



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων  
για παρακολούθηση και μέτρηση της ποιότητας  
ατμοσφαιρικών συνθηκών»



Του φοιτητή  
Παναγιώτη-Μάριου Στασινού  
Αρ. Μητρώου: 144225

Επιβλέπων  
Δρ. Περικλής Χατζημίσιος  
Καθηγητής

18/09/2020

Μελέτη τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων για παρακολούθηση και μέτρηση της ποιότητας  
ατμοσφαιρικών συνθηκών

20171

Παναγιώτης-Μάριος Στασινός

Δρ. Περικλής Χατζημίσιος

29/04/2020

18/09/2020

*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 πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Στασινού Παναγιώτη-Μάριου 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 οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της πτυχιακής 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.

## Πρόλογος

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και οι δυνατότητες που αυτό παρέχει, αποτελούν το μέλλον και σίγουρα θα είναι υπεύθυνες, σε πολύ μεγάλο βαθμό, για την διαμόρφωση της καθημερινότητάς μας τα επόμενα χρόνια. Στόχος μου μέσα από την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, ήταν να κατανοήσω βασικές τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές του ΔτΠ και να μελετήσω τη συμβολή του στην παγκόσμια προσπάθεια εξομάλυνσης του φαινομένου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που απασχολεί όλους τους ανθρώπους του πλανήτη μας.

## Περίληψη

Καθώς η ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί ένα βασικό ζήτημα του 21<sup>ου</sup> αιώνα, πλήθος εταιρειών, ερευνητικών κέντρων και Πανεπιστημίων έχουν προχωρήσει σε εργασίες έρευνας και υλοποίησης συστημάτων ΔτΠ, με σκοπό την παρακολούθηση, τη μελέτη, την πρόβλεψη και τη βελτίωση της ποιότητάς του. Μέσα από τη συγκεκριμένη εργασία, παρουσιάζεται το φαινόμενο ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα, οι επιπτώσεις που αυτό προκαλεί στην υγεία των πολιτών και οι πολιτικές ποιότητας του αέρα που ακολουθούν διάφορες χώρες ανά τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, με άμεσο στόχο την ουσιαστική άμβλυση του φαινομένου. Επιπλέον, παρουσιάζονται ορισμένες mobile εφαρμογές παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών, σε πραγματικό χρόνο, που παρέχουν μία συλλογή εργαλείων, δεδομένων και σχετικών ειδοποιήσεων, με στόχο την ενημέρωση και την ουσιαστική επαγρύπνηση των χρηστών τους, σε παγκόσμια κλίμακα. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές επιλέχθηκαν έπειτα από έρευνα πλήθους εφαρμογών που διατίθενται στο διαδίκτυο και δοκιμάστηκαν σε Android smartphone, προκειμένου να εξαχθούν συνεκτικά, λογικά συμπεράσματα. Τέλος, παρουσιάζεται εκτενώς βιβλιογραφία σχετική με αρχιτεκτονικές συστημάτων ΔτΠ για τη μέτρηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με τη χρήση διαφόρων επικοινωνιακών πρωτοκόλλων, τεχνολογιών και αισθητήρων. Τα συστήματα ΔτΠ χωρίστηκαν σε συστήματα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, λαμβάνοντας επίσης υπόψιν το γεγονός παρουσίας των μετρούμενων δεδομένων τους σε πραγματικό ή μη πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, τα συστήματα εξωτερικών χώρων χρησιμοποιούν τόσο τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα μικρής όσο και μεγάλης εμβέλειας, ανάλογα με τη σχεδιάσή τους και το σενάριο χρήσης τους. Αυτοκίνητα, ποδήλατα, μέσα μαζικής μεταφοράς και drones, καθώς και υλοποιήσεις στατικών και συνδυαστικά υλοποιημένων συστημάτων, προσφέρουν βελτιωμένες υπηρεσίες παρακολούθησης και μέτρησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, συνδυάζοντας πολλές φορές την υψηλή ακρίβεια δεδομένων με το χαμηλό κόστος εξοπλισμού.

# «A study of Internet of Things technologies for monitoring and measuring the quality of atmospheric conditions»

Panagiotis-Marios Stasinou

## **Abstract**

As air pollution is a key issue in the 21<sup>st</sup> century, a number of companies, research centers and Universities have undertaken research and implementation of IoT systems, in order to monitor, study, forecast and improve air quality. This thesis presents the phenomenon of air pollution, the effects it causes on the health of citizens and the air quality policies placed by various countries around the world, including Greece, with the direct aim of substantially mitigating the phenomenon. Furthermore, presented are some mobile applications for real time monitoring of the quality of atmospheric conditions. The applications provide a collection of tools, data and related alerts, for the information and effective vigilance of their users, worldwide. These applications were selected following the research of mobile applications available online, which were reviewed on an Android smartphone with the purpose to draw cohesive and logical conclusions. Finally, extensive bibliography related to IoT system architectures for measuring ambient air quality are presented, using a variety of communication protocols, technologies and sensors. IoT systems were divided into indoor and outdoor systems, also taking into account the fact of presenting their measured data in real or non-real time. In particular, outdoor systems use both short-range and long-range telecommunications protocols, depending on their design and usage scenario. Cars, bicycles, public transport and drones, as well as implementations of static and combined systems, offer improved services for monitoring and measuring air quality, often combining high data accuracy with low equipment costs.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την αγαπημένη μου οικογένεια για όλα αυτά τα χρόνια στήριξης, καθοδήγησης και ανιδιοτελούς αγάπης. Χωρίς αυτή δε θα ήμουν ο άνθρωπος που είμαι σήμερα, ούτε αυτός στον οποίο ευελπιστώ να εξελιχθώ αύριο. Η βοήθειά της, με κάθε της μορφή, με ώθησε να κυνηγήσω τα όνειρά μου και να ολοκληρώσω με επιτυχία τις σπουδές μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ, ακόμη, οφείλω στους καθηγητές και τους συναδέλφους μου, που με καθοδήγησαν και με ενέπνευσαν τα χρόνια των σπουδών μου, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Γεγονός που εκτιμώ βαθύτατα και δε θα ξεχάσω ποτέ στην πορεία της μετέπειτα επαγγελματικής μου καριέρας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κύριο Περικλή Χατζημίσιο, που με βοήθησε ιδιαίτερα με την καθοδήγησή του, τις ιδέες του και την όρεξή του για ανταλλαγή γνώσεων και απόψεων, πάντα με γνώμονα την επιστημονική βελτίωση τόσο της πτυχιακής μου εργασίας όσο και του προσωπικού μου εαυτού.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xiv
Συνομογραφίες.....	xv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή στην παρακολούθηση και μέτρηση της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών με χρήση τεχνολογιών του ΔτΠ.....	1
1.2 Στόχοι και σκοποί της πτυχιακής εργασίας.....	2
1.3 Δομή της πτυχιακής εργασίας .....	2
Κεφάλαιο 2ο: Ατμοσφαιρικοί ρύποι και πολιτικές ποιότητας του αέρα.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Τύποι ατμοσφαιρικών ρύπων .....	4
2.3 Επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών .....	5
2.4 Δείκτης ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα .....	6
2.5 Πολιτικές ποιότητας του αέρα διαφόρων κρατών.....	7
2.5.1 Πολιτικές ποιότητας του αέρα της Κίνας.....	7
2.5.2 Πολιτικές ποιότητας του αέρα της Γερμανίας.....	8
2.5.3 Πολιτικές ποιότητας του αέρα του Ηνωμένου Βασιλείου.....	9
2.5.4 Πολιτικές ποιότητας του αέρα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.....	10
2.6 Ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας του αέρα .....	11
2.7 Πολιτικές ποιότητας του αέρα της Ελλάδας .....	12
2.8 Επίλογος.....	14
Κεφάλαιο 3ο: ΔτΠ και παρακολούθηση της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών.....	15
3.1 Εισαγωγή.....	15
3.2 Βασικές τεχνολογίες του ΔτΠ .....	16
3.3 Τεχνολογίες συνδεσιμότητας του ΔτΠ.....	19
3.3.1 Wi-Fi .....	19
3.3.2 Bluetooth .....	20

