειτουργίες του συστήματος, η κρυφή μνήμη cache και τέλος μια διεπαφή JTAG.

Περιφερειακά: Η αναπτυξιακή πλακέτα ESP32C3 Zero διαθέτει 18 ακροδέκτες, εκ των οποίων οι 15 είναι προγραμματιζόμενοι GPIO επιτρέποντας έτσι το χειρισμό περιφερειακών συσκευών, η λογική τάση είναι 3.3V. Οι διεπαφές που υποστηρίζονται είναι:

SPI (3), I2C (1), UART (2), ADC (2), GPIO ακροδέκτες εισόδου/εξόδου, 2 ADC κανάλια, PWM και σειριακή USB/JTAG. Στην υλοποίηση δεν χρησιμοποιούνται όλες οι διαθέσιμες μονάδες, αλλά ο δίαυλος SPI, ο μετατροπέας ADC, ο χρονιστής RTC και η διεπαφή USB.



Σχήμα 5.7: Διάταξη ακροδεκτών και διαθέσιμες λειτουργίες της αναπτυξιακής πλακέτας ESP32-C3-Zero [57].

Συγκεκριμένα ο SPI δίαυλος χρησιμοποιείται από κοινού για την επικοινωνία με τον BME688 και τον RFM95W. Οι συσκευές μοιράζονται τις κοινές γραμμές SCK (Serial Clock), MOSI (Master Out, Slave In), MISO (Master In, Slave Out) και έχουν ξεχωριστές γραμμές επιλογής CS (Chip Select). Όταν χρησιμοποιείται μια συσκευή, ο μικροελεγκτής πρέπει να διατηρεί ανενεργή τη γραμμή επιλογής της άλλης.

Ο μετατροπές ADC χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της τάσης της μπαταρίας. Χρησιμοποιείται το GPIO1, το οποίο αντιστοιχεί στο ADC1_CH1, το οποίο συνδέεται με την έξοδο του διαιρέτη τάσης. Τα υπόλοιπα σήματα φαίνονται στο Σχήμα 5.7, ενώ οι συνδέσεις στο παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 5.1: Συνδέσεις του μικροελεγκτή με τα υποσυστήματα

GPIO	Λειτουργία
0	RFM95W Reset
1	Μέτρηση μπαταρίας
2	RFM95W DIO0
3	RFM95W DIO1
4	SPI MISO
5	SPI SCK
6	SPI MOSI
7	RFM95W NSS
8	BME688 CS

Το ESP32C3 διαθέτει ενσωματωμένες λειτουργίες Wi-Fi και Bluetooth Low Energy (BLE). Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει το πρότυπο Wi-Fi 4 (ή 802.11 b/g/n) και το BLE έκδοσης Bluetooth 5. Οι εν λόγω λειτουργίες δεν χρησιμοποιούνται, καθώς η μετάδοση πραγματοποιείται μέσω του RFM95W. Κατά την εκκίνηση του firmware απενεργοποιούνται, για να μην υπάρχει πρόσθετη κατανάλωση και για να αποφεύγεται η άσκοπη ενεργοποίηση του ραδιοσυστήματος της πλακέτας.

Διαθέτει LDO ρυθμιστή τάσης ME6217C33M5G [58], ο οποίος παρακάμπτεται διότι έχει μεγαλύτερη κατανάλωση από το ρυθμιστή τάση MCP1700. Αυτό γίνεται με τη τροφοδοσία της πλακέτας από τον MCP1700, στην τρίτη ακίδα.

Στα πλεονεκτήματα του ESP32-C3 Zero περιλαμβάνονται οι επαρκείς πόροι μνήμης, η λειτουργία του στα 3.3V, η υποστήριξη βαθύ ύπνου, η χαμηλή κατανάλωση, το μικρό μέγεθος και η υποστήριξη στο περιβάλλον Arduino. Η διεπαφή USB διευκολύνει την ανάπτυξη διότι, κάνει πιο εύκολο τον προγραμματισμό και την αποσφαλμάτωση.

Στα μειονεκτήματα του ESP32-C3 Zero περιλαμβάνονται η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με έναν απλούστερο μικροελεγκτή, τα ενσωματωμένα υποσυστήματα ραδιοδιάδοσης που δεν χρησιμοποιούνται. Παρ' όλα αυτά, η επιλογή του κρίθηκε καταλληλότερη από το άλλες αναπτυξιακές πλακέτες όπως NodeMCU και Arduino pro mini.

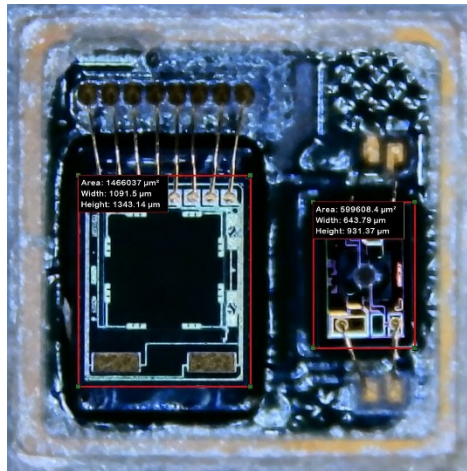
5.2.3 Αισθητήρας Adafruit BME688

Για τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα BME688 της Adafruit. Ο BME688 είναι ολοκληρωμένος περιβαλλοντικός αισθητήρας, με την έννοια ότι, μετρά θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση, ενώ παράλληλα έχει ένα μεταλλοξειδωτικό στοιχείο για τη μέτρηση της σύστασης του αέρα ως ηλεκτρική αντίσταση. Το εύρος τη τάσης τροφοδοσίας είναι από 1.71V-3.6V [49]. Ο αισθητήρας έχει εξαιρετικά μικρό μέγεθος στα 3mm x 3mm. Το στοιχείο αερίων παρουσιάζει καλή ευαισθησία σε πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), πτητικές ενώσεις θείου (VSCs) και σε άλλα αέρια όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο [49]. Έχει αρκετές επιλογές λειτουργίας, όπως εικονίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.2: Επιλογές για τη λειτουργία του BME688 [49]

BSEC power mode	Update rate	Average Current consumption
Standard Gas scan mode	1/10.8s	3.96 mA
Ultra-low power mode (ULP)	3.3 mHz	90 μ A
Quick Ultra-low power mode (q-ULP)	0.33 Hz (T,p,h) / 3.3 mHz (IAQ)	100 μ A
Low power mode (LP)	0.33 Hz	900 μ A
Continuous mode	1 Hz	12 mA

Ο αισθητήρας υποστηρίζει την ενσύρματη επικοινωνία με τα πρωτόκολλα I2C και SPI. Η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται με το ενσύρματο πρωτόκολλο SPI, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2. Η δομή των υποσυστημάτων του αισθητήρα, κάτω από το μεταλλικό περίβλημα για την προστασία τους, εικονίζεται στο Σχήμα 5.8.



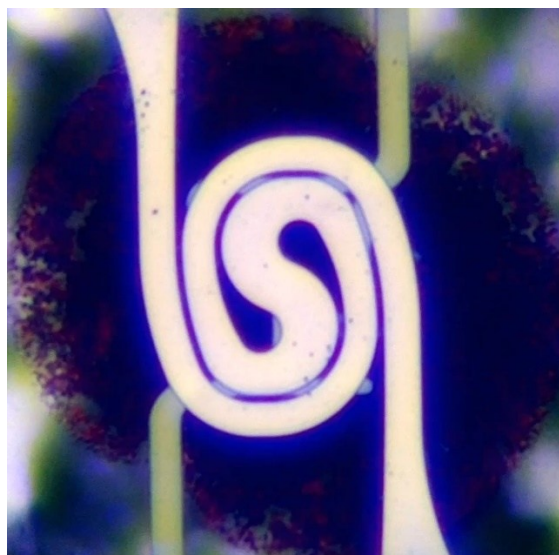
Σχήμα 5.8: Τα εσωτερικά υποσυστήματα, το αριστερό κομμάτι αντιστοιχεί στο TRH υποσύστημα ενώ το δεξιά στο Gas [59].

Όπως φαίνεται στο κέντρο του αριστερού κόκκινου χωρίου είναι το υποσύστημα για τη συλλογή ατμοσφαιρικής πίεσης, ο αισθητήρας για την θερμοκρασία βρίσκεται δεξιά απ' αυτό ενώ ο αισθητήρας για τη συλλογή της σχετικής υγρασίας είναι οι δύο πλάκες κάτω από τον αισθητήρα πίεσης.

Ο αισθητήρας αερίων βρίσκεται στο δεξιό κόκκινο χωρίο. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας ενσωματώνονται σε κοινό MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) die, το αεριοευαίσθητο στοιχείο βρίσκεται σε ξεχωριστό die, κάτω από το MEMS τμήμα βρίσκεται το ASIC που αναλαμβάνει τον έλεγχο, την αντιστάθμιση και την επικοινωνία με το εξωτερικό σύστημα [60].

Το αεριοευαίσθητο στοιχείο βασίζεται σε μεταλλοξειδωτικό υλικό, η επιφάνεια του θερμαίνεται από ενσωματωμένο μικροθερμαντήρα και αλληλεπιδρά με τα αέρια γύρω του. Η αλληλεπίδραση αυτή μεταβάλλει την ηλεκτρική αγωγιμότητα συνεπώς και την ηλεκτρική αντίσταση που μετρά ο αισθητήρας. Ο μικροθερμαντήρας φαίνεται στο Σχήμα 5.9.

Η ηλεκτρική αντίσταση δεν δύναται να αντιστοιχηθεί μονοσήμαντα σε μια συγκεκριμένη χημική ένωση, πόσω μάλλον όταν η συγκέντρωση είναι μεταβλητή. Διαφορετικά αέρια μπορούν να προκαλέσουν παρόμοια απόκριση, ενώ η μέτρηση επηρεάζεται από πολλές συνιστώσες όπως η θερμοκρασία, υγρασία, γήρανση του αισθητήρα και το ιστορικό της έκθεσης. Η αξιοποίηση του BME688 βασίζεται στη δημιουργία πολυδιάστατης υπογραφής. Ο μικροθερμαντήρας οδηγείται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα όπου σε κάθε βήμα λαμβάνεται μια τιμή αντίστασης. Η θερμοκρασία και ο χρόνος όπου υπάρχει αυτή η θερμοκρασία, επηρεάζει τις διαδικασίες της προσρόφησης (adsorption) και εκρόφησης (desorption) των μορίων στην επιφάνεια του αισθητήρα [61]. Οι μετρήσεις σε διαφορετικά βήματα περιέχουν συμπληρωματική πληροφορία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα αναγνώρισης προτύπων. Αυτό είναι εξαιρετικά χρήσιμο για την ανίχνευση καύσης. Ο καπνός από την καύση βιομάζας είναι χημικά σύνθετος και αποτελείται από οργανικούς ατμούς, αιωρούμενα σωματίδια (PM2.5, PM10) και μίγμα αερίων. Η ακριβής σύνθεσή του εξαρτάται από το στάδιο της φωτιάς, την καύσιμη ύλη, τη θερμοκρασία, την παροχή οξυγόνου και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μεταξύ άλλων, στις εκπομπές περιλαμβάνονται πτητικές και ημιπτητικές οργανικές ενώσεις, στις οποίες ο MOX αισθητήρας μπορεί να παρουσιάσει απόκριση [61].



Σχήμα 5.9: Ο μικροθερμαντήρας του αεριοευαίσθητου στοιχείου, η τροφοδοσία του συγκλίνει με το πλάτος της τροχιάς να είναι γύρω στα 10 μ m [59]

Στην παρούσα υλοποίηση, όπως είχε προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιείται το Standard Gas Scan γνωστό και ως Heating Profile 354 [49] σε κάθε βήμα συλλέγεται και μια Gas συνιστώσα, το προφίλ εικονίζεται στο Σχήμα 4.4. Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Βήματα του Heating Gas Profile 354

Βήμα	Θερμοκρασία (°C)	Διάρκεια (ms)
0	320	700
1	100	280
2	100	1400
3	200	4200
4	200	700
5	200	700
6	200	700
7	320	700
8	320	700
9	320	700

Το προφίλ εκτελείται σε sequential mode και ελέγχεται ο δείκτης gas_index ώστε να αποθηκευτεί έγκαιρα η μέτρηση. Μια τιμή θεωρείται έγκυρη αν και μόνο αν, έχουν ενεργοποιηθεί οι σημαίες νέων δεδομένων, σταθεροποίησης του μικροθερμαντήρα και εγκυρότητας της μέτρησης.

Πριν εκτελεστεί το προφίλ λαμβάνονται πρώτα οι τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης σε forced mode. Η μέτρηση αυτών των τιμών καθώς εκτελείται η Standard Gas Scan, εισάγει θόρυβο. Αυτή η διάκριση είναι που επιτρέπει την καταγραφή των περιβαλλοντικών μετρήσεων, χωρίς να λαμβάνονται συνεχώς (σε κάθε βήμα), οι τιμές από τους καταχωρητές θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι είναι δυνατή η δημιουργία ενός προσαρμοσμένου προφίλ (αυτό προκύπτει ανάλογα την εφαρμογή), συνεπώς δεν είναι αναγκαστικό να ακολουθήσει κανείς το Standard Gas Scan.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του BME688 είναι το μικρό μέγεθος, η δυνατότητα μέτρησης τεσσάρων περιβαλλοντικών μεταβλητών, ο προγραμματιζόμενος μικροθερμαντήρας και η ψηφιακή διεπαφή που περιορίζει την ανάπτυξη εξωτερικού αναλογικού κυκλώματος προσαρμογής.

Τα μειονεκτήματα του BME688 είναι η μη εκλεκτική απόκριση, η πιθανή μετατόπιση της απόκρισης με το χρόνο και η κατανάλωση της λειτουργίας Standard Gas Scan. Η αξιοπιστία του συστήματος εξαρτάται όχι μόνο από τον αισθητήρα, αλλά και από την ποιότητα του συνόλου εκπαίδευσης.

5.2.4 Πομποδέκτης RFM95W

Ο πομποδέκτης RFM95W της HOPERF χρησιμοποιήθηκε για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων. Η μονάδα είναι βασισμένη στην οικογένεια ολοκληρωμένων SX127x και υποστηρίζει τη LoRa διαμόρφωση στις υπο-GHz ζώνες ραδιοσυχνότητας. Ο πομποδέκτης υποστηρίζει τις ζώνες 868MHz/915MHz, SF6-SF12 και εύρος ζώνης 125kHz-500kHz [62]. Η τάση λειτουργίας είναι 1.8V-3.7V, ενώ το ρεύμα σε κατάσταση ύπνου είναι περί τα 200 nA και κατά τη λήψη είναι τυπικά 10.3-12.6 mA [62]. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η ζώνη 868 MHz κατάλληλη για την ευρωπαϊκή ζώνη SRD (Short-Range Devices) EU868 και ειδικότερα συχνότητες εντός της υποζώνης 868-868.6 MHz. Είναι εναρμονισμένη σε ευρωπαϊκό επίπεδο για τη λειτουργία μη εξειδικευμένων συσκευών μικρής εμβέλειας [63]. Η χρήση της συγκεκριμένης ζώνης στην Ελλάδα καθορίζεται από τις απαιτήσεις διεπαφής ραδιοεξοπλισμού της EETT [50]. Η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται με το ενσύρματο πρωτόκολλο SPI, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1. Οι βασικές παράμετροι που ορίζονται στο firmware αναγράφονται στον Πίνακα 5.4:

Πίνακας 5.4: LoRaWAN παράμετροι στο firmware

Παράμετρος	Τιμή
Περιοχή λειτουργίας	EU868
Spreading Factor	SF8
Εύρος ζώνης	125 kHz
Coding Rate	4/5
Ισχύς Εκπομπής	12 dBm
ADR	Απενεργοποιημένο
Link Check	Απενεργοποιημένο
Uplink	Unconfirmed
Θύρα Εφαρμογής	1

Η στοίβα LoRaWAN υλοποιείται στον μικροελεγκτή μέσω της βιβλιοθήκης MCCI LMIC. Ο RFM95W δεν λειτουργεί αυτόνομα ως LoRaWAN modem, εκτελεί όμως τις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης και του μικροελεγκτή.

Υπάρχει η επιλογή της ενεργοποίησης του μηχανισμού Adaptive Data Rate (ADR). Ο μηχανισμός ADR βελτιστοποιεί το ρυθμό μετάδοσης, τον εναέριο χρόνο και την κατανάλωση ενέργειας, προσαρμόζοντας την ισχύ μετάδοσης, τον SF και το εύρος ζώνης [64]. Ο λόγος που είναι απενεργοποιημένος είναι για να παραμείνουν σταθερές οι υπόλοιπες παράμετροι και να είναι γνωστός ο χρόνος ζωής της συσκευής.

Τα μηνύματα μεταδίδονται χωρίς επιβεβαίωση. Η επιλογή αυτή πρακτικά περιορίζει τις μεταδόσεις κάτω ζεύξης και αποφεύγει τη αποστολή επιβεβαίωσης για κάθε περιβαλλοντική μέτρηση. Συνεπώς, η απώλεια ενός μηνύματος καθίσταται αποδεκτή, διότι θα υπάρξει νέα μέτρηση στον επόμενο κύκλο. Οι απώλειες μπορούν να εντοπιστούν, από τη διαφορά του αύξων αριθμού που αποστέλλεται στο ωφέλιμο φορτίο με τη μεταβλητή FCnt (Frame Counter). Για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις στην προτεινόμενη διάταξη, προτείνεται ένα διάστημα μετάδοσης μεγαλύτερο των 20s.

Τα πλεονεκτήματα του RFM95W είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή ευαισθησία λήψης, η επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας και η υποστήριξη από βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα.

Οι περιορισμοί του RFM95W είναι ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων, οι περιορισμοί εναέριου χρόνου και η ανάγκη κατάλληλης κεραίας.

Ο τελευταίος περιορισμός λύνεται μερικώς, με τη χρήση της breakout πλακέτας RFM95W LoRa Breakout Board της Elecrow [65]. Η πλακέτα καθιστά προσβάσιμους τους ακροδέκτες του πομποδέκτη οι οποίοι έχουν pitch 0.1 in και λύνει το πρόβλημα της κεραίας με τη σύνδεση SMA.

5.2.5 Τροφοδοσία και διαχείριση ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.2, η τροφοδοσία του κόμβου πραγματοποιείται από μπαταρία ιόντων λιθίου τύπου 18650, στα 3.6V και με χωρητικότητα 3350mAh. Η επιλογή αυτή έγκειται στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και την δυνατότητα επαναφόρτισης που έχουν αυτού του είδους οι μπαταρίες. Η μπαταρία είναι η Samsung SDI INR18650-35E, τύπου 18650. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρείας, το στοιχείο διαθέτει ονομαστική τάση 3.6V και ελάχιστη χωρητικότητα 3350 mAh, ενώ η μέγιστη τάση είναι 4.2V (αυτή θεωρείται η 100% φορτισμένη) και η τάση αποκοπής καθορίζεται στα 2.65V [66]. Για την παροχή σταθερής τάσης 3.3V στο κύκλωμα χρησιμοποιείται ο ρυθμιστής τάσης MCP1700. Ο ρυθμιστής επιλέχθηκε λόγω του χαμηλού ρεύματος ηρεμίας και της μικρής τάσης αποκοπής (Low Dropout Offset LDO) [55].

Στην είσοδο του και την έξοδο του ρυθμιστή κολλήθηκαν όσο πιο κοντά γίνεται οι πυκνωτές σταθεροποίησης τάσης, οι οποίοι βοηθούν και στην απόκριση απότομων μεταβολών του ρεύματος [55]. Πρακτικά υπάρχει μια σταθερή γραμμή των 3.3V (rail) που τροφοδοτεί τον μικροελεγκτή, τον αισθητήρα και τον πομποδέκτη.