3.3.3	ZigBee .....	20
3.3.4	NFC .....	21
3.3.5	LoRa .....	22
3.3.6	NB-IoT .....	22
3.3.7	Sigfox .....	23
3.3.8	2G/3G/4G .....	24
3.3.9	MQTT .....	25
3.4	Αισθητήρες μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων και συνθηκών .....	26
3.4.1	MQ-135 .....	26
3.4.2	MQ-2 .....	27
3.4.3	MQ-3 .....	27
3.4.4	DHT22 .....	28
3.4.5	PLANTOWER PMS5003 .....	28
3.4.6	WZ-S-K .....	29
3.4.7	MQ-131 .....	29
3.4.8	MQ-4 .....	30
3.5	Πλατφόρμες υλικού για το ΔτΠ .....	30
3.5.1	Arduino .....	30
3.5.2	Raspberry Pi .....	31
3.5.3	ESP8266 .....	32
3.6	Πλατφόρμες λογισμικού για το ΔτΠ .....	32
3.6.1	AWS IoT .....	32
3.6.2	Google Cloud Platform .....	33
3.6.3	Watson IoT .....	34
3.6.4	Ubidots .....	34
3.6.5	ThingSpeak .....	35
3.7	Επεξεργασία δεδομένων και τεχνικές πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα .....	35
3.7.1	Μηχανική μάθηση .....	36
3.7.2	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα .....	40
3.8	Επίλογος .....	43
Κεφάλαιο 4ο: Εμπορικές mobile εφαρμογές παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών		44
4.1	Εισαγωγή .....	44
4.2	AirVisual .....	44
4.3	Sh**t! I Smoke .....	45

4.4	ENVI4ALL.....	46
4.5	AIR.....	47
4.6	BreezoMeter.....	49
4.7	Επίλογος.....	50
Κεφάλαιο 5ο: Εφαρμογές ΔτΠ παρακολούθησης και μέτρησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών 51		
5.1	Εισαγωγή.....	51
5.2	Εφαρμογές εσωτερικού χώρου.....	52
5.2.1	Πραγματικού χρόνου.....	52
5.2.2	Μη πραγματικού χρόνου.....	61
5.3	Εφαρμογές εξωτερικού χώρου.....	65
5.3.1	Πραγματικού χρόνου.....	65
5.3.1.1	Στατικά εγκατεστημένα συστήματα.....	65
5.3.1.2	Συστήματα εγκατεστημένα σε οχήματα.....	83
5.3.1.3	Συνδυαστικά συστήματα.....	97
5.3.2	Μη πραγματικού χρόνου.....	103
5.3.2.1	Στατικά εγκατεστημένα συστήματα.....	103
5.3.2.2	Συστήματα εγκατεστημένα σε οχήματα.....	109
5.4	Επίλογος.....	115
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις.....116		
6.1	Συμπεράσματα.....	116
6.2	Μελλοντικές προτάσεις.....	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		119

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Γράφημα (infographic) στατιστικών στοιχείων σχετικά με τη μόλυνση του ατμοσφαιρικού αέρα [6] .....	5
Σχήμα 2.2: Σύγκριση προτύπου ποιότητας του αέρα της Κίνας με τα αντίστοιχα των ΗΠΑ και του Π.Ο.Υ. [9].....	7
Σχήμα 3.1: Τελικοί χρήστες του ΔτΠ και περιοχές εφαρμογών βάσει του είδους δεδομένων παρακολούθησης [24] .....	15
Σχήμα 3.2: Τεχνολογία RFID [27] .....	17
Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική WSN [28] .....	17
Σχήμα 3.4 Cloud, edge και fog computing [29] .....	19
Σχήμα 3.5: Λογότυπο πρωτοκόλλου Wi-Fi [33].....	20
Σχήμα 3.6: Παράδειγμα δικτυακής τοπολογίας πρωτοκόλλου Bluetooth [35] .....	20
Σχήμα 3.7: Τοπολογίες του πρωτοκόλλου ZigBee [36] .....	21
Σχήμα 3.8: Περιπτώσεις χρήσης του πρωτοκόλλου NFC [38] .....	21
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα σύγκρισης των LoRa, Wi-Fi, Bluetooth και των κυψελωτών δικτύων (cellular), βάσει εύρους ζώνης και εμβέλειας [41] .....	22
Σχήμα 3.10: Δικτύωση NB-IoT [42] .....	23
Σχήμα 3.11: Επισκόπηση του παγκόσμιου δικτύου Sigfox [45].....	23
Σχήμα 3.12: Γενιές κυψελωτών δικτύων (cellular networks) [47].....	24
Σχήμα 3.13: Διαδικασία δημοσίευσης/εγγραφής που χρησιμοποιείται από το MQTT [48].....	25
Σχήμα 3.14: Μονάδα αισθητήρα αερίων MQ-135 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα (δεξιά) [54] .....	27
Σχήμα 3.15: Αισθητήρας αερίων MQ-2 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα (δεξιά) [56] .....	27
Σχήμα 3.16: Μονάδα αισθητήρα αερίων MQ-3 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα και της μονάδας (δεξιά) [58] .....	28
Σχήμα 3.17: Μονάδα αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα και της μονάδας (δεξιά) [59] .....	28
Σχήμα 3.18: Αισθητήρας σκόνης λέιζερ PLANTOWER PMS5003 [61] .....	29
Σχήμα 3.19: Αισθητήρας φορμαλδεΐδης WZ-S-K [64].....	29
Σχήμα 3.20: Αισθητήρας όζοντος MQ-131 [65].....	30
Σχήμα 3.21: Μονάδα αισθητήρα όζοντος MQ-4 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα και της μονάδας (δεξιά) [67] .....	30
Σχήμα 3.22: Παράδειγμα πλακέτας Arduino (μοντέλο Arduino UNO REV3) [69] .....	31
Σχήμα 3.23: Το πιο πρόσφατο μοντέλο Raspberry Pi (Raspberry Pi 4 Model B) [71].....	31
Σχήμα 3.24: Μονάδα μικροελεγκτή ESP8266 [73].....	32
Σχήμα 3.25: Κονσόλα διαχείρισης AWS IoT [75].....	33
Σχήμα 3.26: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής εφαρμογής ΔτΠ, που συνδυάζει τη χρήση του Firebase και της πλατφόρμας Google Cloud Platform [78].....	33
Σχήμα 3.27: Περιβάλλον χρήστη της πλατφόρμας ΔτΠ IBM Watson IoT [80] .....	34
Σχήμα 3.28: Περιβάλλον χρήστη της πλατφόρμας ΔτΠ Ubidots [81] .....	34
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα γενικής αρχιτεκτονικής συστημάτων ΔτΠ, που ενσωματώνουν την πλατφόρμα ThingSpeak στο σχεδιασμό τους [83] .....	35
Σχήμα 3.30: Προσαρμοσμένη καμπύλη του μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης για το CO [86]....	36
Σχήμα 3.31: Προσαρμοσμένη καμπύλη του μοντέλου Δένδρου Απόφασης για το CO [86].....	36

Σχήμα 3.32: Προσαρμοσμένη καμπύλη του μοντέλου Τυχαίου Δάσους για το CO [86].....	37
Σχήμα 3.33: Γράφημα απεικόνισης ακραίων τιμών μετρήσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM <sub>2.5</sub> σε αναλογία με την εκάστοτε ημέρα του έτους [87].....	38
Σχήμα 3.34: Γράφημα θερμοκρασίας τιμών πρόβλεψης (κόκκινο) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (μπλε) [89].....	39
Σχήμα 3.35: Γράφημα υγρασίας τιμών πρόβλεψης (κόκκινο) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (μπλε) [89].....	39
Σχήμα 3.36: Μηχανική Μάθηση σε περιβάλλον άκρων-σε-cloud (edge-to-cloud) [90].....	40
Σχήμα 3.37: Ο φυσικός νευρώνας (αριστερά), συγκριτικά με τον στοιχειώδη τεχνητό νευρώνα Perceptron (δεξιά) [85].....	41
Σχήμα 3.38: Δομή του μοντέλου πρόβλεψης TNΔ [91].....	41
Σχήμα 3.39: Γράφημα συγκέντρωσης PM <sub>2.5</sub> , τιμών πρόβλεψης (μπλε) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (πράσινο) [91].....	42
Σχήμα 3.40: Γράφημα συγκέντρωσης PM <sub>10</sub> , τιμών πρόβλεψης (μπλε) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (πράσινο) [91].....	42
Σχήμα 3.41: Δομή του μοντέλου TNΔ [92].....	43
Σχήμα 4.1: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής AirVisual [94].....	45
Σχήμα 4.2: Συσσκευή παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, οικιακής χρήσης, AirVisual Pro [95].....	45
Σχήμα 4.3 Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής Sh**t! I Smoke [96].....	46
Σχήμα 4.4: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής ENVI4ALL [98].....	47
Σχήμα 4.5: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής AIR [100].....	48
Σχήμα 4.6: FLOW 2: Έξυπνη φορητή συσκευή παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο [101].....	48
Σχήμα 4.7: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής του BreezoMeter [103].....	49
Σχήμα 5.1: Αρχιτεκτονική συστήματος ΔτΠ [105].....	53
Σχήμα 5.2: Πίνακας ελέγχου (dashboard) της εσωτερικής ποιότητας του αέρα στην πλατφόρμα ΔτΠ Ubidots [105].....	53
Σχήμα 5.3: Επισκόπηση του ανεπτυγμένου συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την δοκιμαστική περίπτωση του πειράματος [106].....	55
Σχήμα 5.4: Πλαίσιο (framework) ΔτΠ για την παρακολούθηση και την ανάλυση της εσωτερικής ποιότητας του αέρα [108].....	56
Σχήμα 5.5: Η αρχιτεκτονική του συστήματος [55].....	57
Σχήμα 5.6: Υλοποίηση Συστήματος [109].....	58
Σχήμα 5.7: Αρχιτεκτονική συστήματος iDust [110].....	59
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα δομής συστήματος [111].....	60
Σχήμα 5.9: Διεπαφή απόκτησης δεδομένων του υπολογιστή [111].....	61
Σχήμα 5.10: Σελίδα προβολής της πλατφόρμας Yeelink μέσω του φυλλομετρητή Google Chrome [111].....	61
Σχήμα 5.11: Μοντέλο ανιχνευτή αερίου πολλαπλού κινδύνου (Multiple Hazard Gas Detector - MHGD) [1].....	62
Σχήμα 5.12: Σύστημα αίσθησης (sensing) ΔτΠ [91].....	63
Σχήμα 5.13: Γράφημα μετρήσεων της ποιότητας του αέρα με την παρουσία και την απουσία των εν λόγω φυτών [112].....	64
Σχήμα 5.14: Μοντέλο παρακολούθησης της ρύπανσης του αέρα με το φυτό Chlorophytum Comosum [112].....	64

Σχήμα 5.15: Μοντέλο παρακολούθησης της ρύπανσης του αέρα με το φυτό <i>Sansevieria Trifasciata</i> [112]	64
Σχήμα 5.16: Υλοποίηση υλικού μέρους του συστήματος [113]	65
Σχήμα 5.17: Ολοκληρωμένο πρωτότυπο σταθμού ΔτΠ του συστήματος [114]	66
Σχήμα 5.18: Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα [115]	67
Σχήμα 5.19: Το γραφικό περιβάλλον χρήστη, υλοποιημένο με το εργαλείο LabVIEW [116]	68
Σχήμα 5.20: Ενσωμάτωση της μονάδας μικροελεγκτή με αυτές των αισθητήρων και του LoRa [116]	68
Σχήμα 5.21: Μετρούμενες τιμές PM <sub>2.5</sub> (μπλε) και τιμές πρόβλεψης (κόκκινο) [117]	69
Σχήμα 5.22: Εφαρμογή του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες [117]	70
Σχήμα 5.23: Ροή δεδομένων με χρήση LoRa και ELC [118]	71
Σχήμα 5.24: Πρωτότυπη υλοποίηση ενός κόμβου αίσθησης LoRa που περιλαμβάνει τέσσερις αισθητήρες συνδεδεμένους σε αυτόν [118]	71
Σχήμα 5.25: Πρωτότυπο κόμβου αίσθησης [119]	72
Σχήμα 5.26: Εφαρμογή πελάτη προσωπικού υπολογιστή (PC) [119]	73
Σχήμα 5.27: Το πλαίσιο (framework) της παρακολούθησης του δείκτη ποιότητας του αέρα [119]	73
Σχήμα 5.28: Πίνακας ελέγχου εφαρμογής Grafana [89]	74
Σχήμα 5.29: Πρωτότυπο του συστήματος AirQ [120]	75
Σχήμα 5.30: Πίνακας ελέγχου AirQ και mobile εφαρμογή [120]	75
Σχήμα 5.31: Πρωτότυπο της συσκευής συλλογής του δείκτη ποιότητας του αέρα [121]	76
Σχήμα 5.32: Προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης με χρήση RFID [122]	77
Σχήμα 5.33: Προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης της ρύπανσης με χρήση του ΔτΠ [122]	77
Σχήμα 5.34: Η ολοκληρωμένη συσκευή μέτρησης της ποιότητας του αέρα [60]	78
Σχήμα 5.35: Η ροή του συστήματος στο εργαλείο Node-RED [123]	79
Σχήμα 5.36: Παρουσίαση τιμών μετρούμενων παραμέτρων μέσω του Watson IoT [123]	79
Σχήμα 5.37: Κόμβος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα [125]	81
Σχήμα 5.38: Προτεινόμενα σημεία εγκατάστασης του συστήματος στην πόλη Καρατάσι [84]	82
Σχήμα 5.39: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος LPWAN «έξυπνων» αισθητήρων ρύπανσης του αέρα μέσω του NB-IoT [126]	82
Σχήμα 5.40: Αισθητήρες μεταδίδουν δεδομένα στον κόμβο συλλογής (sink node) [127]	83
Σχήμα 5.41: Δικτυακό διάγραμμα της διαδρομής που ακολουθούν τα δεδομένα από την πλευρά του αισθητήρα προς τους τελικούς χρήστες [128]	85
Σχήμα 5.42: Εγκατάσταση και χρήση του συστήματος σε αυτοκίνητο [129]	86
Σχήμα 5.43: Χάρτης διαδρομής ρύπανσης [129]	86
Σχήμα 5.44: Μονάδα παρακολούθησης ατμοσφαιρικών ρύπων [130]	87
Σχήμα 5.45: Παράδειγμα γραφήματος μετρήσεων όζοντος βάσει χρόνου (οι αρνητικές τιμές οφείλονται στις λανθασμένες – μη έγκυρες μετρήσεις των αισθητήρων) [130]	87
Σχήμα 5.46: Πρωτότυπο του UAV συστήματος παρακολούθησης ποιότητας του αέρα [131]	88
Σχήμα 5.47: Πρωτότυπο του Dr-TAPM [132]	89
Σχήμα 5.48: Σύστημα αισθητήρων που χρησιμοποιείται στο πρωτότυπο του Dr-TAPM [132]	90
Σχήμα 5.49: Μοντέλο ρύπου περιοχής [132]	90
Σχήμα 5.50: Μοντέλο συλλογής δεδομένων MSB [133]	91
Σχήμα 5.51: NODE (PSD) - Ασύρματη πλατφόρμα αισθητήρων της εταιρείας Variable Technologies [133]	91
Σχήμα 5.52: Γραφική διεπαφή χρήστη (UI) της υλοποιημένης πλατφόρμας του συστήματος [134]	92
Σχήμα 5.53: Μονάδα υλικού (hardware module) του UAV [62]	93
Σχήμα 5.54: Σενάριο εφαρμογής του συστήματος [62]	93

Σχήμα 5.55: Το drone με το φορτίο υλικού του κατά τις δοκιμαστικές πτήσεις [135].....	94
Σχήμα 5.56: Κέντρο ελέγχου [136].....	96
Σχήμα 5.57: Περιβάλλον υλοποιημένης εφαρμογής smartphone [136].....	96
Σχήμα 5.58: Το σύστημα αισθητήρων εγκατεστημένο σε ένα φορτηγό απορριμμάτων [136].....	96
Σχήμα 5.59: Αρχιτεκτονική του συστήματος UH-BigDataSys [137].....	98
Σχήμα 5.60: Δεδομένα ποιότητας του αέρα, δεδομένα ανθρώπινης φυσιολογίας, υπηρεσία καθοδήγησης με γνώμονα την υγεία και παράγοντες διαταραχής του ύπνου [137].....	98
Σχήμα 5.61: Αρχιτεκτονική του συστήματος [138].....	99
Σχήμα 5.62: Απεικόνιση της εφαρμογής: α) υλικό μέρος και ανάπτυξη, β) διεπαφές χρήστη [138] .	100
Σχήμα 5.63: Συνεργατικό δίκτυο αισθητήρων βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa για παρακολούθηση της ρύπανσης σε «έξυπνες πόλεις» [139].....	101
Σχήμα 5.64: Πρωτότυπο κόμβου LoRa κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων [139].....	101
Σχήμα 5.65: Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, κατά το δοκιμαστικό πείραμα, μετρούμενη σε μέρη στο εκατομμύριο (parts per million - ppm) [139].....	101
Σχήμα 5.66: Εσωτερική δομή κόμβου αίσθησης [87].....	102
Σχήμα 5.67: Ανάλυση δεδομένων με χρήση των μεθόδων batch και stream analysis [87].....	103
Σχήμα 5.68: Πρωτότυπο συστήματος [140].....	104
Σχήμα 5.69: Γράφημα της συγκέντρωσης σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα τριών διαφορετικών περιοχών, σε συνάρτηση με το χρόνο. Βάσει των παραπάνω, χωρίζονται σε περιοχές καθόλου ή ελάχιστα μολυσμένες (μπλε), ελαφρώς μολυσμένες (πορτοκαλί) και πολύ μολυσμένες (πράσινο) [141].....	105
Σχήμα 5.70: Γενική αρχιτεκτονική του συστήματος Pollution-Spots [142].....	106
Σχήμα 5.71: Εμπρός και πίσω όψη του κάθε Spot [142].....	106
Σχήμα 5.72: Η αρχιτεκτονική του συστήματος [143].....	107
Σχήμα 5.73: Η αρχιτεκτονική του συστήματος [144].....	108
Σχήμα 5.74: Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων του SensingBus [145].....	109
Σχήμα 5.75: Μέθοδος σκέδασης φωτός για τη μέτρηση της συγκέντρωσης σωματιδίων [146].....	110
Σχήμα 5.76: Κόμβος-Mosaic εγκατεστημένος σε λεωφορείο (η είσοδος ροής αέρα έχει φορά προς την κατεύθυνση κίνησης του λεωφορείου) [146].....	111
Σχήμα 5.77: Τα μη επεξεργασμένα (raw) δεδομένα στη σειριακή διεπαφή της ενσωματωμένης πύλης [147].....	112
Σχήμα 5.78: Η διαδικτυακή εφαρμογή για την κάμερα [147].....	112
Σχήμα 5.79: Η διεπαφή κοινής χρήσης δεδομένων για τη πιλοτική δοκιμή του συστήματος [147]...	112
Σχήμα 5.80: Συνολική εικόνα του M-ESB [147].....	113
Σχήμα 5.81: Μονάδα ZigBee CC2530 (αριστερά), μονάδα GPS (μέση) και κάμερα (δεξιά) [147]...	113
Σχήμα 5.82: Αρχιτεκτονική VSN για την παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα [148].....	114
Σχήμα 5.83: Το ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης που χρησιμοποιείται σε κάθε ποδήλατο [149].....	115