Η τάση της μπαταρίας παρακολουθείται μέσω διαιρέτη τάσης. Ο διαιρέτης τάσης αποτελείται από αντιστάσεις 1MΩ και 330kΩ και η έξοδος του τροφοδοτείται στο GPIO1. Παράλληλα από την 330kΩ έχει τοποθετηθεί ένας κεραμικός πυκνωτής 100nF. Αυτός δρα ως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο RC, ο πυκνωτής βλέπει συνολική αντίσταση 1MΩ || 330kΩ που είναι περίπου 248kΩ, άρα η συχνότητα αποκοπής υπολογίζεται:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \approx 6.4 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

Η τάση που εισέρχεται στον ADC του μικροελεγκτή δίνεται από την σχέση:

$$V_{ADC} = V_{BAT} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

Με απλούς υπολογισμούς συνάγεται η τάση της μπαταρίας:

$$V_{BAT} = V_{ADC} \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 4.0304 * V_{ADC} \quad (5.3)$$

Ο ADC λειτουργεί με ανάλυση 12bit και εξασθένιση 11 dB. Για τον περιορισμό του θορύβου, λαμβάνονται τέσσερα δείγματα και η τελική τιμή είναι ο μέσος όρος αυτών. Από την υπολογισμένη τάση, προκύπτει ένα ποσοστό φόρτισης. Το 100% αντιστοιχεί στην τάση 4.25V, ενώ το 0% στη τάση 3.35V. Οι ενδιάμεσες τιμές υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή ήτοι:

$$Battery_{\%} = \frac{V_{BAT} - 3.35}{4.25 - 3.35} * 100 \quad (5.4)$$

Η μέθοδος αυτή αποτελεί εκτίμηση και όχι ακριβή υπολογισμό της εναπομείνουσας χωρητικότητας, καθώς η καμπύλη εκφόρτισης της μπαταρίας λιθίου δεν είναι γραμμική. Συν τοις άλλοις, δεν βρέθηκε η καμπύλη εκφόρτισης της μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση. Ωστόσο, παρέχεται μια επαρκής ένδειξη για την αποτύπωση της κατάστασης του κόμβου και ωφελεί στη δημιουργία ειδοποιήσεων για τη συντήρησή του.

Η σημαντικότερη τεχνική για να επιτευχθεί μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κόμβου, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η περιοδική λειτουργία. Όπως φάνηκε στο Σχήμα 5.1, ο μικροελεγκτής παραμένει ενεργός (με όλα του τα εγγενή συστήματα ραδιοδιάδοσης απενεργοποιημένα) για όσο χρειαστεί η μέτρηση, κωδικοποίηση και η μετάδοση. Έπειτα πέφτει σε βαθύ ύπνο για 500s. Κατά τον βαθύ ύπνο έχουμε εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, απενεργοποιημένο τον επεξεργαστή, τα ψηφιακά περιφερειακά αλλά διατηρείται ενεργό το RTC υποσύστημα που κρατά τις πληροφορίες συνόδου για την επόμενη αφύπνιση.

5.2.6 Stevenson screen

Ο BME688 πρέπει να βρίσκεται σε επαφή με το πεδίο, αλλά αυτό χρειάζεται να γίνει ελεγχόμενα. Η τοποθέτηση του αισθητήρα όσο πιο κοντά στο πεδίο αλλά ταυτόχρονα χωρίς να επηρεάζεται από αντίζοες συνθήκες, όπως είναι ο ισχυρός άνεμος, η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία και τη σκόνη, αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση. Για την ικανοποίηση και των δύο απαιτήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένας κλωβός τύπου Stevenson, κοινώς Stevenson screen. Η ονομασία τύπου Stevenson χρησιμοποιείται διότι η κατασκευή ακολουθεί τη βασική αρχή ενός μετεωρολογικού κλωβού, χωρίς να αποτελεί τυποποιημένο μετεωρολογικό σταθμό. Το περίβλημα αυτό σκιάζει τον αισθητήρα για να τον προστατέψει από ηλιακή ακτινοβολία, προστατεύει από κατακόρυφη και πλάγια βροχόπτωση ενώ διατηρεί κενά για να υπάρχει φυσική κυκλοφορία του αέρα. Η συγκεκριμένη κατασκευή για συστήματα μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αποτελεί καθιερωμένη πρακτική σε μετεωρολογικές παρατηρήσεις [67].

Η άμεση έκθεση του BME688 στην ηλιακή ακτινοβολία ενδέχεται να επηρεάσει τις μετρήσεις της θερμοκρασίας. Η μεταβολή αυτή είναι ικανή για να επηρεάσει τις μετρούμενες τιμές σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης, ακόμα και την απόκριση του αεροευαίσθητου στοιχείου. Αυτό συμβαίνει διότι η ηλιακή ακτινοβολία, ζεσταίνει την πλακέτα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και ο αισθητήρας. Με τον ίδιο τρόπο η παρουσία νερού μπορεί να αλλοιώσει προσωρινά τη μέτρηση σχετικής υγρασίας. Παρακάτω εικονίζεται ο κλωβός τύπου Stevenson που χρησιμοποιείται στην παρούσα υλοποίηση:



Σχήμα 5.10: Ο κλωβός τύπου Stevenson (όψη)

Η διάμετρος των επιπέδων είναι 140mm, ενώ η διάμετρος του κενού χώρου που υπάρχει μέσα είναι 62mm. Το ύψος των επιπέδων (πιάτων) είναι 73mm. Το υλικό του κλωβού είναι το πολυμερές ABS, με εξαίρεση τη βάση και τις βίδες οι οποίες είναι μεταλλικές. Το πλαστικό πίσω δεξιά δεν ενδείκνυται να τοποθετηθεί, γιατί κόβει τα ρεύματα αέρα που κινούνται προς τα πάνω, τα οποία είναι τα θερμότερα. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ο αισθητήρας τοποθετείται μέσα στον κλωβό και μάλιστα, στο μέσο κατά ύψος και κατά πλάτος. Αυτό για να μεγιστοποιηθεί ο κενός χώρος γύρω από τον αισθητήρα, στο ιδανικό σενάριο ο αισθητήρας στηρίζεται από μη μεταλλικές ράβδους (για να μην είναι εστία θερμότητας) με πολύ μικρή διατομή. Τέλος, τα υπόλοιπα συστήματα (κεντρικής μονάδα) βρίσκονται εκτός του κλωβού, σε άλλο περίβλημα, η επικοινωνία με τον αισθητήρα γίνεται με τη χρήση 6 καλωδίων, της τροφοδοσίας, της γείωσης και των 4 διαύλων που χρησιμοποιεί το SPI. Η πιο ορθή σύνδεση θα ήταν με STEMMA QT καλωδίων, οι οποίοι χρησιμοποιούν I2C. Στην υλοποίηση, ο αισθητήρας στερεώθηκε με διάτρητη πλακέτα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 5.11: Ο κλωβός τύπου Stevenson (κάτοψη).

5.2.7 Λογισμικό κόμβου και κύκλος λειτουργίας

Η λειτουργία του κόμβου είναι μια επαναλαμβανόμενη ρουτίνα όπου μετρά, μεταδίδει, κοιμάται και μετά από λίγα λεπτά ξυπνά. Η ανάπτυξη πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Arduino. Το firmware χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη BME68x για τον έλεγχο του αισθητήρα, τη βιβλιοθήκη MCCI LMIC για την υλοποίηση των λειτουργιών LoRaWAN και κάποιες βοηθητικές για αυτές όπως η HAL (Hardware Abstraction Layer) και η SPI. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται οι Wi-Fi, esp_wifi και η esp_bt για να κλείσουν τα εγγενή συστήματα ραδιοδιάδοσης του μικροελεγκτή, καθώς καταναλώνουν σημαντική ισχύ. Τέλος, χρησιμοποιούνται οι βιβλιοθήκες cmath για την εκτέλεση βασικών μαθηματικών μετασχηματισμών και οι βιβλιοθήκες για τον χειρισμό του ADC. Ο κώδικας για το firmware του κόμβου βρίσκεται ολόκληρος στο αποθετήριο github υπό το όνομα ED1_Final_Firmware_1_3b_pcb [68]. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται επιμέρους τμήματα λογισμικού που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της λειτουργίας του κόμβου.

Το λογισμικό οργανώνεται γύρω από τις συναρτήσεις setup() και loop(), η setup() εκτελείται μετά από κάθε αφύπνιση και φυσικά την πρώτη φορά. Η setup() περιλαμβάνει την αρχικοποίηση των περιφερειακών, τη λήψη των μετρήσεων και την προετοιμασία της μετάδοσης. Αρχικά, αρχικοποιείται η σειριακή διεπαφή στα 115200 baud, τυπώνεται ο λόγος αφύπνισης. Εν συνεχεία, απενεργοποιούνται τα υποσυστήματα Wi-Fi και Bluetooth και αρχικοποιείται ο κοινός διάυλος SPI, μέσω του οποίου επικοινωνούν οι περιφερειακές συσκευές της υλοποίησης.

```

606 void setup() {
607   Serial.begin(115200);
608   delay(10);
609
610   Serial.println(F("\n=== System Booting ==="));
611
612   Serial.print(F("Wake cause: ")); Serial.println(esp_sleep_get_wakeup_cause());
613
614   Serial.print(F("\nStarting ED")); Serial.print(nodeID);
615   Serial.print(F(" node.."));
616
617   // Disable the onboard network stack
618   WiFi.mode(WIFI_OFF);
619   esp_wifi_stop();
620   esp_bt_controller_disable();
621
622   // De-select SPI devices
623   pinMode(PIN_CS, OUTPUT);
624   digitalWrite(PIN_CS, HIGH);
625
626   pinMode(lmic_pins.nss, OUTPUT);
627   digitalWrite(lmic_pins.nss, HIGH);
628
629   SPI.begin(5, 4, 6, -1);
630   Serial.println(F("SPI lines OK"));

```

Σχήμα 5.12: Ο κώδικας setup 1.

Μετά την αρχικοποίηση του υλικού, αρχικοποιείται η βιβλιοθήκης LMIC, η οποία διαχειρίζεται το επίπεδο LoRaWAN. Οι βασικές παράμετροι της επικοινωνίας ορίζονται μέσω της `configureLmicCommon()`, στην οποία απενεργοποιείται το Adaptive Data Rate και ο μηχανισμός περιοδικού ελέγχου σύνδεσης και καθορίζονται ο SF και η ισχύς μετάδοσης.

Επειδή η είσοδος του μικροελεγκτή σε βαθύ ύπνο προκαλεί επανεκκίνηση του κύριου προγράμματος κατά την επόμενη αφύπνιση, υλοποιήθηκε ένας μηχανισμός διατήρησης της ενεργής LoRaWAN συνόδου στην RTC μνήμη. Οι πληροφορίες συνόδου αποθηκεύονται με τη χρήση της συνάρτησης `saveJoinedSessionFromLmic()` μετά από επιτυχή ενεργοποίηση OTAA και ενημερώνονται με τη συνάρτηση `saveSessionBeforeSleep()`.

Συνεπώς, το επόμενο στάδιο είναι η ανάκτηση των πληροφοριών συνόδου μέσω της `restoreSessionFromRtc()` και να ενημερώσει τα πεδία στο αντικείμενο LMIC. Αν δεν έγκυρη σύνοδος, τότε θα πρέπει να ξαναγίνει ενεργοποίηση με OTAA.

Αφού αρχικοποιηθεί το υποσύστημα επικοινωνίας, το επόμενο είναι ο αισθητήρας. Κατά την επιτυχή αρχικοποίηση, καλείται η συνάρτηση `setTPH()` η οποία καθορίζει τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις υπερδειγματοληψίας για θερμοκρασία, πίεση και υγρασία. Χωρίς παραμέτρους, επιλέγονται οι προκαθορισμένες τιμές, δηλαδή (2,16,1) δείγματα, για τις μεταβλητές (T,P,H) αντίστοιχα. Η `resetCycleData()` μηδενίζει λογικά την προηγούμενη κατάσταση των μετρήσεων και βάζει ψευδείς σημαίες σε κάθε μέτρηση αερίων, πιο συγκεκριμένα στις τιμές του struct (δομή) `CycleData`. Έπειτα καλείται η `takeAmbientTPH()`, η οποία μετρά θερμοκρασία, υγρασία, πίεση και σώζει τις μετρήσεις στη δομή `CycleData`. Μετά καλείται η `takeGasMeasurements()`, εφαρμόζει το προκαθορισμένο προφίλ θέρμανσης του BME688, μετά την κλήση της στα πεδία `Gas_0`, `Gas_1`, ..., `Gas_9` της δομής `CycleData` έχει σχηματιστεί η πολυδιάσταση υπογραφή που χρησιμοποιείται αργότερα στο μοντέλο ταξινόμησης. Μετά τη δειγματοληψία, εκτελείται η `get_battery_voltage()` με την οποία λαμβάνεται μέσω του ADC του μικροελεγκτή και του διαιρέτη τάσης, η μετρούμενη τάση που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ποσοστιαία ένδειξης της κατάστασης της μπαταρίας. Τέλος, εκτελείται η `do_send()` όπου ξεκινά η μετάδοση. Πριν προγραμματιστεί το νέο uplink ελέγχεται αν υπάρχει ενεργή διαδικασία μετάδοσης ή λήψης από το LMIC. Τα uplinks της εφαρμογής είναι unconfirmed, άρα δεν απαιτείται η παραλαβή επιβεβαίωσης για κάθε πακέτο. Η διαχείριση της μετάδοσης γίνεται ασύγχρονα από το LMIC.

```

632 os_init();
633 Serial.println(F("LMIC os_init OK"));
634
635 LMIC_reset();
636 Serial.println(F("LMIC reset OK"));
637
638 configuremicCommon();
639 bool restored = restoreSessionFromMtc();
640
641 if (restored) {
642   Serial.println(F("Using restored session."));
643 } else {
644   Serial.println(F("Using OTAA join."));
645 }
646
647 bme.begin(PIN_CS, SPI);
648
649 if (bme.checkStatus()) {
650   if (bme.checkStatus() == BME68X_ERROR) { // Restart
651     Serial.println("Sensor error: " + bme.statusString());
652     return;
653   } else if (bme.checkStatus() == BME68X_WARNING) {
654     Serial.println("Sensor warning: " + bme.statusString()); // Proceed
655   }
656 }
657
658 bme.setTPIH();
659
660 resetcycleData();
661
662 Serial.println(F("BME init complete."));
663
664 if (takeAmbientTPIH()) {
665   Serial.println(F("Ambient TPIH done."));
666 }
667
668 takeGasMeasurements();
669
670 get_battery_voltage();
671
672 do_send(&sendjob);
673 }

```

Σχήμα 5.13: Ο κώδικας setup 2.

Η `loop()` καλεί συνέχεια την `os_runloop_once()`, ώστε η βιβλιοθήκη να εκτελεί τα προγραμματισμένα γεγονότα του πρωτοκόλλου. Η συνάρτηση `onEvent()`, χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των γεγονότων που δημιουργεί το LMIC. Τα κύρια γεγονότα είναι τα `EV_JOINED`, `EV_TXSTART` και `EV_TXCOMPLETE`. Το πρώτο δηλώνει ότι έχει ενεργοποιηθεί επιτυχώς η συσκευή, το δεύτερο την εκκίνηση της μετάδοσης και το τελευταίο ότι έχουν ολοκληρωθεί η μετάδοση του uplink και τα επακόλουθα παράθυρα λήψης του LoRaWAN. Η λήψη του `EV_TXCOMPLETE` σημαίνει ότι ο ενεργός κύκλος έχει ολοκληρωθεί για αυτό και καλείται η `goToDeepSleep()`. Πριν από την είσοδο σε βαθύ ύπνο, αποθηκεύονται οι πληροφορίες της συνόδου, ο BME688 τίθεται κι αυτός σε βαθύ ύπνο και απενεργοποιούνται ξανά τα εγγενή συστήματα ραδιοδιάδοσης του μικροελεγκτή.

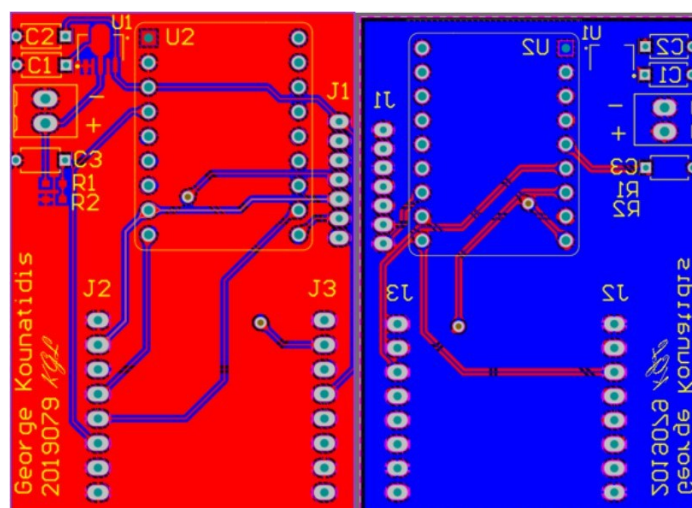
5.3 Σχεδίαση PCB

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού της τυπωμένης πλακέτας κυκλώματος (Printed Circuit Board - PCB) και η συναρμολόγηση της συσκευής. Για την δημιουργία του τυπωμένου κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Altium Designer, το οποίο επιτρέπει τη μετατροπή ενός απλού ηλεκτρονικού σχεδίου σε πραγματικό τυπωμένο κύκλωμα. Η βασική λειτουργία του προγράμματος είναι το schematic, όπου μπορεί να σχεδιαστεί το κύκλωμα με τις εικονικές συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων. Μπορούν επίσης να προστεθούν σχόλια και άλλες πληροφορίες για την οργάνωση του σχεδίου. Εν συνεχεία, το σχηματικό διάγραμμα μετατρέπεται σε PCB όπου χαράζονται οι φυσικές διαδρομές αγωγών που συνδέουν τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Κάθε εξάρτημα διαθέτει το δικό του footprint, αυτό καθορίζει τις φυσικές διαστάσεις του και τις θέσεις των ακίδων ώστε να είναι δυνατή η σωστή ηλεκτρική και μηχανική σύνδεσή του. Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο footprint μπορεί να υπολογιστεί το λειτουργικό κομμάτι που είναι οι φυσικές διαστάσεις και οι θέσεις των ακίδων, για να είναι δυνατός ο σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος. Για να υπάρχει πληρότητα μπορεί κανείς μετά να φτιάξει το 3D μοντέλο του εξαρτήματος. Στην παρούσα υλοποίηση ένα εξάρτημα και πιο συγκεκριμένα το Breakout Board της Elecrow για το RFM95W, δεν είχε footprint αλλά υπήρχε στο site του προϊόντος εικόνα με τις διαστάσεις του. Το τελικό PCB έχει κατά προσέγγιση διαστάσεις, στον

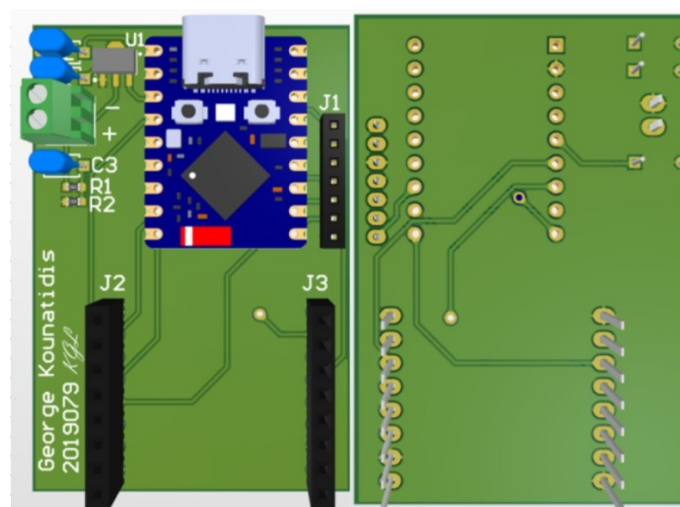
οριζόντιο άξονα 36.1mm και στον κάθετο άξονα 52.7mm. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε πλακέτα 2 επιπέδων, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.14.

Το πρόγραμμα παρέχει επίσης τη δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης του PCB, ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την τελική μορφή πριν την κατασκευή της. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να εντοπιστούν πιθανά προβλήματα στη διάταξη των εξαρτημάτων και να γίνει καλύτερη εκτίμηση της εμφάνισης του κυκλώματος. Η τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας φαίνεται στο Σχήμα 5.15.