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Σύγκριση τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων [31], [37], [42], [43], [46], [49] .....	25
Πίνακας 4.1: Σύγκριση mobile εφαρμογών παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών [94], [96], [98], [100], [103].....	50

## Συντομογραφίες

AQI	Air Quality Index
AQMA	Air Quality Management Area
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
CDMA	Code Division Multiple Access
ELC	Ethereum Light Client
EPA	Environmental Protection Agency
GSM	Global System for Mobile Communication
IAQ	Indoor Air Quality
IAQI	Individual Air Quality Index
IoT	Internet of Things
LoOP	Local Outlier Probabilities
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LSTM	Long Short-Term Memory
LTE	Long Term Evolution
MHGD	Multiple Hazard Gas Detector
MMS	Multimedia Message Services
MQTT	Message Telemetry Queuing Transport
MSB	Mobile Sensing Box
M2M	Machine to machine
NB-IoT	Narrow-Band Internet of Things
NFC	Near Field Communications
PSD	Personal Sensing Device
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SMS	Short Message Services
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
TTL	Transistor-transistor Logic
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VOC	Volatile Organic Compound

VSN	Vehicular Sensor Network
WiMAX	Wireless Interoperability for Microwave Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
ΔτΠ	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΗΒ	Ηνωμένο Βασίλειο
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής
ΜΜ	Μηχανική Μάθηση
Π.Ο.Υ.	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΤΝΔ	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα
ΥΠΕΚΑ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας

## Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή στην παρακολούθηση και μέτρηση της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών με χρήση τεχνολογιών του ΔτΠ

Η μεγάλη εκπομπή αέριων ρύπων που δημιουργείται από την υπερβολική βιομηχανοποίηση, καθώς και από άλλες πηγές ρύπων, έχει διαταράξει την ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα την μείωση της ποιότητας του αέρα που αναπνέουμε, προκαλώντας επιδείνωση της υγείας των πολιτών. Τα επίσημα δεδομένα του παγκόσμιου αριθμού θανάτων, που προκαλούνται εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και που παρουσιάζει ο Π.Ο.Υ. ετησίως, είναι ανησυχητικά και κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου προς όλους μας. Κάθε άνθρωπος θα πρέπει να εκπαιδευθεί σε έναν ελάχιστο βαθμό, προφυλάσσοντας τον εαυτό του και τους γύρω του από τις συνέπειες της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, μετρώντας και παρατηρώντας τις διάφορες τιμές των αερίων που εμπεριέχονται σε αυτόν, όπως και των διακυμάνσεων που αυτές εμφανίζουν, είναι αναγκαία προκειμένου να προστατευτεί ο γενικός πληθυσμός και να βελτιωθεί η ποιότητα της καθημερινής του ζωής. Τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα έχουν πολύ μεγάλο κόστος απόκτησης, εγκατάστασης, αλλά και συντήρησης. Ωστόσο, μία εξίσου αποτελεσματική, αλλά ταυτοχρόνως πολύ πιο οικονομική, λύση αποτελεί η χρήση συστημάτων βασισμένων σε τεχνολογίες του ΔτΠ. Συστήματα χαμηλού κόστους και υψηλής ακρίβειας είναι σε θέση να παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα συνεχούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, τόσο σε ανεπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες χώρες.

Τα δεδομένα μέτρησης ατμοσφαιρικών συνθηκών που παράγονται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, όσο και για τη δημιουργία τράπεζας ιστορικών δεδομένων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ερευνητικό επίπεδο για την εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς και την διεξαγωγή στατιστικών αναλύσεων και πρόβλεψης των μελλοντικών τάσεων της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα, με τη δημιουργία μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης.

Συστήματα ΔτΠ εγκατεστημένα σε σταθερά σημεία, σε οχήματα και σε ρούχα πολιτών, μπορούν να συνδυάσουν τα παραγόμενα δεδομένα μετρήσεών τους για την καλύτερη τροφοδότηση μοντέλων επεξεργασίας δεδομένων και λήψης αποφάσεων. Στόχος των συστημάτων ΔτΠ παρακολούθησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, είναι η αποτελεσματική αποθήκευση, μετάδοση και επεξεργασία των δεδομένων που παράγονται από τους ειδικούς αισθητήρες τους, συνδυάζοντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό κόστος συντήρησης. Για τον παραπάνω λόγο, τεχνολογίες συνδεσιμότητας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και μεγάλης εμβέλειας LPWAN, χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων, σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Mobile εφαρμογές και εφαρμογές web χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την καθημερινή ενημέρωση των πολιτών περί της ποιότητας του αέρα που αναπνέουν, οι οποίες πολλές φορές συνδυάζονται με συσκευές καθαρισμού του αέρα εσωτερικών χώρων (air purifiers) ή παρακολούθησης της ποιότητάς του, βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής κάθε ανθρώπου. Οι εφαρμογές αυτές βασίζονται σε συστήματα ΔτΠ, κρατικών και ερευνητικών υπηρεσιών και στα πολύτιμα δεδομένα που παράγουν.

## 1.2 Στόχοι και σκοποί της πτυχιακής εργασίας

Στόχος της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας αποτελεί η σφαιρική παρουσίαση του φλέγοντος ζητήματος της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα και η μελέτη σύγχρονων τεχνολογικών λύσεων εξομάλυνσης του φαινομένου. Ο αναγνώστης αποκτά χρήσιμες γνώσεις σχετικά με την παρακολούθηση και τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών σε μία πληθώρα περιπτώσεων, μέσω της μελέτης ενός μεγάλου αριθμού ερευνητικών άρθρων, βιβλιογραφίας και υλοποιήσεων ΔτΠ που έχουν χωριστεί σε επιμέρους κατηγορίες, με άμεσο στόχο την καλύτερη κατανόηση των τρεχόντων διαθέσιμων συστημάτων, σε παγκόσμια κλίμακα. Ακόμη, ο αναγνώστης αποκτά βασικές γνώσεις εννοιών και τεχνολογιών του ΔτΠ και εξοικειώνεται με το σκεπτικό χρήσης τους συνδυαστικά με την παρακολούθηση και τη μέτρηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα που αναπνέει. Τέλος, θα ήταν επιθυμητή η χρήση των mobile εφαρμογών που προτείνονται και παρουσιάζονται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, έτσι ώστε ο αναγνώστης να ευαισθητοποιηθεί περισσότερο σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος στο οποίο ζει, χτίζοντας γερά θεμέλια για την πιθανή μελλοντική του πρακτική ενασχόληση με το ΔτΠ και παρεμφερείς του εφαρμογές.