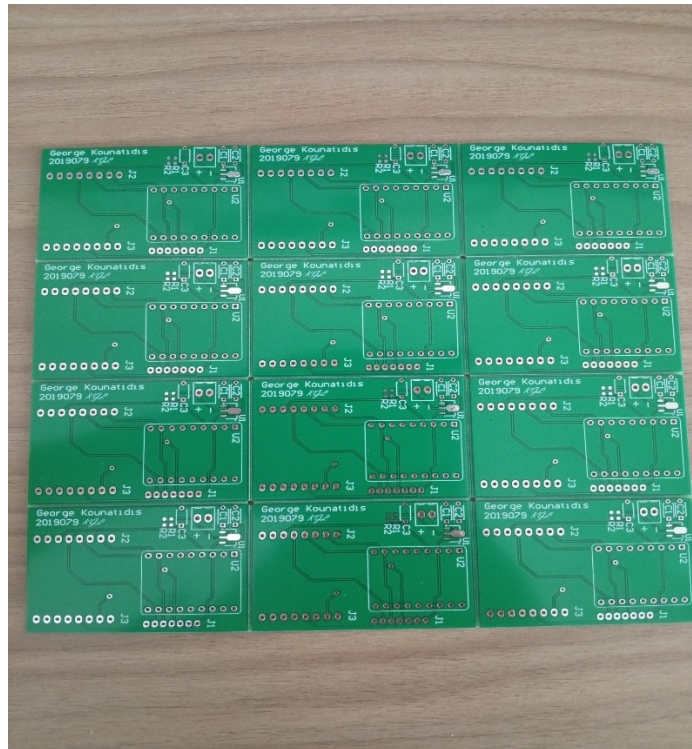
Τέλος το τυπωμένο κύκλωμα δημιουργήθηκε σε μορφή panelized, ώστε στη μια πλακέτα που θα παράξει το εργοστάσιο να έρθουν πολλαπλές πλακέτες για τον αισθητήριο κόμβο. Έτσι μειώνεται σημαντικά το κόστος παραγωγής, ενώ παράλληλα διευκολύνεται και η διαδικασία δημιουργίας αντιγράφων της συσκευής. Μετά την ολοκλήρωση της δρομολόγησης του κυκλώματος, εξάγονται από το Altium τα αρχεία Gerber, τα οποία περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την παρασκευή του κυκλώματος. Τα αρχεία αυτά περιγράφουν τα επίπεδα χαλκού του PCB, τα σημεία όπου θα δημιουργηθούν τρύπες για την τοποθέτηση των στοιχείων, καθώς και τα αναγνωριστικά (designators) και τις επιγραφές που εμφανίζονται πάνω στην επιφάνεια της πλακέτας. Αφού ελεγχθεί και επαληθευθεί το σχέδιο ξεκινά η διαδικασία παρασκευής του τυπωμένου κυκλώματος (Σχήμα 5.17).



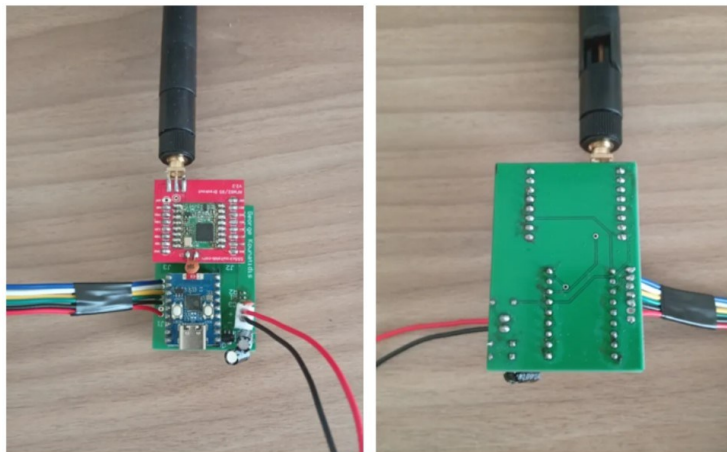
Σχήμα 5.14: Τα 2 επίπεδα του PCB (αριστερά είναι το πάνω μέρος και δεξιά το κάτω μέρος της πλακέτας).



Σχήμα 5.15: Η τρισδιάστατη απεικόνιση του PCB (αριστερά είναι το πάνω μέρος και δεξιά το κάτω μέρος της πλακέτας).



Σχήμα 5.16: Τελικό αποτέλεσμα panelized τυπωμένης πλακέτας.



Σχήμα 5.17: Τελικό αποτέλεσμα μετά τις κολλήσεις.

Για τη συγκόλληση των ηλεκτρονικών στοιχείων στο τυπωμένο κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε ένα κολλητήρι με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία. Η δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντική για την ασφαλή κόλληση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, καθώς πολλά απ' αυτά είναι ευαίσθητα στην υπερθέρμανση λόγω του μικρού μεγέθους τους. Για τη διευκόλυνση και τη δημιουργία πιο καθαρών και αξιόπιστων κολλήσεων χρησιμοποιήθηκε σολντερίνη (flux).

Τέλος, ιδιαίτερο χρήσιμο αποδείχθηκε το σύρμα αποκόλλησης (desoldering braid), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση λαθών κατά την αφαίρεση περίσσιας καλαϊού από τις συνδέσεις. Το τελικό αποτέλεσμα από τις κολλήσεις φαίνεται στο Σχήμα 5.17.

5.4 Πύλη LoRaWAN

Η πύλη LoRaWAN αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ των τελικών συσκευών (ως ορολογία για τους κόμβους στο LoRaWAN αυτή είναι η κατάλληλη) και της υποδομής IP. Ο ρόλος της πύλης είναι να λαμβάνει τα LoRaWAN πλαίσια και να τα προωθεί προς το The Things Stack και να παραλαμβάνει προγραμματισμένα μηνύματα κάτω ζεύξης για να τα εκπέμψει προς τις τερματικές συσκευές. Η προώθηση αυτή γίνεται με τον UDP Packet Forwarder της Semtech. Ωστόσο, παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς σε θέματα ασφάλειας και επεκτασιμότητας, γι' αυτό και προτείνεται η χρήση του LoRa Basics Stations σαν εναλλακτική λύση για την προώθηση των πακέτων [69].

Η πύλη δεν είναι κόμβος δρομολόγησης και κόμβοι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν δίκτυο πλέγματος (mesh). Κάθε κόμβος μεταδίδει το πλαίσιό του ανεξάρτητα και όποια πύλη το λάβει, μπορεί να το προωθήσει. Στην παρούσα υλοποίηση, η πύλη υλοποιείται από ένα συγκεντρωτή RAK5146 PiHAT και το Raspberry Pi 4 Model B. Το RAK5146 είναι υπεύθυνο για τη λήψη και εκπομπή των LoRa σημάτων, ενώ το Raspberry Pi εκτελεί το λειτουργικό σύστημα RAKPiOS και το λογισμικό προώθησης.

Η ασύρματη οπισθοζευκτική επικοινωνία της πύλης με το Διαδίκτυο πραγματοποιείται μέσω Wi-Fi, ήτοι το backhaul της παρούσας υλοποίησης είναι το Wi-Fi. Σε μια απομακρυσμένη εγκατάσταση κρίνεται απαραίτητο, αυτή η σύνδεση να γίνει με κάποια σύνδεση κινητής τηλεφωνίας ή άλλη διαθέσιμη υπηρεσία IP. Τέλος, η πύλη προσθέτει στα προωθούμενα πλαίσια μεταδεδομένα λήψης, όπως το αναγνωριστικό της πύλης, τη συχνότητα, το κανάλι, το SF, RSSI, SNR και τη χρονική στιγμή λήψης.

5.4.1 RAK5146

Το RAK5146 πρόκειται για μια μονάδα μορφής mini-PCIE, βασίζεται στον επεξεργαστή βασικής ζώνης SX1303 της Semtech και οι διεπαφές για τη σύνδεση με υπολογιστικές συσκευές είναι SPI ή USB, ανάλογα την έκδοση. Η μονάδα τοποθετήθηκε σε πλακέτα PiHAT και επικοινωνεί μέσω SPI με το Raspberry Pi 4 Model B [70].

Ο SX1303 υποστηρίζει έως δέκα προγραμματιζόμενες παράλληλες διαδρομές αποδιαμόρφωσης και επιτρέπει τη λήψη πακέτων από διαφορετικά κανάλια και SFs. Συγκεκριμένα, η μονάδα έχει οκτώ αποδιαμορφωτές LoRa για SF5-SF12 και επιπλέον διαδρομές για SF5-SF10, έναν αποδιαμορφωτή LoRa υψηλού ρυθμού με εύρος ζώνης 125, 250 ή 500 kHz και έναν ακόμη αποδιαμορφωτή (G)FSK. Έτσι μπορεί να ανιχνεύει ταυτόχρονα πακέτα σε έως δέκα κανάλια και οκτώ διαφορετικούς SFs. Μπορεί επίσης να αποδιαμορφώνει έως δεκαέξι πακέτα. Οι δυνατότητες αυτές καθιστούν δυνατή την εξυπηρέτηση πολλαπλών τελικών συσκευών ταυτόχρονα, χωρίς να απαιτείται αποκλειστική ρύθμιση της πύλης για το κάθε SF, κάθε συσκευής [70].

Η μέγιστη ισχύς εκπομπής της μονάδας είναι τα 27 dBm, ενώ η τυπική ευαισθησία λήψης τα -139 dBm για SF12 και εύρος ζώνης 125 kHz. Ανάλογα το μοντέλο, υποστηρίζονται οι λειτουργίες όπως Listen Before Talk (LBT) μέσω του SX1261 και η ενσωμάτωση δέκτη GNSS ZOE-M8Q (η οποία χρησιμοποιείται για τον γεωεντοπισμό) [70]. Η πύλη που χρησιμοποιείται έχει δέκτη για το γεωεντοπισμό αλλά χωρίς την ενσωμάτωση της λειτουργίας LBT.

Το PiHAT προσφέρει φυσική και ηλεκτρική διασύνδεση με το Raspberry Pi. Ο συγκεντρωτής δεν εκτελεί αυτόνομα το σύνολο των λειτουργιών μια πύλης, χρειάζεται το υπολογιστικό σύστημα του Raspberry Pi 4 Model B. Αφού έχει συνδεθεί με κατάλληλη κεραία για την εκπομπή στην EU868, η τοποθέτηση της κεραίας επηρεάζει σημαντικά την κάλυψη της πύλης. Παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση που έγινε:



Σχήμα 5.18: Η πύλη LoRaWAN της παρούσας υλοποίησης αριστερά η LoRa κεραία και δεξιά αυτή για το GPS.

Η κεραία που χρησιμοποιείται είναι τύπου μονής λειτουργίας (Single Mode Antenna, SMA) με κέρδος 3 dBi, λόγο στάσιμου κύματος (VSWR) κάτω από 2 και μήκους 220mm. Το IPEX καλώδιο έχει μήκος 100mm. Το ύψος της εγκατάστασης σε μια δασική περιοχή καθορίζεται από μια ενιαία βάση στην οποία λαμβάνονται υπόψιν η γεωμορφολογία του εδάφους, τη βλάστηση, την απόσταση από τις τερματικές συσκευές και την ύπαρξη εμποδίων στη ζώνη Fresnel. Η τοποθέτηση της κεραίας σε μεγάλο ύψος βελτιώνει συνήθως την οπτική επαφή και περιορίζει τις απώλειες που προκαλούνται από δέντρα και άλλα εμπόδια [47] [71]. Σε μια πειραματική εγκατάσταση LoRaWAN οι Ojo et al. τοποθέτησαν την πύλη σε ύψος 3 μέτρων και κατέγραψαν εμβέλεια έως και 860m σε πυκνή βλάστηση και έως 2.05 km σε αραιή [47]. Οι Ansah et al. έδειξαν ότι η αύξηση του ύψους της πύλης από 5 έως 30 μέτρα, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της ζεύξης, όταν το πεδίο έχει πυκνή βλάστηση [71]. Σε πραγματικές συνθήκες θα πρότεινα η εγκατάσταση των πυλών να γίνει όσο πιο ψηλά γίνεται.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της υλοποίησης είναι η υποστήριξη πλήρους πολυκαναλικής λειτουργίας, η συμβατότητα με το Raspberry Pi και η δυνατότητα εκτέλεσης πρόσθετων λειτουργιών στο υπολογιστικό σύστημα.

Κύριο μειονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι ότι η παρούσα πύλη δεν ενδείκνυται για τη χρήση σε εξωτερικές συνθήκες, καθώς δεν έχει αυτόνομο σύστημα τροφοδοσίας. Ένας ακόμη περιορισμός είναι επίσης η εξάρτηση από την ενεργή σύνδεση στο backhaul, που γίνεται μέσω Wi-Fi.

5.4.2 Διασύνδεση με το The Things Stack

Για τη διασύνδεση της πύλης δημιουργήθηκε σχετική εγγραφή στο The Things Stack. Κατά την καταχώρηση ορίστηκε το μοναδικό EUI της πύλης, το EU868 και το ευρωπαϊκό cluster που είναι το eu1. Αφού γίνει αυτό, η κατάσταση της πύλης εμφανίζεται ως συνδεδεμένη και τα ληφθέντα πλαίσια καταγράφονται στο Live Data.



Σχήμα 5.19: Η πλατφόρμα επικοινωνεί με την πύλη για την κατάστασή της.



Σχήμα 5.20: Λήψη μηνύματος άνω ζεύξης στο The Things stack.

Η ορθή επικοινωνία μεταξύ της πύλης και της πλατφόρμας φαίνεται από τα μηνύματα που εμφανίζονται ως gateway status messages αλλά και από τα μηνύματα άνω ζεύξης. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε η εφαρμογή για την καταχώριση των τελικών συσκευών. Για κάθε κόμβο ορίζονται πρώτα τα πεδία frequency plan, LoRaWAN έκδοση και regional parameters. Έπειτα, ορίζονται τα DevEUI, JoinEUI και AppKey. Στο Σχήμα 5.19 εικονίζονται μηνύματα που υποδεικνύουν ότι η πύλη λειτουργεί.

Οι τιμές των DevEUI, JoinEUI και AppKey που εισάγονται στο firmware θα πρέπει να ακολουθούν τη σειρά byte της βιβλιοθήκης LMIC. Το DevEUI και το Join EUI εισάγονται στον κώδικα ως little-endian δηλαδή αν ζεύγη γράφονται από δεξιά προς τα αριστερά. Το AppKey εισάγεται στον κώδικα ως big-endian, από αριστερά προς τα δεξιά, δηλαδή παραμένει ως έχει. Μετά την επιτυχημένη ενεργοποίηση ΟΤΑΑ, η πλατφόρμα θα εμφανίσει τα μηνύματα άνω ζεύξης και τα μεταδεδωμένα τους. Για την αποκωδικοποίηση του πακέτου δημιουργήθηκε ένας uplink payload formatter. Η formatter εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία της συνάρτησης pack_bits() που υπάρχει στο firmware των τελικών συσκευών, ανακατασκευάζοντας τα πεδία και εφαρμόζοντας τους αντίστροφους συντελεστές κλιμάκωσης.

Η έξοδος του payload formatter είναι ένα JSON αντικείμενο, με αυτόν τρόπο, η υπηρεσία Python χρησιμοποιεί απευθείας τα πεδία που χρειάζονται. Στο Σχήμα 5.20 εικονίζεται η λήψη του μηνύματος στην πλατφόρμα, το ωφέλιμο φορτίο που αντιστοιχεί στο πεδίο frm_payload και η αποκωδικοποίησή του με τη χρήση του payload formatter σε JSON.

5.5 Υπηρεσία παραλαβής και επεξεργασίας μέσω MQTT

Το MQTT χρησιμοποιείται ως διεπαφή μεταξύ του The Things Stack και της εφαρμογής επεξεργασίας. Ακολουθεί το μοντέλο publish/subscribe, στο οποίο οντότητες δημοσιεύουν μηνύματα σε θέματα (topics) και άλλες οντότητες εγγράφονται στα θέματα που τους ενδιαφέρουν.

Στην παρούσα υλοποίηση το The Things Stack λειτουργεί ως broker και publisher των μηνυμάτων άνω ζεύξης, ενώ η εφαρμογή Python λειτουργεί ως subscriber. Η επικοινωνία της εφαρμογής γίνεται μόνο με την πλατφόρμα, δεν μπορεί να επικοινωνήσει με την πύλη ή με τις τερματικές συσκευές.

5.5.1 Σύνδεση και παραμετροποίηση

Η υπηρεσία αναπτύχθηκε σε Python με τη βιβλιοθήκη Paho MQTT. Οι παράμετροι για τη σύνδεση περιλαμβάνουν τη διεύθυνση του broker, τη θύρα 1883, το όνομα χρήστη της εφαρμογής, το κλειδί API και το MQTT topic. Η εφαρμογή εγγράφεται στο θέμα v3/+devices/+up, το wildcard επιτρέπει την παραλαβή uplinks από όλες τις τερματικές συσκευές. Μετά την επιτυχή σύνδεση καλείται η callback on_connect(), η οποία κάνει εγγραφή στο topic. Εάν η σύνδεση διακοπεί, το συμβάν καταγράφεται.

Ο κώδικας για το υπηρεσία βρίσκεται ολόκληρος στο αποθετήριο github υπό το όνομα python_bridge [68].

5.5.2 Παραλαβή και έλεγχος μηνύματος

Κάθε εισερχόμενο μήνυμα προωθείται στην συνάρτηση on_message(). Το περιεχόμενο μετατρέπεται από byte sting σε αντικείμενο JSON. Εάν η αποκωδικοποίηση αποτύχει, το σφάλμα καταγράφεται και το μήνυμα απορρίπτεται.

Έπειτα ελέγχεται η ύπαρξη του uplink_message και του decoded_payload. Η εφαρμογή παραλείπει αυτά τα μηνύματα, ώστε να μην εγγράφονται στη βάση μη αναγνώσιμες εγγραφές. Από τα μεταδεδομένα που εισάγει το The Thing Stack, τα οποία βρίσκονται κάτω από το rx_metadata, επιλέγεται η εγγραφή της πύλης με τον υψηλότερο RSSI. Από αυτήν μετά, εξάγονται οι τιμές RSSI και SNR. Η λήψη του πλαισίου από πολλές πύλες είναι πολύ πιθανό, σε μέρη όπου υπάρχουν πύλες εγγεγραμμένες στην πλατφόρμα TTS και φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

5.5.3 Ανάκτηση γεωγραφικής θέσης

Μέσα από την πλατφόρμα TTS μπορεί κανείς να ορίσει τη γεωγραφική θέση μιας τερματικής συσκευής, αυτή η πληροφορία βρίσκεται στο uplink_message.locations.user. Εάν το uplink δεν έχει τη θέση, η εφαρμογή θα υποβάλει αίτημα στο Device registry του TTS. Οι συντεταγμένες αποθηκεύονται σε προσωρινή cache για 900s, ώστε να περιορίζονται τα αιτήματα.

5.5.4 Εκτέλεση του ταξινομητή

Από το decoded_payload εξάγονται οι δεκατρείς μεταβλητές που το μοντέλο έχει εκπαιδευτεί πάνω. Οι τιμές εισάγονται σε DataFrame, ακολουθώντας την ίδια σειρά που χρησιμοποιήθηκε στην εκπαίδευση. Το μοντέλο φορτώνεται μια φορά κατά την εκκίνηση της υπηρεσίας. Για κάθε νέο μήνυμα καλούνται οι λειτουργίες predict() η οποία επιστρέφει την προβλεπόμενη κλάση και η predict_proba() που επιστρέφει την εκτιμώμενη πιθανότητα της κλάσης φωτιάς.

5.5.5 Εγγραφή και διαχείριση σφαλμάτων

Μετά την πρόβλεψη δημιουργείται εγγραφή στο InfluxDB με τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν, το αναγνωριστικό της συσκευής, τον αύξων αριθμό πλαισίου, την κατάσταση της μπαταρίας, RSSI, SNR, τις συντεταγμένες και την πιθανότητα φωτιάς. Η εφαρμογή καταγράφει την επιτυχή αποθήκευση κάθε uplink μαζί με το αναγνωριστικό κάθε συσκευής, τον αύξων αριθμό πλαισίου, την πιθανότητα φωτιάς και τα μεταδεδομένα λήψης.

Η χρήση της δομής try-catch για τον εντοπισμό και τη διαχείριση σφαλμάτων (εξαιρέσεις), αποτρέπει τον τερματισμό ολόκληρης της υπηρεσίας. Κατά τον ελεγχόμενο τερματισμό διακόπτεται η σύνδεση MQTT, ολοκληρώνονται οι εκκρεμείς εγγραφές και κλείνει ο Influx client.

5.6 Μοντέλα μηχανικής μάθησης

Η ανίχνευση καύσης στα πλαίσια της υλοποίησης θεωρείται ως ένα πρόβλημα δυαδικής ταξινόμησης με επίβλεψη. Τα μοντέλα που εξετάστηκαν είναι ο AdaBoost, XGBoost και SVM. Οι δύο κλάσεις κωδικοποιήθηκαν ως εξής:

$$0 = \text{Fire}, 1 = \text{NOT Fire} \quad (5.5)$$

5.6.1 Χαρακτηριστικά και σύνολο δεδομένων

Κάθε παρατήρηση περιλαμβάνει τα δεκατρία χαρακτηριστικά της εξίσωσης 4.5. Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει μετρήσεις υπό συνθήκες ελεγχόμενης καύσης και μετρήσεις περιβάλλοντος χωρίς καύση. Αυτές οι μετρήσεις εξηγούνται περισσότερο στην ενότητα 6.3. Ένα υποσύνολο των μετρήσεων της κλάσης 0 που δόθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, παραχωρήθηκε από τους Musa Milli και Mehmet Milli, αποκλειστικά για ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς σκοπούς. Η σχετική δημοσιευμένη εργασία τους παρατίθεται στη βιβλιογραφία [11]. Το σύνολο δεδομένων αποτελείται από 445 δείγματα, εκ των οποίων τα 145 ανήκουν στην κλάση 0. Για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του συνόλου δεδομένων έγινε ο διαχωρισμός σε σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου με αναλογία 80/20. Η διαδικασία έγινε με σταθερή τιμή τυχαιότητας random_state=42 για λόγους αναπαραγωγιμότητας και με χρήση στρωματοποιημένης δειγματοληψίας (stratify), για να διατηρείται περίπου η ίδια αναλογία των δύο κλάσεων και στα δύο υποσύνολα.