## 1.3 Δομή της πτυχιακής εργασίας

Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζει, συνοπτικά, τους βασικούς τύπους των ατμοσφαιρικών ρύπων και τις επιπτώσεις που αυτοί προκαλούν στην υγεία των πολιτών. Επίσημα δεδομένα του Π.Ο.Υ. χρησιμοποιούνται, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η ζωτική σημασία της καλής ποιότητας του αέρα στη ζωή όλων μας. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε έναν αριθμό πολιτικών ποιότητας του αέρα που εφαρμόζουν διάφορα κράτη του πλανήτη, συμπεριλαμβανομένης της χώρας μας, καθώς και της ΕΕ, με σκοπό τον μετριασμό του φαινομένου ρύπανσής του και της άμεσης βελτίωσης και διασφάλισης της ευημερίας των πολιτών.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρατίθενται βασικοί ορισμοί και τεχνολογίες του ΔτΠ, τεχνολογίες συνδεσιμότητας που χρησιμοποιούνται συχνά σε υλοποιήσεις ΔτΠ, αισθητήρες μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων και συνθηκών, καθώς και πλατφόρμες υλικού και λογισμικού που συναντούμε συχνά στην επιστημονική βιβλιογραφία συστημάτων ΔτΠ. Ακόμη, παρουσιάζεται το υψηλότερο επίπεδο (layer) αρχιτεκτονικής ενός συστήματος ΔτΠ, το οποίο περιλαμβάνει εργασίες επεξεργασίας δεδομένων και τεχνικές πρόβλεψης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, μέσω ορισμένων παραδειγμάτων της έρευνας που πραγματοποιήθηκε.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζονται πέντε mobile εφαρμογές για την παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας περισσότερη βαρύτητα σε μετρήσεις συγκέντρωσης αέριων ρύπων σε εξωτερικούς χώρους και στη μεταξύ τους σύγκριση. Καθώς, υπάρχει διαθέσιμος ένας μεγάλος αριθμός mobile εφαρμογών στο διαδίκτυο παρόμοιας φιλοσοφίας και δυνατοτήτων, πραγματοποιήθηκε σχετική έρευνα και δοκιμή πολλών από αυτών, σε Android smartphone, με σκοπό την παρουσίαση των υποκειμενικά καλύτερων, πιο εύχρηστων και πιο ολοκληρωμένων εφαρμογών.

Κατόπιν εκτενούς μελέτης της παγκόσμιας βιβλιογραφίας, στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών υλοποιήσεων και σχεδίων ολοκληρωμένων συστημάτων ΔτΠ που χωρίστηκαν σε επιμέρους κατηγορίες, παρέχοντας μία εύληπτη εικόνα των διαφορετικών προσεγγίσεων σχεδιασμού συστημάτων και της χρήσης τεχνολογιών ΔτΠ, για τη μελέτη και την παρακολούθηση της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών, καλύπτοντας ένα εύρος σεναρίων και αναγκών.

Τέλος, το 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρέχει μία σύνοψη της πτυχιακής εργασίας στο σύνολό της, αναφέροντας σημαντικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από την συγγραφή της, κλείνοντας με σχετικές μελλοντικές προτάσεις πρακτικής εξέλιξής της.

## Κεφάλαιο 2ο: Ατμοσφαιρικοί ρύποι και πολιτικές ποιότητας του αέρα

### 2.1 Εισαγωγή

Η ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα καθώς και η βελτίωση της ποιότητάς του, αποτελεί παγκοσμίως ένα μείζον ζήτημα, το οποίο θα πρέπει να ενδιαφέρει άμεσα όλους τους ανθρώπους, ανεξαρτήτως ηλικίας ή προφίλ υγείας. Λόγω της ρύπανσης, δημιουργούνται προβλήματα τόσο στο αναπνευστικό όσο και στο καρδιαγγειακό σύστημα. Σήμερα, τα προβλήματα που σχετίζονται με το περιβάλλον, είναι από τα πιο κρίσιμα, καθώς ένας σημαντικός αριθμός ανθρώπων πάσχει από νέα είδη ασθενειών, όπως το «Σύνδρομο Του Άρρωστου Κτιρίου» (Sick Building Syndrome - SBS) [1], που οφείλεται εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον εργασίας ή τις συνθήκες διαβίωσης. Πολλές επιχειρήσεις, αλλά και μεμονωμένοι πολίτες, εγκαθιστούν συσκευές καθαρισμού αέρα και νερού για την ευεξία των υπαλλήλων τους σε γραφεία ή και για τις οικογένειές τους. Προκειμένου να μετρήσουμε την ποιότητα του αέρα και να την κατηγοριοποιήσουμε σε συνάρτηση με την καταλληλότητά της, πρέπει να μετρήσουμε την πιθανή ύπαρξη διάφορων επιβλαβών, για την υγεία, αερίων.

### 2.2 Τύποι ατμοσφαιρικών ρύπων

Στην καθημερινότητά μας, ερχόμαστε αντιμέτωποι με διάφορους ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως είναι το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), οι υδρογονάνθρακες με κύριο ρύπο το βενζόλιο ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), το όζον ( $\text{O}_3$ ), ο μόλυβδος ( $\text{Pb}$ ) και τα αιωρούμενα σωματίδια (κυρίως τα  $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$ ) [2 - 3]. Τα παραπάνω αέρια, συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα ως παράγωγα των μηχανών των οχημάτων που κυκλοφορούν σε μεγάλα αστικά κέντρα, μαγειρικής, καπνού, αιωρούμενων σωματιδίων, ορυκτών ινών και άλλων. Τα αιωρούμενα σωματίδια λόγω της περιεκτικότητάς τους σε καρκινογόνες ουσίες, όπως ο αμιάντος και ο καπνός, είναι από τους πιο επικίνδυνους ρύπους και επιδεινώνουν τις βλαβερές συνέπειες άλλων αέριων ρύπων, όπως το διοξείδιο του θείου. Η επικινδυνότητά τους εξαρτάται από τη διάμετρό τους, καθώς τα μικρότερα σωματίδια τείνουν να εισπνέονται πιο βαθιά στους πνεύμονες, προκαλώντας βλάβες σε αυτούς, με κύριο εχθρό για τον άνθρωπο τα αιωρούμενα σωματίδια τύπου  $\text{PM}_{2.5}$ , όπου η διάμετρός τους είναι μικρότερη των 2.5 μικρών (micron). Αναλυτικότερα, περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τους ατμοσφαιρικούς ρύπους παρουσιάζονται παρακάτω, ως εξής [2]:

- Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) είναι ένα άχρωμο αέριο που έχει έντονη οσμή, όταν συναντάται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Στην ατμόσφαιρα αντιδρά με οξειδωτικά ή σωματίδια, σχηματίζοντας σουλφίδια και όξινα σωματίδια θείου, τα οποία είναι πιο επικίνδυνα από το αρχικό διοξείδιο του θείου, εξαιρώντας άτομα που πάσχουν από άσθμα. Τα όξινα σωματίδια του θείου είναι τα κύρια συστατικά της όξινης βροχής.
- Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι μη ερεθιστικό, άχρωμο, άγευστο και άοσμο αέριο. Προκαλεί βλάβες που οφείλονται ουσιαστικά στη στέρηση του οργανισμού από το οξυγόνο.
- Τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) είναι ένα σύνολο αέριων ρύπων που παράγονται, κατά την ανάφλεξη καύσιμης ύλης, καθώς και σε χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Τα δύο κύρια οξειδία του αζώτου είναι το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) και το μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ). Προσβάλλουν άμεσα την υγεία και υποβαθμίζουν το περιβάλλον.

- Το όζον (O<sub>3</sub>) αποτελεί το κύριο συστατικό της αιθαλομίχλης και είναι υπεύθυνο για ορισμένα από τα χειρότερα επεισόδια αέριας ρύπανσης. Σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα από τη χημική αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου, παρουσία ηλιακού φωτός.
- Ο όρος αιωρούμενα σωματίδια χρησιμοποιείται για να περιγράψει διάφορες ουσίες που υπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα ως διακριτά σωματίδια, άλλες φορές σε υγρή και άλλες φορές σε στερεή μορφή.

### 2.3 Επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.), παγκοσμίως, εννέα στους δέκα ανθρώπους αναπνέουν αέρα που περιέχει υψηλά επίπεδα αέριων ρύπων, ενώ περίπου επτά εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους κάθε χρόνο, εξαιτίας της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα [4]. Πιο συγκεκριμένα, η παγκόσμια ατμοσφαιρική ρύπανση είναι υπεύθυνη για το 29% των θανάτων από καρκίνο του πνεύμονα, για το 17% από οξεία λοίμωξη του κατώτερου αναπνευστικού, για το 24% από εγκεφαλικό επεισόδιο, για το 25% από ισχαιμική καρδιακή νόσο και, τέλος, είναι υπεύθυνη για το 43% των θανάτων και ασθενειών από χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια. Τόσο η βραχυπρόθεσμη όσο και η μακροπρόθεσμη έκθεση παιδιών και ενηλίκων στην ατμοσφαιρική ρύπανση του περιβάλλοντος, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη πνευμονική λειτουργία, αναπνευστικές λοιμώξεις και επιδεινωμένο άσθμα. Νέα ερευνητικά στοιχεία, επίσης, δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει τον διαβήτη και τη νευρολογική ανάπτυξη παιδιών [5].



Σχήμα 2.1: Γράφημα (infographic) στατιστικών στοιχείων σχετικά με τη μόλυνση του ατμοσφαιρικού αέρα [6]

Οι βραχυπρόθεσμες παρενέργειες της έκθεσης ενός ατόμου στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι προσωρινές και περιλαμβάνουν ασθένειες, όπως πνευμονία ή βρογχίτιδα, καθώς και δυσφορία, που εμφανίζεται με ερεθισμό στη μύτη, το λαιμό, τα μάτια ή το δέρμα. Ακόμη, μπορούν να προκληθούν πονοκέφαλοι, ζάλη και ναυτία. Αντίθετα, οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία ενός ατόμου, μπορούν να διαρκέσουν για χρόνια ή και για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του. Περιλαμβάνουν καρδιακές παθήσεις, καρκίνο του πνεύμονα και αναπνευστικές ασθένειες, όπως το εμφύσημα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί επίσης να προκαλέσει μακροχρόνια βλάβη στα νεύρα, τον εγκέφαλο, τα νεφρά, το συκώτι και άλλα όργανα, ενώ ορισμένοι επιστήμονες πιστεύουν πως οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προκαλούν γενετικές ανωμαλίες [7].

### 2.4 Δείκτης ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα

Η ανάγκη παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, στην εποχή του διαδικτύου και των «έξυπνων» συσκευών που διανύουμε, αποτελεί ένα κρίσιμο αγαθό για τον άνθρωπο, καθώς ο ίδιος μπορεί να βελτιώσει τις καθημερινές του συνήθειες, και κατ' επέκταση την υγεία του, χρησιμοποιώντας μία από τις διαθέσιμες πλατφόρμες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για την περιοχή όπου διαμένει ή επιθυμεί να ταξιδέψει. Ο δείκτης ποιότητας του αέρα ή αλλιώς Air Quality Index (AQI), είναι μία τιμή, δίχως μονάδα μέτρησης, η οποία καθιστά την ποιότητα του αέρα ως καλή ή όχι για όλους τους έμβιους οργανισμούς. Μπορεί να μετρηθεί ωριαία, έως και σε βάθος ενός έτους, αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τρόπο μέτρησης παρακολούθησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και έχει σχεδιαστεί για να προτρέπει τους ανθρώπους, είτε ανήκουν σε κάποια ευπαθή ομάδα είτε όχι, να προστατεύσουν την υγεία τους, περιορίζοντας την έκθεσή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση και τροποποιώντας τις βραχυπρόθεσμες δραστηριότητές τους [8].

Ανά τον κόσμο, υπάρχουν αρκετοί τύποι AQI, ο καθένας μετρούμενος με διαφορετική προσέγγιση. Ωστόσο, δύο επικρατέστεροι δείκτες AQI είναι αυτοί των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (US AQI) και της Κίνας (CN AQI), οι οποίοι περιλαμβάνουν πέντε δείκτες (indicators), διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>), διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>, που μετρούνται σε ημερήσιο μέσο όρο, καθώς και ένα δείκτη όζοντος (O<sub>3</sub>) που μετριέται σε επίπεδο μίας ώρας και οκτώ ωρών, ενώ, συνολικά, κάθε δείκτης μετριέται μεμονωμένα και ορίζεται ως ατομικός δείκτης ποιότητας του αέρα IAQI (Individual Air Quality Index). Ο ρύπος με την υψηλότερη τιμή IAQI θεωρείται ο βασικός ρύπος. Η τελική τιμή AQI αντιπροσωπεύεται ακριβώς από την τιμή IAQI του βασικού ρύπου [9]. Η τιμή του AQI κυμαίνεται μεταξύ 0 και 500 και χωρίζεται σε έξι κλάσεις, με τον παρακάτω τρόπο [10]:

- i) 0 – 50 (καλή ποιότητα): Η ποιότητα του αέρα είναι ικανοποιητική και η ρύπανσή του ενέχει μικρό ή καθόλου κίνδυνο.
- ii) 51 – 100 (Μέτρια ποιότητα): Η ποιότητα του αέρα είναι αποδεκτή, ωστόσο θα πρέπει να επικρατεί σχετική προσοχή από μικρό αριθμών ατόμων, που παρουσιάζει ασυνήθιστη ευαισθησία στη μόλυνση του αέρα.
- iii) 101 – 150 (Ανθυγιεινή ποιότητα για ευπαθείς ομάδες): Άτομα ευπαθών ομάδων μπορεί να παρουσιάσουν επιπτώσεις στην υγεία τους. Το γενικό κοινό δεν είναι πιθανό να επηρεαστεί.
- iv) 151 – 200 (Ανθυγιεινή ποιότητα): Όλοι οι άνθρωποι μπορεί να παρουσιάσουν επιπτώσεις στην υγεία τους. Άτομα ευπαθών ομάδων μπορεί να παρουσιάσουν πιο σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία τους.

- ν) 201 – 300 (Πολύ ανθυγιεινή ποιότητα): Προειδοποιήσεις για την υγεία σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Είναι πιθανότερο να επηρεαστεί ολόκληρος ο πληθυσμός.
- vi) 300+ (Επικίνδυνη ποιότητα - συναγερμός υγείας): Ο καθένας μπορεί να εμφανίσει σοβαρότερες επιπτώσεις στην υγεία του.

China Air Quality Standard (2012) Comparison With USA (1996) and WHO																
AQI (China)	AQI (USA)	China & USA AQI	Pollutant Concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )													
			SO <sub>2</sub> (24h Average)		NO <sub>2</sub> (24h Average)		CO (24h Average : mg/m <sup>3</sup> )		O <sub>3</sub> (1h)		O <sub>3</sub> (8h Average)		PM10 (24h Average)		PM2.5 (24h Average)	
Excellent	Good	0-50	50	89	40	-	2	5	160	-	100	116	50	50	35	15
Good	Moderate	51-100	150	377	80	-	4	11	200	-	160	147	150	150	75	35
Light Polluted	Unhealthy For Sensitive Groups	101-150	475	587	180	-	14	14	300	321	215	186	250	250	115	65
Moderately Polluted	Unhealthy	151-200	800	797	280	-	24	18	400	400	265	225	350	350	150	150
Heavily Polluted	Very Unhealthy	201-300	1600	1583	565	2260	36	35	800	792	800	733	420	420	250	250
Severely Polluted	Hazardous	301-500	2620	2631	940	3760	60	58	1200	1184	-	-	600	600	500	500
AQI (WHO)	AQG		20		200 (1h Average)		-		-		100		50		25	
	Interim Target-3		-		-		-		-		160		75		37.5	
	Interim Target-2		50		-		-		-		240		100		50	
	Interim Target-1		125		-		-		-		-		150		75	

Σχήμα 2.2: Σύγκριση προτύπου ποιότητας του αέρα της Κίνας με τα αντίστοιχα των ΗΠΑ και του Π.Ο.Υ. [9]

## 2.5 Πολιτικές ποιότητας του αέρα διαφόρων κρατών

Η διαφύλαξη της ποιότητας του αέρα, και του περιβάλλοντος γενικότερα, πρέπει να αποτελεί βασικό στόχο των κρατών όλου του κόσμου. Παρακάτω, παρουσιάζονται σημαντικές πολιτικές ποιότητας του αέρα που εφαρμόζουν η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), η χώρα μας και διάφορα άλλα κράτη, ανά την υφήλιο.

### 2.5.1 Πολιτικές ποιότητας του αέρα της Κίνας

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη έρευνα των Ηνωμένων Εθνών [11], που διεξήχθη το 2015, η Κίνα έχει υιοθετήσει πολλές πολιτικές ποιότητας του αέρα με σκοπό τη βελτίωσή του, σε ευρεία κλίμακα, ωστόσο βασική πρόκληση αποτελεί η εφαρμογή τους, λόγω της πολύπλοκης δομής τους, του σχετικού νομικού πλαισίου, καθώς και της υπάρχουσας διοικητικής δομής. Σημειώνεται πως τα εθνικά πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα της Κίνας πληρούσαν τα πρότυπα του Π.Ο.Υ. ή βρίσκονταν εντός των ενδιάμεσων στόχων του.