Στο σύνολο εκπαίδευσης υπήρξαν 356 δείγματα εκ των οποίων 116 αντιστοιχούν στην κλάση FIRE και τα υπόλοιπα 240 στην κλάση NO FIRE, ενώ το σύνολο ελέγχου είχε 88 δείγματα εκ των οποίων τα 29 αντιστοιχούν στην κλάση FIRE και τα υπόλοιπα 60 αντιστοιχούν στην κλάση NO FIRE.

5.6.2 Προεπεξεργασία

Πριν την εκπαίδευση πραγματοποιείται έλεγχος και καθαρισμός του συνόλου δεδομένων. Αρχικά επιλέγονται οι 13 μεταβλητές εισόδου και η μεταβλητή στόχος που είναι η Label_fire. Όλες οι τιμές μετατρέπονται σε αριθμητικό τύπο, ενώ οι τιμές που δεν μπορούν να μετατραπούν χαρακτηρίζονται ως NaN. Τυχόν διανύσματα που περιλαμβάνουν τουλάχιστον μια μη έγκυρη τιμή, αφαιρούνται. Στην παρούσα περίπτωση, το στάδιο αυτό δεν οδήγησε σε καμία αφαίρεση, καθώς έχουν επιμεληθεί μετά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Για τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και βασίζονται σε αποστάσεις και σχετική κλίμακα των χαρακτηριστικών εφαρμόζεται επιπλέον τυποποίηση των δεδομένων, μέσω του StandardScaler. Για κάθε χαρακτηριστικό x_j , η μετασχηματισμένη τιμή υπολογίζεται ως εξής:

$$Z = \frac{x_j - \mu}{\sigma} \quad (5.6)$$

όπου μ είναι η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση του αντίστοιχου χαρακτηριστικού στο σύνολο εκπαίδευσης. Ο μετασχηματισμός αυτός λέγεται z-score ή z-τιμή, αποτελεί ένα στατιστικό δείκτη που δείχνει πόσες τυπικές αποκλίσεις απέχει μια τιμή από το μέσο όρο του συνόλου. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται στο SVM. Ειδικά στο SVM με πυρήνα RBF (Radial Basis Function ή Γκαουσιανός πυρήνας) είναι σημαντική η μετατροπή σε z-scores, διότι το μοντέλο βασίζεται σε αποστάσεις. Χωρίς την τυποποίηση, χαρακτηριστικά με μεγαλύτερο αριθμητικό εύρος, θα επηρέαζαν δυσανάλογα τον

υπολογισμό των αποστάσεων (πχ αντιστάσεις αερίων με θερμοκρασία, υγρασία, πίεσης). Στην υλοποίηση ο StandardScaler και ο αντίστοιχος ταξινομητής ενσωματώνονται στο ίδιο pipeline, εξασφαλίζοντας ότι ο ίδιος ακριβώς μετασχηματισμός εφαρμόζεται στην εκπαίδευση και στην πρόβλεψη.

5.6.3 Αξιολόγηση μοντέλων

Η αξιολόγηση των μοντέλων μηχανικής μάθησης, γίνεται σε ανεξάρτητο σύνολο από αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση. Για τη σύγκριση των μοντέλων παρατίθενται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μοντέλων μηχανικής μάθησης

Μοντέλο	Accuracy	Precision FIRE	Recall FIRE	F1-score FIRE
AdaBoost	100%	100%	100%	100%
SVM	98.88%	100%	96.55%	98.25%
XGBoost	100%	100%	100%	100%

Παρατηρείται ότι, γενικά τα μοντέλα αποδίδουν πάρα πολύ καλά και δεν υπάρχουν False Positives. Το γεγονός ότι έχουν μάθει πολύ καλά το σύνολο δεδομένων, δεν αρκεί καθώς αυτό ενέχει κινδύνους overfitting. Συγκεκριμένα το SVM, ταξινομήσε λάθος μια FIRE ως NO FIRE. Το σύνολο δεδομένων χρειάζεται σίγουρα περισσότερα δείγματα, με μεγαλύτερο εύρος συνθηκών, για να γενικευτεί η ανίχνευση από τις περιβαλλοντικές μετρήσεις.

5.6.4 Αξιολόγηση μοντέλων

Στην τελική λειτουργία του συστήματος δεν ζητείται μόνο η απόφαση του ταξινομητή αλλά και το πόσο μεγάλη είναι η συσχέτιση του εισερχόμενου δείγματος με την κλάση FIRE. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η πιθανοτική έξοδος του SVM. Η κλασική έξοδος του SVM εκφράζει το που βρίσκεται η θέση ενός διανύσματος σε σχέση με το διαχωριστικό όριο που χωρίζει τις κλάσεις μεταξύ τους. Όμως, στη παρούσα υλοποίηση το μοντέλο εκπαιδεύτηκε με την παράμετρο `probability=True`, ώστε να είναι δυνατή η ανάκτηση της πιθανοτικής εκτίμησης μέσω της `predict_proba()`. Τέλος, από τις παραγόμενες τιμές επιλέγεται αυτή που αντιστοιχεί στην κλάση FIRE.

5.7 Αποθήκευση δεδομένων

Μετά τη λήψη και την επεξεργασία κάθε μηνύματος από το επίπεδο της εφαρμογής, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε βάση χρονοσειρών, ώστε να υπάρχει ιστορικό και να είναι εφικτή η παρουσίασή του. Αρκετά σημαντικό στη διατήρηση ιστορικού είναι και η αξιοποίηση των δεδομένων για την εξαγωγή πορισμάτων στις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το InfluxDB, το οποίο είναι κατάλληλο για δεδομένα έχουν εξάρτηση στο χρόνο και παράγονται περιοδικά από τερματικές συσκευές IoT.

Η εγγραφές όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.5.5 πραγματοποιείται μετά την αποκωδικοποίηση του LoRaWAN payload και την εφαρμογή του ταξινομητή. Επομένως κάθε εγγραφή δεν περιλαμβάνει μόνο τις περιβαλλοντικές μετρήσεις, αλλά και πληροφορίες που προστέθηκαν σε μεταγενέστερα στάδια. Συνεπώς, συγκεντρώνονται σε ένα κοινό σημείο τα δεδομένα του αισθητήρα, πληροφορίες σχετικά με την ασύρματη ζεύξη και το αποτέλεσμα του ταξινομητή.

Battery	device_id	fire_probability	Gas_0	Gas_1	Gas_2	Gas_3	Gas_4	Gas_5	Gas_6	Gas_7	Gas_8	Gas_9	Humidity	Latitude	Longitude	NodeID	Pressure	RSSI	SeqNum	SNR	Temperature
0	ed1	0.82309088450932312	8000	140000	142000	150000	30000	30000	30000	11000	17000	21000	44.41	40.6472784822518	22.9393416978973	0	101849.04	-44	17	18.2	29.23
0	ed1	0.82361627805922357	8000	140000	142000	149000	30000	30000	30000	11000	17000	21000	44.74	40.6472784822518	22.9393416978973	0	101839.41	-52	18	18.8	29.34

Σχήμα 5.21: Οι πληροφορίες που αποθηκεύονται με τα αντίστοιχα πεδία τους.

Η χρήση βάσης χρονοσειρών επιτρέπει επιπλέον την εκτέλεση χρονικών ερωτημάτων, όπως την ανάκτηση της τελευταίας μέτρησης του κόμβου, τον υπολογισμό μέσης τιμής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα για οποιαδήποτε τιμή και την παρακολούθηση της εξέλιξης ενός μεγέθους. Οι λειτουργίες αυτές είναι κρίσιμες για τη γραφική διεπαφή καθώς χρησιμοποιούνται συνέχεια. Τέλος, από τη στιγμή που η γραφική διεπαφή επιτρέπει την αποστολή ειδοποιήσεων, αυτές οι λειτουργίες είναι επίσης χρήσιμες και για το υποσύστημα αποστολής ειδοποιήσεων. Γραφική διεπαφή χρήστη

Για την παρουσίαση των δεδομένων αναπτύχθηκε μια γραφική διεπαφή με τη χρήση του Grafana. Στόχος της διεπαφής είναι η συγκέντρωση της πληροφορίας για την κατάσταση του δικτύου σε ένα ενιαίο dashboard, χωρίς να απαιτείται η άμεση πρόσβαση του τελικού χρήστη στη βάση ή στις υπηρεσίες δικτύου του LoRaWAN. Η διεπαφή οργανώθηκε έτσι ώστε να παρέχει μια συνοπτική εικόνα της τρέχουσας κατάστασης και τη δυνατότητα εξέτασης της χρονικής εξέλιξης των επιμέρους μεγεθών.

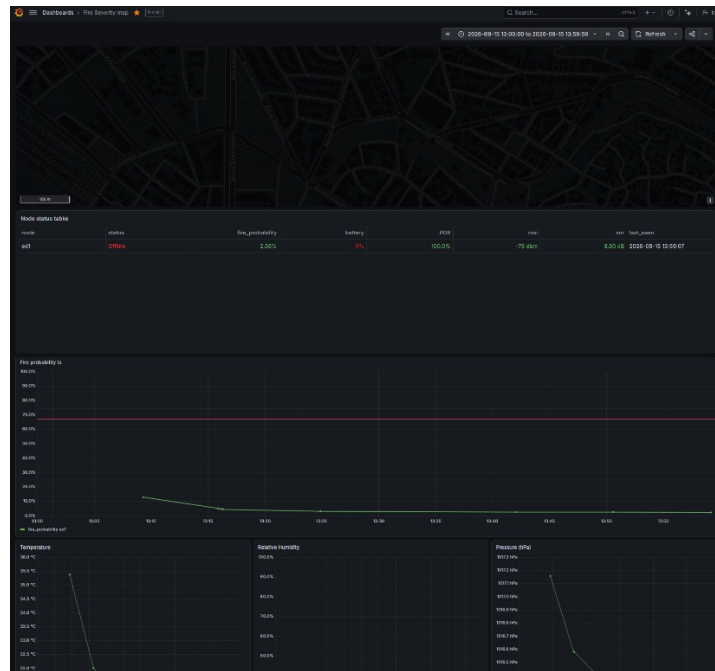
Στο ανώτερο τμήμα του dashboard υπάρχει γεωγραφικός χάρτης, στον οποίο μπορούν να απεικονιστούν οι θέσεις των κόμβων βάσει των αποθηκευμένων γεωγραφικών συντεταγμένων που ανακτήθηκαν από το `uplink_message.locations.user`. Η γεωγραφική παρουσίαση είναι εξαιρετικά σημαντική για την παρούσα εφαρμογή, καθώς η ένδειξη πιθανής πυρκαγιάς συνδέεται άμεσα με το σημείο από το οποίο προέρχεται.

Κάτω από τον χάρτη παρουσιάζονται πληροφορίες για την κατάσταση του κόμβου. Για κάθε συσκευή εμφανίζονται οι πληροφορίες:

- Αναγνωριστικό κόμβου (ed_k , όπου k αριθμός)
- Κατάσταση λειτουργίας (Online/Offline)
- Τελευταία πιθανότητα φωτιάς (%)
- Στάθμη της μπαταρίας (%)
- Ρυθμός παράδοσης πακέτου (Packet Delivery Ratio – PDR) (%)
- RSSI (dBm)
- SNR (dB)
- Ο χρόνος της τελευταίας μέτρησης που ελήφθη.

Η συγκέντρωση των παραπάνω πληροφοριών έχουν διττό ρόλο δηλαδή, την επισκόπηση του φυσικού φαινομένου και της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος. Κι αυτό γιατί, αν ένας κόμβος έχει χαμηλή πιθανότητα φωτιάς δεν είναι αρκετό για να θεωρηθεί μια περιοχή ασφαλής, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται ως Offline. Αντίστοιχα οι ενδείξεις PDR, RSSI και SNR επιτρέπουν την αναγνώριση προβλημάτων στην ασύρματη ζεύξη του κόμβου.

Κεντρικό στοιχείο της διεπαφής αποτελεί η χρονοσειρά του `fire_probability`. Η πιθανότητα φωτιάς συναρτήσει του χρόνου, επιτρέπει στον τελικό χρήστη να δει την εξέλιξη της εξόδου του ταξινομητή. Δεν αρκεί απλά ξεπεραστεί το προκαθορισμένο όριο, η απόκριση του συστήματος μπορεί να επαληθεύσει μια ειδοποίηση για φωτιά.



Σχήμα 5.22: Η γραφική διεπαφή στο Grafana.

Τέλος, παρουσιάζονται ξεχωριστές χρονοσειρές για τη θερμοκρασία, την υγρασία και την πίεση. Η παράλληλη εξέταση αυτών των μεγεθών παρέχει καλύτερη εικόνα για τις συνθήκες στο πεδίο και διευκολύνει την ερμηνεία της πρόβλεψης του ταξινομητή. Στο εν λόγω dashboard, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το χρονικό διάστημα για την αναδρομική εξέταση προηγούμενων μετρήσεων. Το όριο ενεργοποίησης συναγερμού για τη φωτιά είναι 67%. Η γραφική διεπαφή του συστήματος διατίθεται δημόσια μέσω του αντίστοιχου dashboard [72].

5.8 Ειδοποιήσεις χρήστη

Η συνεχής παρακολούθηση ενός dashboard από τον χρήστη δεν δύναται να είναι δεδομένη σε ένα πραγματικό σύστημα πρώιμης ανίχνευσης. Υπάρχει ανάγκη λοιπόν για ειδοποίηση όταν συμβαίνουν συγκεκριμένες καταστάσεις.

Η σημαντικότερη ειδοποίηση αφορά την ένδειξη πιθανής φωτιάς. Για την ενεργοποίησή της χρησιμοποιείται η τιμή `fire_probability`, όταν αυτή είναι πάνω από 67% τότε ικανοποιείται η συνθήκη που έχει οριστεί από τον κανόνα συναγερμού και δημιουργείται συμβάν τύπου `Probable Wildfire`. Η ειδοποίηση περιλαμβάνει περισσότερη πληροφορία από μια απλή ένδειξη ενεργοποίησης. Στο μήνυμα που αποστέλλεται περιλαμβάνονται το `device_id`, η πιθανότητα φωτιάς, η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση που συνδέονται με το συμβάν. Επιπλέον εμφανίζονται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του κόμβου και υπάρχει σύνδεσμος χάρτη, ώστε ο παραλήπτης να μπορεί να εντοπίσει άμεσα την περιοχή στην οποία υπάρχει πιθανή πυρκαγιά. Η συμπερίληψη των περιβαλλοντικών δεδομένων επιτρέπει την επισκόπηση της περιοχής χωρίς να μπει κανείς στο dashboard. Οι γεωγραφικές πληροφορίες μετατρέπουν ένα αφηρημένο συναγερμό μιας IoT συσκευής σε πληροφορία συσχετισμένη με φυσική θέση.

Ο μηχανισμός του Grafana υποστηρίζει τη μετάβαση του συναγερμού από κατάσταση `Firing` σε `Resolved`. Αυτό σημαίνει ότι όταν η συνθήκη του συναγερμού παύσει να ισχύει, αποστέλλεται αντίστοιχη ενημέρωση ότι το συγκεκριμένο alert έχει αποκατασταθεί. Στο Σχήμα 5.23, τέθηκε ως συνθήκη η τιμή `fire_probability` να είναι μεγαλύτερη του 0.02, με σκοπό να ενεργοποιηθεί.

 1 firing instances

Firing
Probable Wildfire
View alert

Summary

 Wildfire alert - ed1 - 0.07%

Description

Wildfire probability exceeded the 67% threshold.

Device ID: ed1

Fire probability: 0.07%

Temperature: 31.05 °C
Humidity: 53.06 %
Pressure: 101031.7 Pa

Latitude: 40.6473784822518
Longitude: 22.9393416978973

Map:
<https://www.openstreetmap.org/?mlat=40.6473784822518&mlon=22.9393416978973#map=18/40.6473784822518/22.9393416978973>

Σχήμα 5.23: Ειδοποίηση για πιθανή πυρκαγιά.

Εκτός από την ανίχνευση φωτιάς, δημιουργήθηκε μια ακόμη ειδοποίηση για την κατάσταση του ίδιου του συστήματος. Δημιουργήθηκε η ειδοποίηση χαμηλής στάθμης μπαταρίας, η οποία ενεργοποιείται όταν η τιμή από το πεδίο που στάλθηκε είναι χαμηλότερη από 20. Όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη, αποστέλλεται alert τύπου Low Battery, στο οποίο αναφέρεται η συσκευή, το NodeID, η εναπομένουσα στάθμη μπαταρίας και η θέση του κόμβου. Η εν λόγω ειδοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 5.24.

Η ύπαρξη τέτοιων λειτουργικών συναγερμών είναι απαραίτητη σε ένα απομακρυσμένο δίκτυο αισθητήρων. Η απουσία συναγερμού όταν ένας κόμβος δεν χαρακτηρίζεται ως Online, δεν έχει την ίδια σημασία. Για τον λόγο αυτό, η εποπτεία δεν πρέπει να αρκείται στην έξοδο ενός μοντέλου, αλλά να περιλαμβάνει και μεταβλητές που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

 1 firing instances

Firing
Low Battery
View alert

Summary

Low battery — ed1 (Node 0)

Description

Low battery detected.

Device: ed1
NodeID: 0
Battery remaining: 0%

Location:
40.6473784822518, 22.9393416978973

Map:
<https://maps.google.com/?q=40.6473784822518,22.9393416978973>

Σχήμα 5.24: Ειδοποίηση για χαμηλό φορτίο μπαταρίας κόμβου.

5.9 Επίλογος

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η υλοποίηση των επιμέρους επιπέδων του προτεινόμενου συστήματος πρώιμης ανίχνευσης πυρκαγιάς, από τη συλλογή περιβαλλοντικών μετρήσεων, τη μετάδοση, την ανάλυση, την αποθήκευση και τελικά της παρουσίασης και αποστολής ειδοποιήσεων στον χρήστη.

Η τερματική συσκευή συνδυάζει τον μικροελεγκτή με τον αισθητήρα BME688 και τον πομποδέκτη LoRa, πραγματοποιεί περιοδικά έναν κύκλο μέτρησης και μετάδοσης. Οι μετρήσεις μεταφέρονται μέσω του LoRaWAN προς την πύλη και με τη χρήση ασύρματης οπισθοζευκτικής επικοινωνίας (Wi-Fi), προωθούνται με UDP τα πακέτα προς το The Things Stack. Μέσω της υποδομής The Things Stack φθάνουν στο επίπεδο εφαρμογής. Εκεί αποκωδικοποιούνται τα δεδομένα και η εφαρμογή και καλείται το μοντέλο μηχανικής μάθησης από το οποίο προκύπτει η πιθανότητα φωτιάς.

Οι πρωτογενείς μετρήσεις, οι πληροφορίες της ασύρματης επικοινωνίας και η πιθανότητα φωτιάς αποθηκεύονται στο InfluxDB ως χρονικά εξαρτημένες εγγραφές. Το Grafana χρησιμοποιεί τα δεδομένα αυτά για την απεικόνιση της γεωγραφικής και της λειτουργικής κατάστασης του δικτύου. Επίσης, παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των σημαντικότερων μεταβλητών.

Τέλος, μέσω του μηχανισμού ειδοποιήσεων που διαθέτει το Grafana, η επιτήρηση διάφορων μεγεθών, γίνεται πιο ενεργή. Η υπέρβαση του προκαθορισμένου ορίου πιθανότητας φωτιάς, οδηγεί στην αποστολή ειδοποιήσεων στον χρήστη. Παρόμοια ειδοποίηση υλοποιήθηκε και για την παρακολούθηση παραμέτρων για την κατάσταση των κόμβων, όπως η στάθμη της μπαταρίας.

Κεφάλαιο 6ο: Αξιολόγηση συστήματος με μετρήσεις στο πεδίο

6.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της σχεδίασης, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραματικών δοκιμών και μετρήσεων σε συνθήκες που προσεγγίζουν το πραγματικό περιβάλλον της εφαρμογής. Η αξιολόγηση επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς άξονες: την απόδοση της ασύρματης ζεύξης, στην απόκριση του υποσυστήματος ανίχνευσης υπό συνθήκες ελεγχόμενης καύσης και στην ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου.