Αναλυτικά, παρουσιάζονται παρακάτω πληροφορίες σχετικά με κάποιες από τις σημαντικότερες πολιτικές της ποιότητας του αέρα που είχε ήδη εφαρμόσει η Κίνα ή σχεδίαζε να εφαρμόσει στο άμεσο μέλλον:

- Το δωδέκατο «Πενταετές Σχέδιο Πρόληψης και Ελέγχου της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης σε Περιοχές-Κλειδιά» (Five-Year Plan on Air Pollution Prevention and Control in Key Regions), καθώς και σχετικοί νόμοι και κανονισμοί, παρουσίασε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο πρόληψης και ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καλύπτοντας τρεις βασικές γεωγραφικές περιοχές και δέκα ομάδες πόλεων της Κίνας.
- Δόθηκε έμφαση στην ενθάρρυνση της συμμετοχής των πολιτών στο κομμάτι της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα μέσω ταινιών, αφισών και διαφημιστικού υλικού.
- Εισήχθησαν δεσμευτικοί στόχοι μείωσης της ρύπανσης, καθώς το Πρόγραμμα Συνολικού Ελέγχου Εκπομπών (Total Emission Control Program) και διάφορα πρότυπα εκπομπών ενισχύθηκαν, η ικανότητα παρακολούθησης αυξήθηκε σημαντικά και πολλά δεδομένα δημοσιεύθηκαν στο κοινό. Το Σχέδιο Δράσης για την Πρόληψη και τον Έλεγχο της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του 2013 (Air Pollution Prevention and Control Action Plan) εστίασε και στη βιομηχανική αναδιάρθρωση, τη βιομηχανική τοποθεσία και την τεχνολογική καινοτομία, καθώς και στην ισχυρότερη διακυβέρνηση. Προγραμματίστηκε η επιβολή του, συνδέοντας τις εγκρίσεις βιομηχανικών έργων με τη Διαχείριση Ενεργειακών Πληροφοριών (Energy Information Administration – EIA), τους ελέγχους ενέργειας, και τις αξιολογήσεις επιδόσεων των ανώτερων στελεχών.
- Η PetroChina και η Sinopec επένδυσαν 2 δισεκατομμύρια yuan (περίπου 244 εκατομμύρια ευρώ) για την επεξεργασία VOCs, σε επιχειρήσεις διυλιστηρίων. Τον Φεβρουάριο του 2015 επιβλήθηκε φόρος κατανάλωσης VOCs, σε περιπτώσεις όπου το περιεχόμενο των VOCs ήταν μεγαλύτερο των 420 γραμμαρίων ανά λίτρο, με σκοπό την προώθηση της μείωσής του σε χρώματα, κόλλες και άλλα προϊόντα.

### 2.5.2 Πολιτικές ποιότητας του αέρα της Γερμανίας

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη έρευνα των Ηνωμένων Εθνών [12], που διεξήχθη το 2015, η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα της Γερμανίας παρακολουθείται από ένα εξελιγμένο εθνικό δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, ενώ οι αυστηρές οριακές τιμές και τα μέτρα για την πρόληψη εκπομπών από τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τα ιδιωτικά νοικοκυριά, ακολουθώντας πιστά τη νομοθεσία της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα, έχουν συμβάλει στη σημαντική μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Γερμανίας, σε σύγκριση με τις προηγούμενες δεκαετίες. Παρόλα αυτά, το κομμάτι της μετακίνησης των πολιτών, με τη χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς ή Ι.Χ., αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης της χώρας. Οι υπολογισμοί της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος της Γερμανίας, έδειξαν πως η έκθεση σε λεπτά αιωρούμενα σωματίδια, ήταν υπεύθυνη για περίπου 47.000 πρόωρους θανάτους, ετησίως. Σημειώνεται πως οι κανονισμοί της Γερμανίας για την ποιότητα του αέρα, βασίζονται σε διατάξεις που θεσπίζει η ΕΕ.

Αναλυτικά, παρουσιάζονται παρακάτω πληροφορίες σχετικά με κάποιες από τις σημαντικότερες πολιτικές ποιότητας του αέρα που είχε ήδη εφαρμόσει η Γερμανία ή σχεδίαζε να εφαρμόσει στο άμεσο μέλλον:

- Ζώνες Χαμηλών Εκπομπών αποκλείουν οχήματα που δε φέρουν πρότυπα χαμηλών εκπομπών, από περιοχές εντός της ζώνης.
- Ένα μεγάλο μέρος της μείωσης των εκπομπών, που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων της ΕΕ στη Γερμανία, προγραμματίστηκε να επιτευχθεί με την εφαρμογή της οδηγίας της ΕΕ για τις βιομηχανικές εκπομπές. Στόχος της οδηγίας, ήταν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, μειώνοντας τις επιβλαβείς βιομηχανικές εκπομπές σε ολόκληρη την ΕΕ, ιδίως μέσω της καλύτερης εφαρμογής των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών.
- Η Γερμανία παρέχει πολιτικές για την προώθηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που καλύπτουν προγράμματα κατάρτισης, πιστοποίησης και έρευνας, αυτο-δέσμευση δημόσιων αρχών, υποστήριξη δικτύων τηλεθέρμανσης (district heating networks) και καθιέρωση υποχρεώσεων οικοδόμησης, όσον αφορά τη χρήση θερμότητας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Τα πρότυπα εκπομπών 2000/2005, συνοδεύτηκαν από την εισαγωγή αυστηρότερων κανονισμών για τα καύσιμα, που απαιτούν τα καύσιμα diesel και βενζίνης χωρίς θείο, να είναι υποχρεωτικά από το 2009.
- Όλα τα οχήματα χρησιμοποιούν βενζίνη χωρίς μόλυβδο.

### 2.5.3 Πολιτικές ποιότητας του αέρα του Ηνωμένου Βασιλείου

Το Ηνωμένο Βασίλειο (ΗΒ) αποτέλεσε τον ηγέτη της εφαρμογής συστημάτων διαχείρισης της ποιότητας του αέρα, με την εισαγωγή του Alkali, &c. Works Regulation Act, του 1906 [13]. Ωστόσο, στην εποχή μας τα πράγματα δείχνουν ότι διαφέρουν, καθώς σύμφωνα με τον Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος του ΗΒ [14], η κυβέρνηση του ΗΒ έχει κατηγορηθεί για παραβίαση της οδηγίας σχετικά με την ποιότητα του αέρα της ΕΕ και έχει, επανειλημμένως, παραπεμφθεί στο δικαστήριο από την ομάδα ClientEarth, για την αποτυχία συμμόρφωσής της με την παραπάνω οδηγία, καθώς και για την αποτυχία εκπόνησης κατάλληλου εθνικού σχεδίου για τη μείωση της ρύπανσης του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Η μόλυνση του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί ένα μεγάλο πλήγμα τόσο για την ποιότητα ζωής των πολιτών του ΗΒ, μειώνοντας το προσδόκιμο ζωής, προκαλώντας ασθένειες και πρόωρους θανάτους, όσο και για την οικονομία του, κοστίζοντάς του πάνω από 20 δισεκατομμύρια λίρες Αγγλίας, ετησίως.

Αναλυτικά, παρουσιάζονται παρακάτω ορισμένες από τις σημαντικότερες πολιτικές της ποιότητας του αέρα του Ηνωμένου Βασιλείου:

- Το τέταρτο μέρος του Περιβαλλοντικού Νόμου 1995 (Environment Act 1995), που καλύπτει την Αγγλία, τη Σκωτία και την Ουαλία, καθώς και το Περιβαλλοντικό Διάταγμα 2002 (Environment Order 2002, Βόρεια Ιρλανδία), απαιτούν από όλες τις τοπικές αρχές του ΗΒ, να επανεξετάσουν και να αξιολογήσουν την ποιότητα του αέρα της περιοχής τους. Στην περίπτωση που κάποια πρότυπα υπερβαίνονται ή είναι απίθανο να τηρηθούν έως μία καταληκτική ημερομηνία, τότε η συγκεκριμένη περιοχή πρέπει να οριστεί ως περιοχή διαχείρισης ποιότητας του αέρα (Air Quality Management Area - AQMA) και η τοπική αρχή πρέπει να εκπονήσει και να εφαρμόσει ένα σχέδιο δράσης, με στόχο τη μείωση των επιπέδων ρύπων.
- Το Δεκέμβριο του 2015, η κυβέρνηση ξεκίνησε μια τρίτη διαβούλευση για τη τοπική διαχείριση της ποιότητας του αέρα, στοχεύοντας στον εξορθολογισμό της αναφοράς, στην εισαγωγή ουσιαστικού ρόλου των τοπικών αρχών στη μείωση των εκπομπών PM<sub>2,5</sub>, και στην

αποσαφήνιση ρόλων και ευθυνών. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος του ΗΒ, υπήρξαν ορισμένες τοποθεσίες, όπου η καθοδήγηση θα μπορούσε να ενισχυθεί, προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματικότερη δράση και πιο γρήγορη συμμόρφωση με τους εθνικούς στόχους και τη σχετική οδηγία της ΕΕ.

- Κανονισμοί Road Traff 2002 και 2003, σχετικά με τις εκπομπές οχημάτων σε Αγγλία, Σκωτία και Ουαλία: Εφόσον μία περιοχή δηλωθεί ως AQMA, οι τοπικές αρχές έχουν το δικαίωμα να υποβάλλουν αίτηση για εξουσίες, που θα πραγματοποιήσουν δοκιμές εκπομπών στην άκρη του δρόμου (roadside). Στην περίπτωση που κάποιο όχημα περάσει από μία τέτοια περιοχή και θεωρηθεί πως διαπράττει κάποιο αδίκημα, σε σχέση με τις εκπομπές ρύπων του, μπορεί να εκδοθεί ποινή 60 λιρών Αγγλίας.
- Σύμφωνα με τον Νόμο Καθαρού Αέρα (Clean Air Act) 1993, οι τοπικές αρχές μπορούν να δηλώσουν ολόκληρη ή μέρος της περιοχής τους, ως ζώνη ελέγχου καπνού. Αυτό σημαίνει πως αποτελεί αδίκημα η πρόκληση καπνού από οποιαδήποτε καμινάδα, και επίσης για οποιοδήποτε άτομο ή εταιρεία να αποκτήσει ή να παραδώσει μη εξουσιοδοτημένο καύσιμο σε ένα κτήριο, εκτός και αν η συσκευή που χρησιμοποιείται (π.χ. για λόγους θέρμανσης ή μαγειρικής) εξαιρείται. Ο κοινός ασφαλτικός άνθρακας και το ξύλο, δεν αποτελούν εγκεκριμένα καύσιμα. Περίπου το 50% των νοικοκυριών ζουν σε περιοχές ελέγχου καπνού, και όσα από αυτά χρησιμοποιούν στερεό καύσιμο, πρέπει να διασφαλίζουν ότι αυτό είναι εγκεκριμένο, χωρίς καπνό και/ή μία εξαιρούμενη συσκευή.