Για την αξιολόγηση της ασύρματης επικοινωνίας, χρησιμοποιήθηκε από το ανοικτό σύνολο δεδομένων των Oliveira et al. [73], το οποίο περιέχει μετρήσεις RSSI από το LoRaWAN δίκτυο, το υποσύνολο που αφορά τις μετρήσεις υπό συνθήκες οπτικής επαφής (Line Of Sight – LOS). Αυτό για να διερευνηθεί η μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος συναρτήσει της απόστασης, χωρίς την έντονη επίδραση της βλάστησης. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δασικό περιβάλλον στο νομό Πιερίας, όπου η παρουσία δέντρων, φυλλώματος, ανισόπεδου εδάφους, εμποδίων και πολλαπλών διαδρομών διάδοσης εισάγει επιπλέον θόρυβο.

Για την παραπάνω ερμηνεία των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκαν διάφορα μοντέλα διάδοσης. Το εμπειρικό μοντέλο Log-Distance εφαρμόστηκε πάνω σε πραγματικές μετρήσεις, το θεωρητικό μοντέλο εξασθένησης λόγω βλάστησης Weissberger Modifier Exponential Decay και η σύσταση ITU-R P.833-10. Όσον αφορά τη σύσταση ITU-R P.833-10, η ειδική απόσβεση βρέθηκε μέσω γραμμικής παλινδρόμησης μιας και υπάρχουν οι τιμές για τις συχνότητες 466.475 MHz και 949 MHz είναι καταγεγραμμένες και είναι οι κοντινότερες στη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος μου. Η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων δεν αποσκοπεί σε ακριβή πρόβλεψη της λαμβανόμενης ισχύος σε κάθε σημείο του πεδίου, αλλά επιτρέπει την κατανόηση της γενικής συμπεριφοράς της διάδοσης και της επίδρασης της βλάστησης.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα ελεγχόμενης καύσης για την αξιολόγηση της μεθόδου ανίχνευσης. Εντοπίστηκαν αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων τα οποία εξετάζονται στην ενότητα 6.3. Τέλος, εξετάστηκε η ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου, με στόχο την εκτίμηση της ενεργειακής αυτονομίας του, χωρίς να υπάρχει φωτοβολταϊκή μονάδα.

6.2 Μετρήσεις διάδοσης

Κρίσιμος παράγοντας για την αξιοπιστία του συστήματος δεν είναι μόνο η ανίχνευση πυρκαγιών, αλλά και η επιτυχής ασύρματη μετάδοση μέσα σε δασικό περιβάλλον. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στην ζώνη των 868 MHz, με SF8, ισχύς εκπομπής 12 dBm και εύρος ζώνης 125 kHz. Ως κύριος δείκτης χρησιμοποιήθηκε ο RSSI, λήφθηκαν υπόψιν και οι SNR, PDR.

6.2.1 Μετρήσεις διάδοσης υπό συνθήκες οπτικής επαφής

Το υποσύνολο που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία, ανήκει στους Oliveira et al., σε αυτό υπήρχε οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, ενώ η απόσταση μεταβαλλόταν από 6.25 μέτρα έως τα 100, με βήμα 6.25 μέτρα και εξετάστηκαν 3 διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής: 2 dBm, 12 dBm, 20 dBm [73]. Σε κάθε βήμα και για κάθε τιμή ισχύος εκπομπής, υπάρχουν 100 μετρήσεις.

Πίνακας 6.1: Μέση τιμή μετρούμενου RSSI συναρτήσει της απόστασης

Απόσταση μ	Ισχύς 2dBm	Ισχύς 12 dBm	Ισχύς 20 dBm
6.25	-55.18	-45.74	-35.44
12.5	-52.32	-42.84	-38.92
18.75	-59.67	-50.23	-45.05
25	-54.08	-44.81	-39.36
31.25	-56.78	-47.24	-42.27
37.5	-61.35	-52.37	-47.12
43.75	-61.16	-52.21	-47.13
50	-65.75	-56.71	-51.97
56.25	-73.51	-64.22	-59.15
62.5	-65.58	-56.31	-51.58
68.75	-69.21	-57.83	-52.89
75	-68.43	-58.86	-53.83
81.25	-68.78	-59.2	-53.89
87.5	-69.63	-60.1	-55.2
93.75	-70.93	-61.31	-57.02
100	-72.64	62.93	-59.37

Από τα πειράματα παρατηρείται η αναμενόμενη μείωση της λαμβανόμενης ισχύος, όταν αυξάνεται η απόσταση. Για ισχύ εκπομπής 2 dBm η τιμή μεταβλήθηκε από -52.32 dBm στα 12.5m, σε -72.64 dBm στα 100m. Για ισχύ εκπομπής 12 dBm η τιμή μεταβλήθηκε από -42.84 dBm στα 12.5m, σε -62.93 dBm στα 100m. Για ισχύ εκπομπής 20 dBm η τιμή μεταβλήθηκε από -38.92 dBm στα 12.5m, σε -59.37 dBm στα 100m. Η διαφορά της λαμβανόμενης ισχύος ανάμεσα στις 2 αποστάσεις, είναι περίπου 20 dB, αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης, εισάγονται γύρω στις 20dB πρόσθετες απώλειες.

Βέβαια η μεταβολή δεν είναι αυστηρά μονότονη. Σε ορισμένες διαδοχικές αποστάσεις εμφανίζονται τοπικές αυξήσεις στο RSSI, παρά την αύξηση της απόστασης. Η συμπεριφορά αυτή θεωρείται φυσιολογική σε πραγματικά ασύρματα κανάλια λόγω ανακλάσεων στο έδαφος και σε αντικείμενα, πολυδιαδρομική διάδοση και μικρές μεταβολές στη γεωμετρία των κεραιών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετρήσεις με εκπεμπόμενη ισχύ 12 dBm, καθώς η συγκεκριμένη χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τη διαμόρφωση του σήματος. Για την ποσοτική ανάλυση της εξάρτησης του RSSI από την απόσταση εφαρμόστηκε το μοντέλο Log-Distance:

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (6.1)$$

Όπου το d_0 είναι μια απόσταση αναφοράς και n ο εκθέτης απωλειών διάδοσης. Η προσαρμογή του μοντέλου στις LOS μετρήσεις των 12 dBm έδωσε: $n_{LOS} = 1.72$, Mean Absolute Error (MAE) = 2.35 dB, Root Mean Square Error (RMSE) = 3.27 dB, συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.752$ και τυπική απόκλιση σφάλματος $\sigma = 3.38$ dB. Η τιμή του R^2 υποδεικνύει ότι η μεταβολή του RSSI στις εν λόγω μετρήσεις μπορούν να εκφραστούν μέσω της απόστασης. Γενικά το πεδίο τιμών του R^2 είναι το $[0,1]$ και μετράει το ποσοστό της μεταβολής. Παράλληλα, η μικρή τιμή του RMSE δείχνει ότι η διασπορά είναι περιορισμένη, γύρω από τη μέση τάση του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί, η ιδανική τιμή του n

(ελεύθερος χώρος) είναι το 2, μικρότερες τιμές απ' αυτό μπορεί να οφείλονται στο φαινόμενο κυματοδηγού που προκαλείται από ισχυρές και συνεχείς ανακλάσεις του σήματος στις γύρω επιφάνειες [74]. Συνολικά οι LOS μετρήσεις χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς για τη συμπεριφορά της ζεύξης, όταν δεν υπάρχουν πολλά εμπόδια στο πεδίο.

6.2.2 Μετρήσεις διάδοσης στο πεδίο

Σε αυτό το στάδιο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικό δασικό περιβάλλον. Στο εν λόγω περιβάλλον, υπήρχε πυκνή βλάστηση σε μερικά σημεία, δέντρα διαφορετικού ύψους, φυλλώματα και τοπικές υψομετρικές μεταβολές του εδάφους. Οι μετρήσεις έγιναν 28 Σεπτεμβρίου 2024 σε δασική περιοχή κοντά στον οικισμό Αλώνια Πιερίας, η θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 26 °C, η σχετική υγρασία 60%, η ατμοσφαιρική πίεση 989 hPa και δεν υπήρχε βροχόπτωση. Σχετικές εικόνες της περιοχής φαίνονται στο Σχήμα 6.1.

Οι μεταδόσεις πραγματοποιήθηκαν με ισχύ 12 dBm, SF8 και εύρος ζώνης 125kHz. Για κάθε ληφθέν πακέτο, καταγράφηκαν ο αριθμός πακέτου (για να είναι εφικτός ο προσδιορισμός πακέτων που δεν λήφθηκαν), οι συντεταγμένες του, ο SNR και ο RSSI. Για την οπτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, οι RSSI μετρήσεις τοποθετήθηκαν πάνω σε γεωγραφικό χάρτη και απεικονίζονται χρωματικά ανάλογα με την τιμή του RSSI. Η χωρική κατανομή των μετρήσεων που λήφθηκαν, φαίνεται στο Σχήμα 6.2.

Η γεωγραφική απεικόνιση τονίζει τη σημαντική τοπική μεταβλητότητα της λαμβανόμενης ισχύος. Σημεία που βρίσκονται κοντά εμφανίζουν διαφορετικές τιμές RSSI. Αυτή η παρατήρηση καθίσταται σημαντική, γιατί αναδεικνύει ότι μια απλή ακτινική περιγραφή της κάλυψης με βάση την απόσταση δεν αντικατοπτρίζει την αλήθεια σε δασικές περιοχές. Οι αποκλίσεις μπορούν να αποδοθούν σε συνδυασμό διαφορετικών φαινομένων διάδοσης. Η διέλευση του ΗΜ κύματος μέσα από κορμούς και φυλλώματα προκαλεί απορρόφηση και σκέδαση, ενώ η ανομοιογενής κατανομή της βλάστησης δημιουργεί πολλαπλές διαδρομές και αλλάζει το πραγματικό μήκος της διάδοσης. Επιπλέον, το ανάγλυφο μπορεί να προκαλέσει παρεμπόδιση της πρώτης ζώνης Fresnel, ενώ τοπικές ανακλάσεις και πολλαπλές διαδρομές οδηγούν σε ενισχυτικές ή καταστροφικές συμβολές. Συνεπώς, η έντονη μεταβλητότητα που παρατηρήθηκε είναι λογική και έχει αναφερθεί σε πειραματικές μελέτες LoRa στα 868 MHz σε μεσογειακά περιβάλλοντα, όπου η βλάστηση και η πολυδιαδρομική διάδοση προκαλούν σημαντικές διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας [75].

Για την περαιτέρω διερεύνηση της εξάρτησης από την απόσταση εφαρμόστηκε εκ νέου το μοντέλο Log-Distance. Στο υπολογισμό της απόστασης χρησιμοποιήθηκε η τρισδιάστατη απόσταση μεταξύ των κεραιών, λήφθηκε επίσης υπόψη το υψόμετρο (elevation μέσω του QGIS):

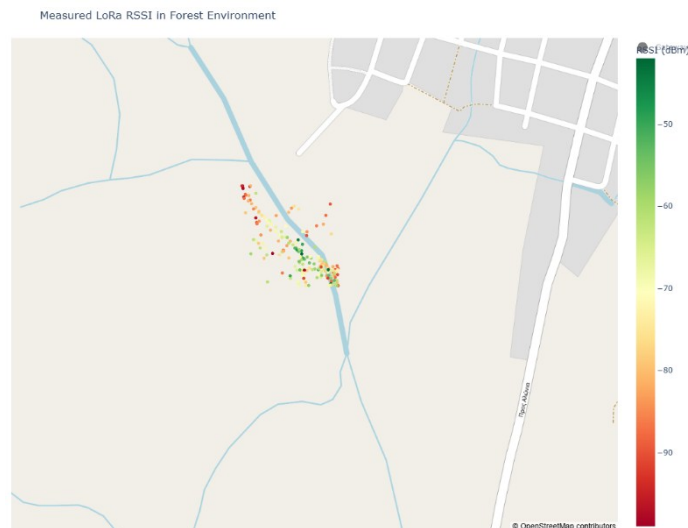
$$d_{3D} = \sqrt{d_h^2 + \Delta h^2} \quad (6.2)$$

Όπου d_h είναι η οριζόντια απόσταση που υπολογίζεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες και Δh η κάθετη διαφορά ύψους. Στα ύψη προστίθενται και τα ύψη των κεραιών. Η προσαρμογή στις μετρήσεις του δασικού περιβάλλοντος έδωσε περίπου $n \approx 3.02$, μια τιμή σημαντικά μεγαλύτερη από το $n_{LOS} \approx 1.72$, όπου υπήρχε οπτική επαφή.

Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη διασπορά των μετρήσεων γύρω από τη θεωρητική καμπύλη, αυτό δεν επιτρέπει τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, ως σημειακού μέσου πρόβλεψης του RSSI. Αυτή η παρατήρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς σημαίνει ότι, η μοντελοποίηση του RSSI λαμβάνει υπόψη κι άλλες συνιστώσες. Όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί, γενικά, ως μια εκτίμηση της τάσης εξασθένισης του σήματος.



Σχήμα 6.1: Εικόνες του πεδίου κατά τις μετρήσεις διάδοσης.



Σχήμα 6.2: Χωρική κατανομή μετρήσεων RSSI.

6.2.3 Μοντελοποίηση διάδοσης

Πέρα από την εμπειρική προσαρμογή του μοντέλου Log-Distance, εξετάστηκαν θεωρητικές προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη βλάστησης στο πεδίο. Επιλέχθηκαν η σύσταση του ITU η ITU-R P.833-10 και το μοντέλο Weissberger Modified Exponential Decay.

Για τη θεωρητική σύγκριση θεωρήθηκαν $f = 868 \text{ MHz}$, $P_{Tx} = 12 \text{ dBm}$, $h_{GW} = 15 \text{ m}$ και $h_{node} = 3 \text{ m}$.

Για την εκτίμηση του τμήματος διαδρομής που διέρχεται από τη βλάστηση θεωρήθηκε μέσο ύψος 12m. Η συγκεκριμένη τιμή είναι απλούστευση και όχι ακριβής χαρτογράφηση του ύψους των δέντρων σε κάθε σημείο. Αρχικά υπολογίζεται οι απώλειες ελεύθερου χώρου:

$$L_{bf} = 32.44 + 20 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} d_{km} \quad (6.3)$$

Και στη συνέχεια προστέθηκε η πρόσθετη απώλεια που προβλέπει κάθε μοντέλο βλάστησης:

$$L_{Total} = L_{bf} + L_{veg} \quad (6.4)$$

Αν τα κέρδη των κεραιών θεωρούνται μηδενικά, όπως και οι πρόσθετες απώλειες του συστήματος, η θεωρητική λαμβανόμενη ισχύς υπολογίζεται ως:

$$P_R = P_T - L_{Total} \quad (6.5)$$

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ως θεωρητική πρόβλεψη του RSSI.

Η ITU-R P.833-10 περιγράφει την πρόσθετη εξασθένηση που μπορεί να προκαλείται από τη βλάστηση και επισημαίνει ότι η συγκεκριμένη εξασθένηση εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από το είδος, την πυκνότητα, την περιεκτικότητα σε νερό και τη γεωμετρία της ζεύξης [76]. Στην περίπτωση όπου ένα τερματικό βρίσκεται μέσα σε δασική έκταση, η πρόσθετη εξασθένηση μπορεί να γραφτεί ως:

$$A = A_m (1 - e^{-\frac{d_v \gamma}{A_m}}) \quad (6.6)$$

Όπου d_v είναι το μήκος της διαδρομής μέσα στη βλάστηση, γ η ειδική εξασθένηση ανά μονάδα μήκος για μικρά μήκη βλάστησης, το A_m είναι η μέγιστη πρόσθετη εξασθένηση. Για την εύρεση του A_m χρησιμοποιήθηκε η σχέση που η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα με $A_1 = 1.37$ και $\alpha = 0.42$ οι οποίες προέρχονται από μετρήσεις της ITU-R σε μικτό δάσος κωνοφόρων και φυλλοβόλων δέντρων [76].

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (6.7)$$

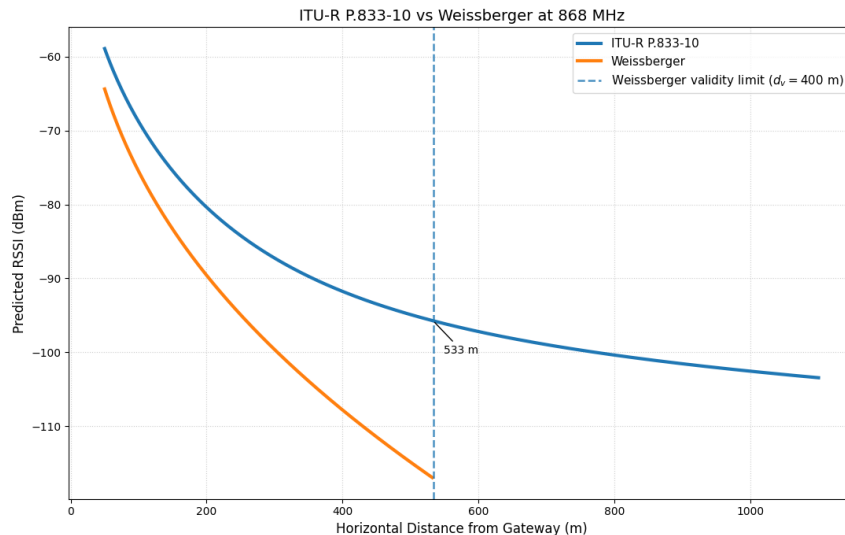
Η μέγιστη πρόσθετη εξασθένηση στη συχνότητα λειτουργίας των 868 MHz είναι περίπου 23.5dB. Η ειδική απόσβεση $\gamma = 0.162$ dB/m εκτιμήθηκε μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ καταγεγραμμένων τιμών της ITU-R P.833-10. Συνεπώς η παραπάνω τιμή δεν αποτελεί τυποποιημένη τιμή της ITU-R για τα 868 MHz, χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη συγκεκριμένη θεωρητική σύγκριση.

Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί το μοντέλο Weissberger Modified Exponential Decay, το οποίο έχει αναπτυχθεί για την εκτίμηση απωλειών σε περιβάλλοντα με βλάστηση, εφαρμόζεται για συχνότητες λειτουργίας από 230 MHz έως 95 GHz και μήκος διαδρομής μέσα από τη βλάστηση έως 400 μέτρα [77]. Για μικρές αποστάσεις έως και 14 μέτρα, η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$A_{WMED} = \begin{cases} 1.33 f^{0.284} d^{0.588} & , 14m \leq d \leq 400m \\ 0.45 f^{0.284} d & , 0 \leq d \leq 14m \end{cases} \quad (6.8)$$

όπου η συχνότητα f εκφράζεται σε GHz και η απόσταση σε d σε μέτρα. Στην τιμή των 14m οι εξισώσεις των δύο κλάδων της συνάρτησής είναι περίπου το ίδιο. Το μοντέλο επίσης εκτιμά την πρόσθετη απώλεια εξαιτίας της βλάστησης, συνεπώς, η συνολικές απώλεια υπολογίζονται ως:

$$L = L_{bf} + A_{WMED} \quad (6.9)$$



Σχήμα 6.3: Σύγκριση προβλεπόμενου RSSI μεταξύ των μοντέλων Weissberger και ITU-R P.833-10.

Στο Σχήμα 6.3 παρατηρείται ότι, τα δύο μοντέλα έχουν σχετικά παρόμοια ποιοτική συμπεριφορά, ήτοι όσο αυξάνεται το μήκος της διαδρομής, μειώνεται ο RSSI. Παρουσιάζουν όμως αισθητή ποσοτική απόκλιση, όσο αυξάνεται το μήκος της διαδρομής. Το παραπάνω γράφημα ισχύει προφανώς έχοντας κάνει τις παραδοχές ότι υπάρχει ισόπεδο έδαφος. Στη κάθετη γραμμή, παρατηρείται η ένδειξη 533m, ενώ το μοντέλο Weissberger φθάνει μέχρι 400m, αυτό διότι θεωρείται ύψος κεραίας πύλης στα 15m και ύψος κεραίας κόμβου στα 3m. Συνεπώς, η οριζόντια απόσταση διάδοσης είναι μεγαλύτερη από την «υποτεινόμενη» που είναι η μικρότερη διαδρομή.

Η διαφορά των δύο θεωρητικών προβλέψεων έγκειται στο γεγονός ότι βασίζονται σε διαφορετικά πειραματικά δεδομένα και διαφορετικές παραδοχές. Δεν λαμβάνουν λεπτομερή χαρτογράφηση της βλάστησης, των κορμών, της μορφολογία του εδάφους ή της απόφραξης της πρώτης ζώνης Fresnel. Ως αποτέλεσμα, το Weissberger είναι περισσότερο συντηρητικό για μεγάλες αποστάσεις.

Στην παρούσα εργασία, τα ITU-R P.833-10 και Weissberger χρησιμοποιούνται ως θεωρητικά σημεία αναφοράς και οι πραγματικές μετρήσεις του πεδίου παραμένουν το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της ασύρματης ζεύξης.

6.3 Μετρήσεις με αισθητήρα υπό συνθήκες ελεγχόμενης καύσης

Για την αξιολόγηση του υποσυστήματος ανίχνευσης πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων υπό συνθήκες ελεγχόμενης καύσης. Στόχος ήταν η συλλογή δεδομένων από την απόκριση του αισθητήρα BME688, όταν αυτός βρίσκεται σε ανοιχτό χώρο σε πραγματικές συνθήκες καύσης/φωτιάς. Έπειτα έγινε η σύγκριση με την απόκριση όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε ανοιχτό χώρο χωρίς να υπάρχει παρουσία καύσης/φωτιάς.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό firmware και μικροελεγκτής και συλλέγεται η θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, εκτελείται το προφίλ λειτουργίας του μικροθερμαντήρα και αποθηκεύεται το διάνυσμα της εξίσωσης 5.6 μαζί με τον αριθμό δείγματος και το χρόνο σε s. Έπειτα, αναμένει 60000 ms. Συλλέχθηκαν πολλές μετρήσεις, δεν κρατήθηκαν όλες στο σύνολο δεδομένων στο οποίο εκπαιδεύτηκε το μοντέλο μηχανικής μάθησης, διότι οι περισσότερες δεν ήταν σε συνθήκες καύσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Απρίλιο και Ιούλιο του 2026 καθώς και Αύγουστο του 2025. Το τελικό σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην

αξιολόγηση περιλάμβανε 445 παρατηρήσεις. Από αυτές οι 145 αντιστοιχούσαν σε συνθήκες καύσης, ενώ οι υπόλοιπες σε περιβάλλον χωρίς καύση. Η βαθμονόμηση έγινε μέσω λογισμικού, όπως και η σύγκριση των μετρήσεων, με τη χρήση των ανοιχτών περιβαλλοντικών δεδομένων που παρέχει το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών Wunderground [78]. Μέσω του Wunderground καθίσταται δυνατή η ανάκτηση ιστορικών, χρονικά συσχετισμένων δεδομένων σχετικά με τη θερμοκρασία (σε °C ή °F), το σημείο δρόσου (Dew Point σε °C ή °F), σχετική υγρασία (σε %), διεύθυνση ανέμου (χωρισμένο σε 16 διευθύνσεις), ταχύτητα ανέμου (σε km/h), ριπή ανέμου (Gust σε km/h), ατμοσφαιρική πίεση (σε hPa), ρυθμό βροχόπτωσης (σε mm), συσσωρευμένη βροχόπτωση (σε mm), δείκτης UV (0 έως 11+) και ηλιακή ακτινοβολία (σε w/m²).

6.3.1 Πειραματική συλλογή δεδομένων

Για να δημιουργηθεί το υποσύνολο δεδομένων που αντιστοιχεί στην κλάση FIRE, πραγματοποιήθηκαν ελεγχόμενα πειράματα με ιδιαίτερη μέριμνα στον έλεγχο και στην διαφοροποίηση της καύσιμης ύλης (ποιοτικά και ποσοτικά). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 3 πειράματα στα οποία καταγράφηκε η καύσιμη ύλη ούτως ώστε να καταγραφεί η απόκριση του αισθητήρα κάτω από διάφορες συνθήκες καύσης και όχι αποκλειστικά στην αναγνώριση ενός υλικού.

Οι ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν καταγράφηκαν πριν από την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Οι βασικές συνθέσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2:

Πίνακας 6.2: Βασικά είδη και ποσότητες φυτικής καύσιμης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν

Πείραμα	Καύσιμη ύλη	Μάζα	Παρατήρηση
1	Ίνες φοίνικα και πλάτανος (<i>Platanus orientalis</i>)	505g	-
1	Ξηρό άχυρο σίτου (<i>Triticum sp.</i>)	240g	Ξηρό
2	Χρυσόξυλο (<i>Cotinus coggygia</i>)	233g	Υγρό
2	Πλάτανος (<i>Platanus orientalis</i>) και πεύκη (<i>Pinus halepensis</i>)	182g	Υγρό
3	Ελιά (<i>Olea europaea</i>)	310g	-
3	Αμυγδαλιά (<i>Prunus dulcis</i>) και ακακία (<i>Acacia sp.</i>)	665g	-

Η κλάση FIPE δεν αντιπροσωπεύει κατ' ανάγκη μια μοναδική και σταθερή φυσική κατάσταση, γι' αυτό κι έγινε χρήση διαφορετικών συνθηκών υγρασίας. Η περιεκτικότητα μιας ύλης σε υγρασία και η εξέλιξη της καύσης συναρτήσει του σταδίου καύσης διαφοροποιούν σημαντικά την παραγόμενη αέρια υπογραφή. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο να εμφανίζονται διαφορές ακόμη και μεταξύ παρατηρήσεων στην ίδια κλάση.

6.3.2 Πειραματική συλλογή δεδομένων

Όπως είχε αναφερθεί και στην ενότητα 5.6.2, κρίνεται απαραίτητη η τυποποίηση μέσω του StandardScaler για την εφαρμογή τεχνικών ανάλυσης του χώρου χαρακτηριστικών. Για κάθε χαρακτηριστικό x_j η μετασχηματισμένη τιμή υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως στη Σχέση 5.6.

6.3.3 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών

Αρχικά εφαρμόστηκε ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA), με στόχο τη γραμμική προβολή του χώρου σε δύο διαστάσεις. Η PCA δημιουργεί ασυσχέτιστες μεταξύ τους μεταβλητές, οι οποίες λέγονται κύριες συνιστώσες και επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να εξηγούν διαδοχικά τη μέγιστη δυνατή διακύμανση των αρχικών δεδομένων [79].

Ο πίνακας συνδιακύμανσης του τυποποιημένου πίνακα Z γράφεται ως εξής:

$$C = \frac{1}{N-1} Z^T Z \quad (6.10)$$

Οι κύριες συνιστώσες προκύπτουν από τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα C , μέσω της σχέσης:

$$C v_k = \lambda_k v_k \quad (6.11)$$

, όπου το v_k είναι k -οστό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα συνδιακύμανσης C άρα η διεύθυνση της k -οστής κύριας συνιστώσας. Η λ_k είναι η ιδιοτιμή η οποία εκφράζει την διακύμανση της k -οστής κύριας συνιστώσας.

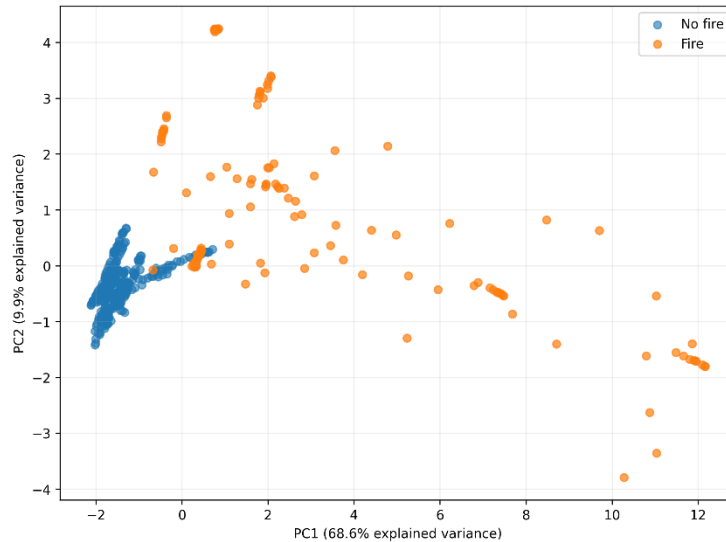
Η εφαρμογή της PCA στο σύνολο δεδομένων δίνει:

$$PC_1 = 68.57\% \text{ και } PC_2 = 9.87\% \quad (6.12)$$

Επομένως, οι δύο πρώτες κύριες συνιστώσες εξηγούν συνολικά το 78.45% της συνολικής διακύμανσης. Το οποίο σημαίνει ότι σημαντικό μέρος της πληροφορίας του αρχικού δεκατριδιάστατου χώρου μπορεί να αποτυπωθεί σε μια δισδιάστατη γραμμική προβολή, αυτή η απεικόνιση φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι, όλες οι παρατηρήσεις της κλάσης NO FIRE εμφανίζονται στον οριζόντιο άξονα (συνιστώσα PC_1), στις αρνητικές ή σε μικρές θετικές τιμές, ενώ το μεγάλο μέρος της κλάσης FIRE μετατοπίζεται προς τις θετικές τιμές του ίδιου άξονα (εξού και το αποτέλεσμα της εξίσωσης 6.12).

Το αποτέλεσμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι, η PCA δεν λαμβάνει υπόψιν τις κλάσεις κατά τον υπολογισμό των κύριων συνιστωσών, αποτελεί μη επιβλεπόμενη τεχνική. Κατά συνέπεια, η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κλάσεων υποδεικνύει ότι η καύση συνοδεύεται από σημαντικές μεταβολές στην ίδια τη δομή των χαρακτηριστικών. Επίσης σημαντική πληροφορία εξάγεται από τους συντελεστές της πρώτης κύριας συνιστώσας PC_1 . Οι μεγαλύτερες απόλυτες τιμές για την PC_1 , εμφανίστηκαν στα περισσότερα χαρακτηριστικά της αντίστασης αερίου, στον Πίνακα 6.3 έχουν καταγραφεί οι τιμές τους.

Στους συντελεστές της PC_2 , τη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή εμφανίζει το Gas0 ενώ σημαντική συνεισφορά παρουσιάζουν η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση, στον Πίνακα 6.4 έχουν καταγραφεί οι τιμές τους. Η δεύτερη κύρια συνιστώσα φαίνεται λοιπόν να περιγράφει τις δευτερεύουσες διαφοροποιήσεις της απόκρισης, όπου συμμετέχουν σε καλό βαθμό και οι περιβαλλοντικές παράμετροι. Τέλος το πρόσημο των ιδιοδιανυσμάτων στην PCA είναι συμβατικό και μπορεί να αντιστραφεί χωρίς να μεταβληθεί η φυσική σημασία. Συνεπώς, για την ερμηνεία των συντελεστών έχει μεγαλύτερη σημασία το μέγεθος και η σχέση τους, και όχι το πρόσημο.



Σχήμα 6.4: PCA FIRE/NO FIRE

Πίνακας 6.3: Οι κυριότεροι συντελεστές της PC₁

Χαρακτηριστικό	Συντελεστής
Gas_6	0.3135
Gas_2	0.312
Gas_5	0.3098
Gas_1	0.3047
Gas_8	0.3032

Πίνακας 6.4: Οι κυριότεροι συντελεστές της PC₂

Χαρακτηριστικό	Συντελεστής
Gas_0	0.5891
Temperature	0.4309
Humidity	-0.4026
Pressure	0.3177

6.3.4 Ανάλυση μέσω t-SNE

Για τη διερεύνηση μη γραμμικών σχέσεων εφαρμόστηκε η τεχνική t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE). Εν αντιθέσει, με την PCA, η οποία προβάλλει γραμμικά, η t-SNE αποτελεί μη γραμμική τεχνική μείωσης των διαστάσεων ενός συνόλου, σχεδιασμένη κυρίως για την οπτικοποίηση της τοπικής δομής δεδομένων που βρίσκονται σε μεγάλες διαστάσεις [80].

Στον αρχικό χώρο χαρακτηριστικών, η ομοιότητα μεταξύ δύο παρατηρήσεων x_i και x_j περιγράφεται μέσω πιθανότητας της μορφής:

$$p_{j|i} = \frac{e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma_i^2}}}{\sum_{k \neq i} e^{-\frac{\|x_i - x_k\|^2}{2\sigma_i^2}}} \quad (6.13)$$

Στην παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται στους αριθμητές η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των παρατηρήσεων και διαιρείται με το σ_i που είναι μια παράμετρος που καθορίζει το τοπικό εύρος γύρω από την i -οστή παρατήρηση. Η παράμετρος σ_i υπολογίζεται έμμεσα μέσω της υπερπαραμέτρου perplexity. Έπειτα, απ' το άθροισμα βγαίνει η ομοιότητα με όλα τα άλλα σημεία. Η p_{ji} είναι η πιθανότητα η παρατήρηση j να θεωρηθεί γειτονική της i . Έπειτα οι υπό συνθήκη πιθανότητες «συμμετρικοποιούνται» ως:

$$p_{ij} = \frac{p_{j|i} + p_{i|j}}{2N} \quad (6.14)$$

, όπου N ο συνολικός αριθμός παρατηρήσεων.

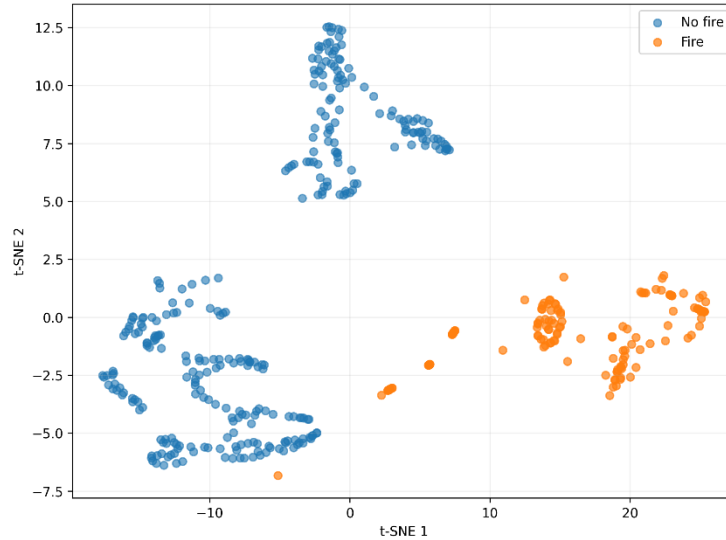
Μετά, στον χώρο χαμηλότερης διάστασης, οι παρατηρήσεις συσχετίζονται με βάση την κατανομή t-Student:

$$q_{ij} = \frac{(1 + \|y_i - y_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq l} (1 + \|y_k - y_l\|^2)^{-1}} \quad (6.15)$$

, y_i και y_j : οι παρατηρήσεις στο χώρο προβολής και q_{ij} , η ομοιότητα μεταξύ των σημείων στο νέο χώρο.

Τέλος το t-SNE προσπαθεί να κάνει τις δύο κατανομές των σημείων, όσο πιο όμοιες γίνεται, ελαχιστοποιώντας την απόκλιση Kullback-Leibler. Με λίγα λόγια προσπαθεί να φέρει κοντά τα σημεία στον δισδιάστατο χώρο, που ήταν εγγύτερα στον αρχικό χώρο μεγαλύτερων διαστάσεων. Ο εν λόγω αλγόριθμος υπολογιστικά είναι αρκετά βαρύς, στην κλασική του υλοποίηση η χρονική του πολυπλοκότητα είναι $O(N^2)$, ενώ η χωρική πολυπλοκότητα είναι $O(N^2)$. Μέσω της κλάσης `sklearn.manifold.TSNE`, μπορεί κανείς να ορίσει αν θέλει να γίνουν οι υπολογισμοί με την κλασική μέθοδο ή με την `barnes_hut` που έχει πολυπλοκότητα $O(N \log N)$, αυτό καθίσταται δυνατό αν το όρισμα `method` έχει την τιμή `exact`, ειδάλλως θα εκτελεστεί με τη μέθοδο `barnes_hut` [81].

Στην εφαρμογή της t-SNE χρησιμοποιήθηκαν δύο διαστάσεις εξόδου και τιμή perplexity ίση με 50. Η υπερπάρμετρος perplexity σχετίζεται με τον αριθμό γειτόνων που λαμβάνει υπόψιν η μέθοδος κατά τον υπολογισμό της τοπικής δομής. Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται το αποτέλεσμα της αναπαράστασης. Στις παρατηρήσεις εμφανίζονται τοπικές δομές και ομάδες, όχι απαραίτητα μια μοναδική συμπαγή συστάδα. Η προβολή t-SNE αναδεικνύει την χωρική διαφοροποίηση που έχουν οι δύο κλάσεις των παρατηρήσεων. Η εικόνα είναι αναμενόμενη, καθώς οι μετρήσεις προέρχονται από διαφορετικά πειράματα, διαφορετικούς τύπους καύσιμης φυτικής ύλης και περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ύπαρξη αυτών των συστάδων είναι σημαντική, διότι φαίνεται πως η κλάση FIRE δεν αποτελεί μια μοναδική χημική κατάσταση, αυτό είναι ένα συμπέρασμα που συνάγεται και από την PCA. Αντίθετα όμως με την PCA, οι άξονες t-SNE 1 και t-SNE 2 δεν αντιπροσωπεύουν γραμμικούς συνδυασμούς των χαρακτηριστικών και δεν διαθέτουν άμεση φυσική ερμηνεία. Τέλος, η ερμηνεία της t-SNE είναι η διατήρηση της τοπικής γειτονίας, οι αποστάσεις μεταξύ των συστάδων δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως αντίστοιχες φυσικές αποστάσεις στον αρχικό χώρο.



Σχήμα 6.5: t-SNE απεικόνιση των FIRE/NO FIRE σημείων στο δισδιάστατο χώρο

6.4 Μέτρηση κατανάλωσης

Η χαμηλή κατανάλωσης του κόμβου αποτελεί βασικό στόχο και αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη σκοπιμότητα του συστήματος σε μια απομονωμένη περιοχή. Τη μεγαλύτερη μέση κατανάλωση ρεύματος εμφανίζει ο αισθητήρας καθώς εκτελείται το προκαθορισμένο προφίλ θέρμανσης (που είναι και η πιο ενεργοβόρα λειτουργία που υποστηρίζει), έπειτα ο μικροελεγκτής και τέλος ο πομποδέκτης. Η μέση κατανάλωση για ένα κύκλο μετρήθηκε στα 1.048mAh, είναι αρκετά υψηλή ωστόσο μπορεί να διορθωθεί με καλύτερο χειρισμό των συσκευών. Συνεπώς, ο χρόνος ζωής του συστήματος προσεγγιστικά είναι γύρω στις 119 μέρες. Ακολουθεί η ανάλυση της εκτίμησης:

Δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής θα κοιμηθεί για 500 δευτερόλεπτα και θα είναι στην ενεργή κατάσταση για περίπου 20 δευτερόλεπτα, ορίζεται ως συνολικός κύκλος εργασιών τα 520 δευτερόλεπτα. Αυτό σημαίνει ότι ποσοστιαία η deep sleep λειτουργία αποτελεί το 96.15% και η ενεργή λειτουργία το 3.85%. Η κατανάλωση στη deep sleep λειτουργία είναι 107μΑ και η μέση κατανάλωση στην ενεργή είναι 24.55mA. Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψιν η εκφόρτιση σε χαμηλότερη τάση που τυπικά συμβαίνει σε μπαταρίες λιθίου μετά το 90% της χωρητικότητάς τους. Συνεπώς,

$$\overline{I_{av}} = 0.9615 * 107\mu A + 0.0385 * 24.55mA \cong 1.048mA \quad (6.16)$$

$$Hours = \frac{3350 * 0.9}{1.048} \left(\frac{mAh}{mA} \right) \cong 2,877h \quad (6.17)$$

Καταλήγοντας ότι, η θεωρητική αυτονομία του κόμβου είναι περίπου 4 μήνες, πιο συγκεκριμένα περίπου 120 μέρες. Στην πραγματικότητα, θα είναι μικρότερη λόγω της πραγματικής διαθέσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας, επίσης η θερμοκρασία, η γήρανση, η αυτοεκφόρτιση και οι μεταβολές της κατανάλωσης παίζουν ρόλο στην πραγματική αυτονομία του κόμβου στο πεδίο.

6.5 Επίλογος

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η αξιολόγηση του συστήματος μέσω πειραμάτων που έγιναν στα βασικά υποσυστήματα της υλοποίησης.

Αρχικά, για την αξιολόγηση της ζεύξης υπό συνθήκες οπτικές επαφής με τις προτεινόμενες ρυθμίσεις, εξετάστηκε ένα υποσύνολο δεδομένων από ένα ήδη υπάρχον σύνολο δεδομένων [73]. Μέσω αυτής της αξιολόγησης παρατηρήθηκε ομαλή εξάρτηση του RSSI από την απόσταση. Για τις ρυθμίσεις

διαμόρφωσης 12dBm, SF8 και BW 125kHz, το μοντέλο Log-Distance προσαρμόστηκε και εξήχθη ο εκθέτης απωλειών $n=1.72$, $RMSE=3.27$ dB και $R^2=0.752$.

Από την άλλη μεριά, οι μετρήσεις διάδοσης στο πεδίο εφαρμογής είχαν σημαντικά μεγαλύτερη μεταβλητότητα. Η προσαρμογή του Log-Distance έδωσε εκθέτη απωλειών $n=3.02$, συνεπώς μεγαλύτερο ρυθμό εξασθένησης. Τέλος, η μεγάλη διασπορά των δειγμάτων έδειξε ότι η απόσταση δεν είναι η μοναδική μεταβλητή για την εκτίμηση του RSSI σε δασικό περιβάλλον, καθώς η ύπαρξη βλάστησης, ανισόπεδου εδάφους, κορμών και λοιπών περιβαλλοντικών συνθηκών εισάγει περισσότερη εξασθένηση.

Η θεωρητική σύγκριση των μοντέλων ITU-R P.833-10 και Weissberger επιβεβαιώνει ότι οι διαφορετικές εμπειρικές προσεγγίσεις διαφέρουν όσον αφορά την προβλεπόμενη τιμή του RSSI. Το Weissberger είχε περισσότερο συντηρητικά αποτελέσματα ενώ το ITU-R P.833-10 έδειξε σταδιακή εξασθένηση του RSSI. Αυτό ενισχύει τον ισχυρισμό για την διεξαγωγή επιτόπιων πειραματικών μετρήσεων, με σκοπό την καλύτερη πρόβλεψη του RSSI και ότι τα θεωρητικά μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη όλες τις διαφοροποιήσεις που έχει κάθε δάσος. Με λίγα λόγια, δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί ως απόλυτος χάρτης κάλυψης.

Η αξιολόγηση του αισθητήρα με την εξεταζόμενη λειτουργία (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και πολυδιάστατη υπογραφή αερίων), υποδεικνύει ότι παρέχεται επαρκής πληροφορία για την αναγνώριση καύσης. Οι υψηλές αποδόσεις του τελικού μοντέλου ταξινόμησης είναι ενθαρρυντικές, ωστόσο κρίνεται απαραίτητη η συλλογή περισσότερων δειγμάτων για να υπάρξει γενίκευση σε πραγματικές δασικές πυρκαγιές. Με λίγα λόγια, χρειάζεται ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο δεδομένων που λαμβάνει υπόψη διαφορετικές συνθήκες.

Τέλος, ο περιοδικός τρόπος λειτουργίας, αν και περιοριστικός, επιτρέπει στο σύστημα να έχει αρκετή ενεργειακή αυτονομία, ώστε να συλλέγεται ηλιακή ενέργεια από φωτοβολταϊκή μονάδα που θα μπορούσε να προστεθεί στο σύστημα. Η τελική εκτίμηση της αυτονομίας, βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις ρεύματος και η υφιστάμενη αρχιτεκτονική λειτουργεί ως βάση για μακροχρόνια αυτόνομη λειτουργία. Περισσότερα, για τη μελλοντική εισαγωγή φωτοβολταϊκής μονάδας η οποία ενισχύει τη σκοπιμότητα της υλοποίησης εξετάζεται στην ενότητα 7.2.2.

Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι λειτουργική σε επίπεδο αντίληψης, στην ασύρματη μετάδοση των δεδομένων και οι λειτουργίες εφαρμογής προσφέρουν στο χρήστη προστιθέμενη αξία. Ωστόσο, για την εγκατάσταση σε πραγματικό δασικό περιβάλλον κρίνεται απαραίτητη η αντιμετώπιση των περιορισμών της υλοποίησης.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις

7.1 Εισαγωγή

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της σχεδίασης, υλοποίησης και της αξιολόγησης του προτεινόμενου συστήματος. Επίσης, αναλύονται οι περιορισμοί της παρούσας υλοποίησης, αλλά και προτεινόμενες λύσεις για αυτούς.

Η ανάπτυξη του συστήματος ακολουθεί μια διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική που εΐθισται σε IoT συστήματα και περιλαμβάνει το στρώμα αντίληψης, το στρώμα δικτύου και το στρώμα εφαρμογής. Συνεπώς, τα συμπεράσματα και οι προτεινόμενες μελλοντικές βελτιώσεις, για κάθε στρώμα παρουσιάζονται ανά ενότητα, στο παρόν κεφάλαιο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός τους, όσον αφορά την ανεξάρτητη αξιολόγησή τους και την ανάδειξη των αλληλεξαρτήσεών τους. Ωστόσο, οι προτεινόμενες βελτιώσεις δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες, αντιθέτως λειτουργούν με συμπληρωματικό τρόπο στην αρχιτεκτονική.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου 5, στόχος είναι η προτεινόμενη υλοποίηση να είναι όσο το δυνατόν, βιώσιμη, με την έννοια ότι το κόστος αιτιολογεί τη χρήση. Ο στόχος αυτός υποδηλώνει ότι η περιβαλλοντική βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος (κατά κύριο λόγο, αφορά το υλικό), δεν εξαρτάται μόνο από τη χαμηλή κατανάλωση ή τη λειτουργία του συστήματος. Αλλά, χρειάζεται να εξεταστεί ολόκληρος ο κύκλος ζωής της εγκατάστασης. Βασική επιδίωξη κατά το σχεδιασμό, ήταν το περιβαλλοντικό κόστος της παραγωγής, της λειτουργίας και το τέλος της ζωής των κόμβων να αντισταθμίζεται από το κοινωνικό, περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος μιας πρώιμης ανίχνευσης. Συνεπώς, θα ήταν σκόπιμο να υποβληθεί για αξιολόγηση βιωσιμότητας κόστους-οφέλους [82].

7.2 Συμπεράσματα και προοπτικές για το στρώμα αντίληψης

7.2.1 Συμπεράσματα για το στρώμα αντίληψης

Το στρώμα αντίληψης αποτελεί καΐριο σημείο του συστήματος, μιας και είναι η άμεση επαφή με το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ο BME688, ο οποίος μετρά θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και χρησιμοποιεί τον αισθητήρα αερίων για να καταγράψει την πολυδιάστατη υπογραφή αερίων γύρω του. Η αξιοποίηση διαδοχικών σημείων μέτρησης, με χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία λειτουργίας συνθέτει μαζί με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, τη μέτρηση που θα καταγραφεί. Ο κόμβος έχει αρκετή ενεργειακή κατανάλωση, ώστε να βασιστεί στην μπαταρία μέχρι να γίνει συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον.

Στην πειραματική αξιολόγηση τα μοντέλα μηχανικής μάθησης είχαν εξαιρετικά υψηλή απόδοση στο σύνολο δεδομένων, όπου η μέση ακρίβεια ήταν γύρω στο 99.66%, ενώ η ανάκληση είχε μέσο όρο 98.97%. Ο αριθμός το FPs είναι μηδενικός. Αυτά τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς ο αισθητήρας είναι ικανός να ανιχνεύσει συνθήκη καύσης με τη συγκεκριμένη επιλογή λειτουργίας, Standard Gas Scan Mode. Ωστόσο, η υψηλή απόδοση δεν πρέπει να ερμηνευτεί ως απόδειξη ότι το μοντέλο είναι έτοιμο για άμεση ανάπτυξη σε οποιοδήποτε δασικό περιβάλλον. Ο λόγος για τον οποίο αυτό συμβαίνει, οφείλεται στο γεγονός ότι το σύνολο δεδομένων είναι μικρό και δεν έχουν ληφθεί υπόψιν όλες οι συνθήκες που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Επομένως η διαφοροποίηση των συνθηκών στις μετρήσεις καύσης που χρειάζεται να γίνουν, αποτελεί σημαντικό αντικείμενο ως μελλοντική βελτίωση.

7.2.2 Βελτίωση της ενεργειακής αυτονομίας των κόμβων

Για τη βελτίωση της ενεργειακής αυτονομίας των κόμβων, ειδικά όταν πρόκειται να τοποθετηθούν σε απομονωμένη περιοχή, προτείνεται η χρήση ενεργειακής συγκομιδής μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή και αιολική). Πιο συγκεκριμένα, από τη στιγμή που το σύστημα εστιάζει στην ανίχνευση πυρκαγιών σε μεσογειακές περιοχές, μια καλή επιλογή είναι η χρήση μιας μικρής φωτοβολταϊκής μονάδας. Πέραν της ενεργειακής συγκομιδής, μπορεί να γίνει περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης, με βελτιστοποίηση του χρόνου ενεργοποίησης των επιμέρους υποσυστημάτων. Μπορούν επίσης να εφαρμοστούν τεχνικές power gating για τον αισθητήρα και τον πομποδέκτη, όπως κάνουν οι Ramadan et al., όπου κατά τη διάρκεια του deep sleep, κλείνουν εντελώς τα υποσυστήματα με τη χρήση MOSFET [12].

7.2.3 Τοπική επεξεργασία και λήψη απόφασης

Στην παρούσα αρχιτεκτονική τα δεδομένα χρειάζεται να μεταφερθούν στο cloud μέσω του LoRaWAN προκειμένου να ταξινομηθούν σε FIRE ή NO FIRE. Μια σημαντική μελλοντική επέκταση προβλέπει την αποδέσμευση αυτής της διαδικασίας στο edge (δηλαδή πάνω στον κόμβο). Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως υπολογιστική άκρου (Edge Computing), μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση της TinyML βιβλιοθήκης. Με αυτήν την προσέγγιση ο κόμβος έχει ένα ελαφρύ ταξινομητή ο οποίος εκτελείται μετά από κάθε μέτρηση. Έτσι μειώνεται η κίνηση στο δίκτυο, διότι δεν χρειάζεται να μεταδοθεί ολόκληρο το διάνυσμα χαρακτηριστικών (οπότε μειώνεται σημαντικά το airtime) ή αποστέλλεται απλά η έξοδος του ταξινομητή στον κόμβο (FIRE ή NO FIRE). Ωστόσο, αυτό δημιουργεί ορισμένους περιορισμούς ως προς τη διαθέσιμη μνήμη και την ενημέρωση του μοντέλου. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τεχνικές όπως η συμπίεση του μοντέλου (model compression) και η δυνατότητα ενημέρωσης του μοντέλου με μηνύματα κάτω ζεύξης από την κεντρική υποδομή. Συνεπώς, η τελική επιλογή μοντέλου χρειάζεται να λάβει υπόψη όχι μόνο την ακρίβεια, αλλά και τη συνολική ενεργειακή και υπολογιστική επιβάρυνση του κόμβου.

7.3 Συμπεράσματα και προοπτικές για το στρώμα δικτύου

7.3.1 Συμπεράσματα για το στρώμα δικτύου

Το στρώμα δικτύου αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ του στρώματος αντίληψης και της cloud υποδομής, δηλαδή του στρώματος εφαρμογής όπου τα δεδομένα αποθηκεύονται, επεξεργάζονται και παρουσιάζονται. Η χρήση LoRaWAN κρίθηκε κατάλληλη διότι δεν μεταδίδονται μεγάλοι μεγέθους μηνύματα, έχει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και η τεχνική διαμόρφωσης LoRa έχει εξαιρετική διάτρηση σε εμπόδια, όπως τα φυλλώματα. Η υλοποίηση βασίστηκε στη συχνότητα λειτουργίας EU868, συντελεστή εξάπλωσης SF8, εύρος ζώνης 125 kHz και ισχύ εκπομπής 12 dBm.

Αξιολογήθηκε μέσω δοκιμών, η συμπεριφορά της ζεύξης και η επίδραση της απόστασης και της ισχύος εκπομπής στην ποιότητα του σήματος και στην αξιοπιστία των μεταδόσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τεχνική διαμόρφωση LoRa μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα δασικό περιβάλλον. Βέβαια η απόδοση της ασύρματης ζεύξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η μορφολογία του εδάφους, την πυκνότητα της βλάστησης, την παρουσία άλλων εμποδίων, την υγρασία, το ύψος των κεραιών και τη θέση της πύλης. Συνεπώς, η πειραματική αξιολόγηση αφορά τη συγκεκριμένη εργασία και δεν θεωρείται καθολική περιγραφή της απόδοσης του LoRaWAN σε δασικό περιβάλλον. Η χρήση του συγκεντρωτή RAK5146 σε συνδυασμό με το Raspberry Pi 4B, ως πύλη LoRaWAN, μπορεί να

λειτουργήσει αρκετά καλά και η χρήση του οικιακού Wi-Fi ως backhaul μπορεί να λειτουργήσει σε πειραματικό περιβάλλον.

7.3.2 Αναβάθμιση της πύλης και της ασύρματης οπισθοζευκτικής επικοινωνίας

Για ένα μικρής κλίμακας πειραματικό σύστημα η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι επαρκής και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς κανένα πρόβλημα. Ωστόσο, σε πραγματική ανάπτυξη του συστήματος κρίνεται απαραίτητη η αναβάθμιση της πύλης, ούτως ώστε να μπορεί να αντέξει αρχικά τις εξωτερικές συνθήκες και να παρέχεται backhaul μέσω δικτύου επίγειων κυψελωτών επικοινωνιών ή μέσω μη επίγειων δορυφορικών δικτύων NTN. Τέλος, η ενεργειακή αυτονομία της πύλης αποτελεί επίσης ένα καίριο ζήτημα, συνεπώς θα χρειαστεί κάποια φωτοβολταϊκή μονάδα, κατάλληλες μπαταρίες και σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Όπου εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η πύλη λειτουργεί αδιάκοπα, συνεπώς οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι πολύ περισσότερες.

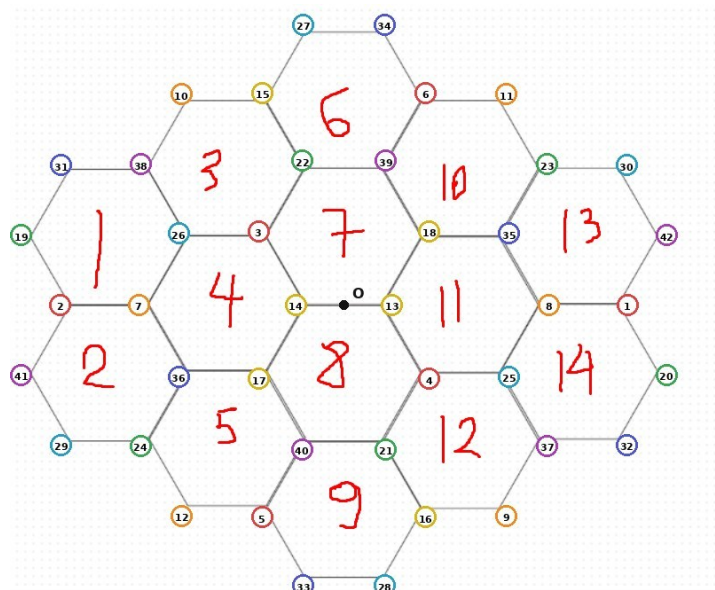
7.3.3 Βελτιστοποίηση της χωρικής διάταξης και κάλυψης

Η χωρική διάταξη που προτείνεται είναι απλοποιημένη με σκοπό να υπάρχει ένα πλαίσιο για την πρόταση της παρούσας εργασίας. Συνεπώς, δεν είναι η βέλτιστη καθώς υπάρχει ανώτατο όριο στις κυψέλες επιτήρησης που μπορούν να τοποθετηθούν συνολικά. Με χρονικό διάστημα μετάδοσης 12.14s (το οποίο σημαίνει ότι οι κόμβοι είναι άριστα συγχρονισμένοι για να μην υπάρξουν συγκρούσεις), μια δασική περιοχή δύναται να έχει 42 κόμβους και 14 κυψέλες επιτήρησης (άρα 14 πύλες). Το όριο της έκτασης που μπορεί να καλύψει η προτεινόμενη δομή υπολογίζεται εύκολα με βάση τη σχέση 4.1 ως:

$$E_{max} = 14 * E_{hex} = 232,792 \text{ τμ} \quad (7.1)$$

Το ανώτατο όριο της δομής, εικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Οι κυκλωμένοι αριθμοί στις κορυφές των εξαγώνων αντιστοιχούν στη σειρά με την οποία οι κόμβοι θα στείλουν τις μετρήσεις τους, ενώ το χρώμα των κύκλων είναι η ομάδα που έχει ο κάθε κόμβος στο συγκεκριμένο σχεδιασμό. Η σειρά με την οποία μεταδίδουν δεν είναι τυχαία, καθώς γίνεται προσπάθεια να περιοριστεί, όσο το δυνατόν περισσότερο, η εξάρτηση που έχει η ανίχνευση καύσης από την κατεύθυνση του ανέμου.

Σε πραγματική ανάπτυξη, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι ιδιαιτερότητες του πεδίου, η ανίχνευση των αερίων συναρτήσει του πεδίου (η οποία δεν είναι ισοτροπική), η διεύθυνση του ανέμου και η μέση ταχύτητα του ανέμου, ώστε να γίνει η τοποθέτηση των κόμβων. Αυτή η προσέγγιση θα οδηγήσει σε δυναμικό σχεδιασμό της εγκατάστασης.



Σχήμα 7.1: Το όριο έκτασης του συστήματος

7.4 Συμπεράσματα και προοπτικές για το στρώμα εφαρμογής

7.4.1 Συμπεράσματα για το στρώμα εφαρμογής

Το στρώμα εφαρμογή αποτελεί το τέλος στην αλυσίδα επεξεργασίας των δεδομένων, μετατρέποντας τις αρχικές μετρήσεις των κόμβων σε πληροφορία χρήσιμη για τον τελικό χρήστη. Στην παρούσα εργασία, τα δεδομένα μεταφέρονται από το στρώμα δικτύου, μέσω της πλατφόρμας The Things Stack στο python πρόγραμμα που χρησιμοποιεί MQTT, στη συνέχεια γίνεται η επεξεργασία τους από το μοντέλο μηχανικής μάθησης και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων.

Η χρήση του Grafana παρέχει τη δυνατότητα συνεχούς εποπτείας των δεδομένων και παρουσίασης των μετρήσεων. Στη γραφική διεπαφή μπορεί κανείς να διακρίνει την πιθανότητα ένας κόμβος να έχει ανιχνεύσει καύση, πάνω σε ένα χάρτη. Έπειτα, μπορεί κανείς να δει την κατάσταση κάθε κόμβου στο δίκτυο, χρονοσειρές που αφορούν την πιθανότητα φωτιάς, τη θερμοκρασία, την υγρασία και την ατμοσφαιρική πίεση για κάθε κόμβο. Τέλος, υπάρχει πληροφορία που σχετίζεται με τη λειτουργική υγεία του κόμβου, αφορά τη μπαταρία και κάποιες μετρικές δικτύου.

Μέσω του Grafana καθίσταται δυνατή η αποστολή ειδοποίησης για την ανίχνευση καύσης και μάλιστα υπάρχει χρονική και χωρική πληροφορία στο κείμενο της ειδοποίησης. Επίσης, αποστέλλεται ειδοποίηση εάν κάποιος κόμβος έχει χαμηλή μπαταρία, για να γίνει η έγκαιρη αλλαγή της.

7.4.2 Ενσωμάτωση πρόσθετων εξωτερικών πηγών δεδομένων

Είναι φανερό ότι ο αισθητήρας που υπάρχει σε κάθε κόμβο, δεν μπορεί να περιγράψει απόλυτα τις συνθήκες του πεδίου. Η λειτουργικότητα του συστήματος θα μπορούσε να επεκταθεί σημαντικά με την ενσωμάτωση εξωτερικών πηγών δεδομένων. Οι κυριότερες πληροφορίες που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την κατανόηση του πεδίου, είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Δορυφορικές παρατηρήσεις και προϊόντα τηλεπισκόπησης μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά με το προτεινόμενο σύστημα. Πληροφορίες όπως το υψόμετρο, η κλίση του εδάφους, η βλάστηση, ο προσανατολισμός και ο τύπος της βλάστησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του κινδύνου και τη χωρική ερμηνεία των παρατηρήσεων.

7.4.3 Περαιτέρω βελτίωση και γενίκευση των μοντέλων μηχανικής μάθησης

Παρά την εξαιρετικά υψηλή απόδοση των μοντέλων στην παρούσα αξιολόγηση, η γενίκευση σε διαφορετικές συνθήκες αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Αρχικά, κρίνεται απαραίτητη η συλλογή δεδομένων σε διαφορετικές συνθήκες. Ενδεικτικά παραδείγματα διαφορετικών συνθηκών αποτελούν, η απόσταση κόμβου-εστίας, ο τύπος βλάστησης, η εποχή, η θερμοκρασία, τα επίπεδα υγρασίας και διαφορετικές συνθήκες ανέμου. Αυτά αρκούν για να μειωθεί ο κίνδυνος υπερπροσαρμογής του μοντέλου, σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Μια ακόμη σημαντική βελτίωση, είναι η αλλαγή της εισόδου στο μοντέλο μηχανικής μάθησης. Προτείνεται η είσοδος τριών διαδοχικών διανυσμάτων, δημιουργώντας έτσι ένα χρονικό παράθυρο περίπου 24 λεπτών. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο θα μπορέσει να αναγνωρίσει την αλλαγή που συνέβη στο χρόνο, εάν πρόκειται για φωτιά. Αντίστοιχα, αυτό μπορεί να γίνει και σε χωρικό επίπεδο, όπου για μια κυψέλη επιτήρησης, αναλύονται τα δεδομένα των κόμβων της, με σκοπό να βρεθεί που βρίσκεται η πυρκαγιά.

Τέλος, μια σοβαρή παρατήρηση αφορά τη γήρανση και το drift της απόκρισης του αισθητήρα. Η συμπεριφορά ενός αισθητήρα αερίων ενδέχεται να μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου και τις συνθήκες λειτουργίας. Συνεπώς, ένα πραγματικό σύστημα θα πρέπει να λάβει υπόψιν αυτή τη συμπεριφορά και να βαθμονομήσει εκ νέου, να κανονικοποιήσει ή να προσαρμόσει το μοντέλο στα νέα δεδομένα.

7.5 Επίλογος

Συνολικά, η παρούσα εργασία απέδειξε τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου συστήματος πρώιμης ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών που συνδυάζει την πολυδιάστατη υπογραφή των υπογραφή αερίων, ασύρματη επικοινωνία LoRaWAN και μηχανική μάθηση. Με την αξιοποίηση του BME688 ανακτήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα, για την ανίχνευση καύσης βιομάζας. Η επικοινωνιακή αρχιτεκτονική επιτρέπει τη μεταφορά των δεδομένων από απομακρυσμένους κόμβους στην κεντρική υποδομή της εφαρμογής για την επεξεργασία, αποθήκευση και παρουσίασή τους. Παράλληλα, ο τελικός χρήστης μπορεί να λαμβάνει ειδοποιήσεις (χωρικά και χρονικά συσχετισμένες) για σημαντικά συμβάντα όπως υψηλή πιθανότητα πυρκαγιάς ή χαμηλή στάθμη μπαταρίας σε κόμβο.

Ωστόσο, η μετάβαση από πειραματικό πρωτότυπο σε ένα μεγάλης κλίμακας πραγματικό σύστημα απαιτεί περαιτέρω έρευνα. Χρειάζεται να αναβαθμιστεί η πύλη LoRaWAN, ούτως ώστε να μπορεί να προωθήσει τα μηνύματα στο cloud μέσω δικτύου επίγειων κυψελωτών επικοινωνιών, να αυξηθεί η ενεργειακή αυτονομία των κόμβων και να επεκταθεί το σύνολο δεδομένων. Επίσης σκόπιμες βελτιώσεις αποτελούν, η δυνατότητα ακροδικτυακής υπολογιστικής στους κόμβους για να μειωθεί η κίνηση στο δίκτυο και η βελτιστοποίηση της χωρικής διάταξης. Τέλος, η ενσωμάτωση πρόσθετων πληροφοριών από άλλα συστήματα, αλλά και η χρήση πολλαπλών μεθόδων ανίχνευσης (δορυφόροι, WSNs, UAVs) προστατεύει από False Positives.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. Sedano et al., Advance Report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2025. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2026, JRC146199, doi: 10.2760/3859043.
- [2] European Environment Agency, European Climate Risk Assessment—Executive Summary, EEA Report No. 01/2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024, doi: 10.2800/204249.
- [3] European Environment Agency, “Forest fires in Europe,” EEA Indicators, Copenhagen, Denmark. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/forest-fires-in-europe>
- [4] F. Ghasemiasma, M. Tonini, P. Fiorucci, et al., “Megafires in Mediterranean Europe: The compound role of fire weather and drought,” *npj Natural Hazards*, vol. 3, Art. no. 33, 2026, doi: 10.1038/s44304-026-00197-5.
- [5] Copernicus Climate Change Service (C3S), European State of the Climate 2023, 2024. [Online]. Available: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2023>
- [6] Copernicus Climate Change Service (C3S) and World Meteorological Organization (WMO), European State of the Climate 2024, 2025, doi: 10.24381/14j9-s541. [Online]. Available: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2024>
- [7] World Health Organization, “Wildfires and health,” WHO, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/wildfires-and-health>
- [8] A. De Rango, L. Furnari, F. Cortale, A. Senatore, and G. Mendicino, “Wildfire Early Warning System Based on a Smart CO2 Sensors Network,” *Sensors*, vol. 25, no. 7, Art. no. 2012, 2025, doi: 10.3390/s25072012.
- [9] A. Mohapatra and T. Trinh, “Early Wildfire Detection Technologies in Practice—A Review,” *Sustainability*, vol. 14, no. 19, Art. no. 12270, 2022, doi: 10.3390/su141912270.
- [10] A. Solorzano, J. Eichmann, L. Fernandez, B. Ziems, J. M. Jiménez-Soto, S. Marco, and J. Fonollosa, “Early fire detection based on gas sensor arrays: Multivariate calibration and validation,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 352, Art. no. 130961, 2022, doi: 10.1016/j.snb.2021.130961.
- [11] M. Milli and M. Milli, “Reducing False Positives in Building Fire Detection Systems via Multiple Metal Oxide Sensors,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 157537–157550, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3606584.
- [12] M. N. A. Ramadan et al., “Towards early forest fire detection and prevention using AI-powered drones and the IoT,” *Internet of Things*, vol. 27, Art. no. 101248, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101248.
- [13] LoRa Alliance, “Leveraging Satellites for Global Connectivity: The Future of NTN LoRaWAN IoT,” *IoT For All*, Mar. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.iotforall.com/ntn-lorawan-iot-satellites>
- [14] L. M. Pires, V. Fialho, T. Pécurto, and A. Madeira, “Towards Smart Wildfire Prevention: Development of a LoRa-Based IoT Node for Environmental Hazard Detection,” *Designs*, vol. 9, no. 4, Art. no. 91, 2025, doi: 10.3390/designs9040091.

- [15] D. X. Viegas, “Overview of Forest Fire Propagation Research,” *Fire Safety Science*, vol. 10, pp. 95–108, 2011, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.10-95.
- [16] D. G. Neary, “Forest Soil Disturbance: Implications of Factors Contributing to the Wildland Fire Nexus,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 83, no. S1, pp. S228–S243, 2019, doi: 10.2136/sssaj2018.12.0471.
- [17] S. S. McAllister, “The wildfire problem—a path forward,” *Fire Safety Journal*, vol. 162, Art. no. 104744, 2026, doi: 10.1016/j.firesaf.2026.104744.
- [18] G. Huidobro, L. Giessen, and S. L. Burns, “And it burns, burns, burns, the ring-of-fire: Reviewing and harmonizing terminology on wildfire management and policy,” *Environmental Science & Policy*, vol. 157, Art. no. 103776, 2024, doi: 10.1016/j.envsci.2024.103776.
- [19] A. Poupkou, K. Markakis, N. Liora, T. M. Giannaros, P. Zanis, U. Im, N. Daskalakis, S. Myriokefalitakis, J. W. Kaiser, D. Melas, M. Kanakidou, T. Karacostas, and C. Zerefos, “A modeling study of the impact of the 2007 Greek forest fires on the gaseous pollutant levels in the Eastern Mediterranean,” *Atmospheric Research*, vol. 149, pp. 1–17, 2014, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.05.015.
- [20] A. Poupkou, K. Markakis, N. Liora, T. M. Giannaros, U. Im, N. Daskalakis, S. Myriokefalitakis, D. Melas, P. Zanis, M. Kanakidou, and C. S. Zerefos, “Study of the Impact of an Intense Biomass Burning Event on the Air Quality in the Eastern Mediterranean,” in *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Springer Atmospheric Sciences, 2013, pp. 1189–1195, doi: 10.1007/978-3-642-29172-2_166.
- [21] M.-E. Koukouli, A. Pseftogkas, D. Karagkiozidis, M. Mermigkas, T. Panou, D. Balis, and A. Bais, “Extreme wildfires over Northern Greece during Summer 2023—Part B. Adverse effects on regional air quality,” *Atmospheric Research*, vol. 320, Art. no. 108034, 2025, doi: 10.1016/j.atmosres.2025.108034.
- [22] Y. Hu and G. Rein, “Development of gas signatures of smouldering peat wildfire from emission factors,” *International Journal of Wildland Fire*, vol. 31, no. 11, pp. 1014–1032, 2022, doi: 10.1071/WF21093.
- [23] M. Statheropoulos and S. Karma, “Complexity and origin of the smoke components as measured near the flame-front of a real forest fire incident: A case study,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 78, no. 2, pp. 430–437, 2007, doi: 10.1016/j.jaap.2006.10.011.
- [24] F. Khan et al., “Recent Advances in Sensors for Fire Detection,” *Sensors*, vol. 22, Art. no. 3310, 2022, doi: 10.3390/s22093310.
- [25] S.-J. Chen, D. C. Hovde, K. A. Peterson, and A. W. Marshall, “Fire detection using smoke and gas sensors,” *Fire Safety Journal*, vol. 42, pp. 507–515, 2007, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.01.006.
- [26] M. Zhao et al., “Realization of Forest Internet of Things Using Wireless Network Communication Technology of Low-Power Wide-Area Network,” *Sensors*, vol. 23, Art. no. 4809, 2023, doi: 10.3390/s23104809.
- [27] A. Iossifides, K. Kravari, and D. Glaroudis, *IoT Platforms and Systems*. International Hellenic University, TERRATECH—Masters Course on Smart Agriculture Technologies, Erasmus+ Programme: Knowledge Alliances, Project No. 621568-EPP-1-2020-1-PT-EPPKA2, sec. 5.4, “IoT Communication Protocols.”

- [28] K. Mathew, B. Issac, and C. E. Tan, "Evaluation of Signal Attenuation for Bluetooth, ZigBee and Sound in Foliage," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, vol. 9, no. 2-9, pp. 43–48, 2017.
- [29] J. Muñoz, T. Chang, X. Vilajosana, and T. Watteyne, "Evaluation of IEEE 802.15.4g for Environmental Observations," *Sensors*, vol. 18, no. 10, Art. no. 3468, 2018, doi: 10.3390/s18103468.
- [30] R. Hirakawa, K. Mizutani, and H. Harada, "Specification and Performance Analysis of Wi-SUN FAN," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 4, pp. 849–865, 2023, doi: 10.1109/OJVT.2023.3328834.
- [31] S. L. Brunton and J. N. Kutz, *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2019.
- [32] F. Carta, C. Zidda, M. Putzu, D. Loru, M. Anedda, and D. Giusto, "Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey," *Sensors*, vol. 23, Art. no. 6635, 2023, doi: 10.3390/s23146635.
- [33] European Space Agency, "Hellenic Fire System satellites launched for Greece," May 4, 2026. [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Hellenic_Fire_System_satellites_launched_for_Greece
- [34] European Space Agency, "Hellenic Fire System achieves first light," Jul. 7, 2026. [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Hellenic_Fire_System_achieves_first_light
- [35] Y. Apriani, W. A. Oktaviani, and I. M. Sofian, "Design and Implementation of LoRa-Based Forest Fire Monitoring System," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 3, no. 3, pp. 236–243, May 2022, doi: 10.18196/jrc.v3i3.14128.
- [36] Pano AI, "Pano AI solution." [Online]. Available: <https://www.pano.ai/solution>
- [37] Insight Robotics, "Wildfire Detection System InsightFD + Insight Globe." [Online]. Available: <https://www.insightrobotics.com/en/services/wildfire-detection-system/>
- [38] Torch Systems, "Torch Systems solutions." [Online]. Available: <https://www.torchsystems.com/solutions>
- [39] European Commission, "Trusted Extremely Precise Mapping and Prediction for Emergency Management (TEMA)," Horizon Europe, Grant Agreement 101093003, 2022–2026, doi: 10.3030/101093003.
- [40] M. Siavrakas, C. Papaioannidis, and I. Pitas, "Blaze: A Dataset for Wildfire and Burnt Area UAV Image Classification and Segmentation," in *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Anchorage, AK, USA, 2025, pp. 1960–1965, doi: 10.1109/ICIP55913.2025.11084700.
- [41] D. Fotiou, V. Mygdalis, and I. Pitas, "RoboFireFuseNet: Robust fusion of visible and infrared wildfire imaging for real-time flame and smoke segmentation," *Pattern Recognition Letters*, vol. 205, pp. 87–93, 2026, doi: 10.1016/j.patrec.2026.04.024.
- [42] D. Arjun and A. Hanumanthaiah, "Wireless Sensor Network Framework for Early Detection and Warning of Forest Fire," in *Proc. International Conference on Inventive Computation Technologies*, pp. 186–191, 2020, doi: 10.1109/ICICT48043.2020.9112389.

- [43] U. Dampage, L. Bandaranayake, R. Wanasinghe, K. Kottahachchi, and B. Jayasanka, “Forest fire detection system using wireless sensor networks and machine learning,” *Scientific Reports*, vol. 12, Art. no. 46, 2022, doi: 10.1038/s41598-021-03882-9.
- [44] AI Doctoral Academy, “Maestro: Forecasting and Risk Management in Forest Fires via IoT Technologies,” AI Doctoral Academy, 2024. [Online]. Available: <https://www.i-aida.org/resources/maestro-forecasting-and-risk-management-in-forest-fires-via-iot-technologies/>
- [45] Dryad Networks, “Silvanet Wildfire Sensor,” Dryad Networks. [Online]. Available: <https://www.dryad.net/wildfiresensor>
- [46] N5 Sensors, “ChemNode™,” N5 Sensors, 2026. [Online]. Available: <https://www.n5sensors.com/chemnode.html>
- [47] M. O. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, “Experimental Evaluation of a LoRa Wildlife Monitoring Network in a Forest Vegetation Area,” *Future Internet*, vol. 13, no. 5, Art. no. 115, 2021, doi: 10.3390/fi13050115.
- [48] A. Sharma et al., “An IoT-based forest fire detection system: Design and testing,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, pp. 38685–38710, 2024, doi: 10.1007/s11042-023-17027-9.
- [49] Bosch Sensortec, “BME688: Digital low power gas, pressure, temperature & humidity sensor with AI,” Datasheet, Document No. BST-BME688-DS000-03, Rev. 1.3, Feb. 2024.
- [50] Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), “Radio equipment interface requirement 105: Non-specific short-range devices operating in the 868.0–868.6 MHz, 868.7–869.2 MHz, 869.4–869.65 MHz, 869.7–870.0 MHz frequency bands.” [Online]. Available: https://www.eett.gr/opencms/export/sites/default/EETT/Electronic_Communications/Radio_Communications/TelecommunicationsEquipment/105v2.pdf
- [51] The Things Network, “Duty Cycle,” The Things Network Documentation. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>
- [52] Semtech Corporation, “SX1276/77/78/79—137 MHz to 1020 MHz low power long range transceiver,” Datasheet, rev. 7, May 2020.
- [53] MCCI Corporation, “MCCI Arduino LoRaWAN Library,” GitHub repository. [Online]. Available: <https://github.com/mcci-catena/arduino-lorawan>
- [54] Advanced Monolithic Systems, “AMS1117: 1A Low Dropout Voltage Regulator,” Advanced Monolithic Systems, [Online]. Available: <https://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
- [55] Microchip Technology Inc., “MCP1700 Low Quiescent Current LDO,” Datasheet DS20001826F, Rev. F, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP1700-Data-Sheet-20001826F.pdf>
- [56] Espressif Systems, “ESP32-C3 Series Datasheet,” ver. 2.0, Nov. 14, 2024. [Online]. Available: https://files.waveshare.com/wiki/ESP32-C3-Zero/esp32-c3_datasheet_en.pdf
- [57] Waveshare, “ESP32-C3-Zero,” Waveshare Documentation Platform. [Online]. Available: <https://docs.waveshare.com/ESP32-C3-Zero>
- [58] Nanjing Micro One Electronics Inc., “ME6217: High-output-current LDO regulator, high PSRR, low dropout,” ME6217 Datasheet, ver. 02.

- [59] ICInside, “Episode 2: BME688 Gas Sensor with Artificial Intelligence (Part 1 of 2),” YouTube, Aug. 7, 2023. [Online Video]. Available: <https://youtu.be/-bOomIGrjls>
- [60] L. Klibanov and P. Boldt, “Preliminary analysis of Bosch BME688 4-in-1 environmental sensor with AI,” 2021.
- [61] S. Botticini et al., “Index air quality monitoring for light and active mobility,” *Sensors*, vol. 24, no. 10, Art. no. 3170, May 2024, doi: 10.3390/s24103170.
- [62] HOPERF, “RFM95W/96W/98W Low Power Long Range Transceiver Module,” Datasheet, ver. 2.0.
- [63] European Commission, “Commission Implementing Decision (EU) 2025/105 of 22 January 2025 amending Decision 2006/771/EC updating harmonised technical conditions in the area of radio spectrum use for short-range devices,” *Official Journal of the European Union*, L 2025/105, Jan. 23, 2025.
- [64] The Things Network, “Adaptive Data Rate,” LoRaWAN Documentation. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adaptive-data-rate/>
- [65] Elecrow, “RFM95W LoRa Breakout Board.” [Online]. Available: <https://www.elecrow.com/rfm95w-lora-breakout-board.html>
- [66] Samsung SDI Co., Ltd., “Specification of Product for Lithium-ion Rechargeable Cell, Model INR18650-35E,” Spec. No. INR18650-35E, ver. 1.1, Jul. 9, 2015. [Online]. Available: <https://www.teklib.com/library/samsung-sdi-inr18650-35e-battery-datasheet/>
- [67] D. Body and F. Kuik, *Generic Automatic Weather Station (AWS) Tender Specifications, Instruments and Observing Methods Report No. 136*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2022.
- [68] G. Kounatidis, “Wildfire Detection Node Firmware,” ver. 1.1.1, GitHub, 2026. [Online]. Available: https://github.com/KGL-Gr/my_Thesis/releases/tag/V1%2C1%2C1
- [69] The Things Industries, “Semtech UDP Packet Forwarder,” The Things Stack for LoRaWAN Documentation. [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/hardware/gateways/concepts/udp/>
- [70] RAKwireless, “RAK5146 WisLink LoRaWAN Concentrator Datasheet,” RAK Documentation Center. [Online]. Available: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wislink/rak5146/datasheet/>
- [71] M. R. Ansah, R. A. Sowah, J. Melià-Seguí, F. A. Katsriku, X. Vilajosana, and W. O. Banahene, “Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment,” *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 198–207, 2020, doi: 10.1049/iet-wss.2019.0201.
- [72] G. Kounatidis, “Fire Severity Map,” Grafana, 2026. [Online]. Available: <https://georgekounatidis.grafana.net/public-dashboards/54f879091a6d49fa99f93774d525af8f>
- [73] L. Oliveira, L. Chaves, and E. Silva, “Explorando o RSSI na Geração de Chaves para LoRaWAN,” in *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*, Juiz de Fora, MG, Brazil, 2023, pp. 1–14, doi: 10.5753/sbseg.2023.232890.
- [74] Wikipedia contributors, “Path loss,” Wikipedia, The Free Encyclopedia, Jun. 23, 2026. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Path_loss

- [75] G. M. Bianco and G. Marrocco, “Body-UAV Near-Ground LoRa Links Through a Mediterranean Forest,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 7, pp. 6214–6218, Jul. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3260580.
- [76] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, “Attenuation in vegetation,” Recommendation ITU-R P.833-10, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833-10-202109-I/>
- [77] S. Vougioukas, H. T. Anastassiou, C. Regen, and M. Zude, “Influence of foliage on radio path losses (PLs) for wireless sensor network (WSN) planning in orchards,” *Biosystems Engineering*, vol. 114, no. 4, pp. 454–465, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.011.
- [78] Weather Underground, “Personal Weather Station historical data: ITHES578 and ITHES532,” The Weather Company, LLC. [Online]. Available: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ITHES578> and <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ITHES532>
- [79] I. T. Jolliffe and J. Cadima, “Principal component analysis: A review and recent developments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374, no. 2065, Art. no. 20150202, 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0202.
- [80] L. van der Maaten and G. Hinton, “Visualizing Data using t-SNE,” *Journal of Machine Learning Research*, vol. 9, pp. 2579–2605, 2008.
- [81] Scikit-learn Developers, “sklearn.manifold.TSNE,” *scikit-learn Documentation*. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.manifold.TSNE.html>
- [82] United Nations Environment Programme, *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making Informed Choices on Products*. United Nations Environment Programme, 2011.