### 2.5.4 Πολιτικές ποιότητας του αέρα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής

Οι ΗΠΑ έχουν μακρά ιστορία νομοθεσίας για την προστασία της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και αποτέλεσαν παγκόσμιο ηγέτη, μαζί με την ΕΕ, όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων ρύπανσής του. Το ψήφισμα της πρώτης πράξης, σχετικά με την ποιότητα του αέρα στις ΗΠΑ, προέκυψε από ένα γεγονός του 1948. Εκείνη τη χρονιά, ένα σύννεφο ρύπων (αιθαλομίχλη) επικράτησε στη βιομηχανική πόλη Donora της Pennsylvania, για πέντε ημέρες. Αυτή η αιθαλομίχλη ήταν υπεύθυνη για το θάνατο είκοσι ατόμων, ενώ συμπτώματα νόσου εκδηλώθηκαν σε περισσότερους από έξι χιλιάδες ανθρώπους [13].

Σύμφωνα με τον Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency – EPA) των ΗΠΑ [15], παρακάτω παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με κάποιες από τις σημαντικότερες πολιτικές ποιότητας του αέρα των ΗΠΑ:

- Το 1990, το Κογκρέσο ψήφισε το Νόμο για την Πρόληψη της Ρύπανσης (Pollution Prevention Act – P2), ο οποίος αναφέρει ότι ο EPA είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή του. Η πρόληψη της ρύπανσης μειώνει ή εξαλείφει τα απόβλητα στην πηγή τους, τροποποιώντας τις διαδικασίες παραγωγής, προωθώντας τη χρήση μη τοξικών ή λιγότερο τοξικών ουσιών, εφαρμόζοντας τεχνικές συντήρησης, και επαναχρησιμοποιώντας υλικά, έναντι της αποδέσμευσής τους στη ροή αποβλήτων. Οι ιδιοκτήτες και οι υπεύθυνοι επιχειρήσεων που υποχρεούνται να υποβάλλουν μία φόρμα απελευθέρωσης τοξικών χημικών, πρέπει να περιλαμβάνουν μία έκθεση τοξικής μείωσης και ανακύκλωσης.
- Σύμφωνα με τον Νόμο Καθαρού Αέρα (Clean Air Act), ενθαρρύνεται η συνεργασία μεταξύ ομοσπονδιακών υπηρεσιών, πολιτειών και τοπικών κυβερνήσεων, για την πρόληψη και τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ενώ ο EPA είναι υποχρεωμένος να δημιουργήσει ένα εθνικό πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης, για την πρόληψη και τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής

ρύπανσης. Μεταξύ άλλων, θεσπίστηκε ένα σχέδιο που περιλαμβάνει περιορισμούς εκπομπών για την προστασία της δημόσιας ευημερίας και του περιβάλλοντος.

- Όσον αφορά τον Εθνικό Νόμο για την Περιβαλλοντική Πολιτική (National Environmental Policy Act – NEPA), το Κογκρέσο αναγνωρίζει τη βαθιά επίδραση της δραστηριότητας του ανθρώπου στις σχέσεις όλων των συστατικών του φυσικού περιβάλλοντος. Ο EPA έχει λάβει την εντολή να διεξάγει επιμορφωτικές εκδηλώσεις τεχνολογιών ελέγχου της ρύπανσης, που σχετίζονται με την ενέργεια. Μεταξύ άλλων, παρέχετε τεχνική υποστήριξη στις ινδικές φυλές για περιβαλλοντική βοήθεια σε ινδικά εδάφη.

Όσον αφορά την περιοχή της νότιας Καλιφόρνιας, αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με μία μελέτη του 2015, που διεξήχθη από ερευνητές του University of Southern California [16], τα τελευταία είκοσι χρόνια, δηλαδή το διάστημα 1995-2015, υπήρξαν δραματικές βελτιώσεις στην περιφερειακή ποιότητα του αέρα, σε όλη τη νότια Καλιφόρνια. Αρκετοί βασικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι, που παρακολουθούνται από τον EPA των ΗΠΑ, μειώθηκαν δραματικά, στις εξωτερικές τους συγκεντρώσεις, μεταξύ 1994 και 2011. Το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), μειώθηκε από 28% έως 53% σε κοινότητες, από την κομητεία San Luis Obispo, έως την κομητεία San Diego. Η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων μειώθηκε από 13% έως 54% σε παρόμοιο εύρος κοινοτήτων και περιοχών. Οι αλλαγές στη συγκέντρωση όζοντος ( $\text{O}_3$ ) ήταν λιγότερο έντονες, βελτιώνοντας την κατάσταση σε ποσοστό 12% με 27%, ανάλογα με την κοινότητα. Από τη δεκαετία του 1990, οι ρυθμιστικές αρχές έθεσαν σε εφαρμογή εκατοντάδες πολιτικές και προγράμματα ρύπανσης. Τα πιο αποτελεσματικά συλλογικά προγράμματα, περιλάμβαναν προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών ρύπων στους δρόμους, καθώς η κυκλοφορία οχημάτων στη νότια Καλιφόρνια είναι πολύ υψηλή (περισσότερα από δεκατρία εκατομμύρια αυτοκίνητα κυκλοφορούσαν στην κομητεία του Los Angeles το 2015).

## 2.6 Ευρωπαϊκή πολιτική ποιότητας του αέρα

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, η ΕΕ εργάζεται για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα ελέγχοντας τις εκπομπές επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα, βελτιώνοντας την ποιότητα των καυσίμων και ενσωματώνοντας τις απαιτήσεις προστασίας του περιβάλλοντος στους τομείς των μεταφορών και της ενέργειας [17]. Η κακή ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί την νούμερο ένα αιτία πρόωρων θανάτων στην Ευρώπη, με περισσότερους από 390.000 πρόωρους θανάτους κάθε χρόνο, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζει την ποιότητα ζωής των πολιτών, γενικότερα, προκαλώντας επιδείνωση του άσθματος και των αναπνευστικών προβλημάτων. Εξαιτίας των παραπάνω, δημιουργούνται υψηλά κόστη στον τομέα της υγείας και απώλεια ημερών εργασίας. Ακόμη, καταστρέφονται οικοσυστήματα εξαιτίας της υπερβολικής ρύπανσης αζώτου (ευτροφισμός) και της όξινης βροχής. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω, η ΕΕ έχει θέσει ως στόχο να επιτύχει επίπεδα ποιότητας αέρα που δεν προκαλούν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις και κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τα κράτη μέλη της ΕΕ, συμμετείχαν ενεργά στις εργασίες σχετικά με το ψήφισμα UNEP/EA.3/Res.8 (Δεκέμβριος 2017), σχετικά με την πρόληψη και τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα παγκοσμίως. Στο πλαίσιο του περιβαλλοντικού προγράμματος των Ηνωμένων Εθνών, η Σύμβαση της Στοκχόλμης για τους έμμοιους οργανικούς ρύπους, που εγκρίθηκε στις 22 Μαΐου 2001, παρέχει επίσης ένα συμπληρωματικό διεθνές πλαίσιο, σχετικό με την ποιότητα του αέρα της ΕΕ.

Στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών, που συμπεριλαμβάνουν τη διαφύλαξη της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ουσιαστική μείωση του αριθμού των θανάτων και των ασθενειών, που προέρχονται από επικίνδυνα χημικά, τη ρύπανση και τη μόλυνση του αέρα, των υδάτων και του εδάφους, έως το 2030.
- Μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πόλεων κατά κεφαλήν, συμπεριλαμβανομένης της ιδιαίτερης προσοχής στην ποιότητα του αέρα και στη διαχείριση των αστικών και άλλων αποβλήτων, έως το 2030.
- Επίτευξη ορθής περιβαλλοντικής διαχείρισης των χημικών ουσιών, και όλων των αποβλήτων καθόλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, σύμφωνα με τα συμφωνημένα διεθνή πλαίσια, και σημαντική μείωση της απελευθέρωσής τους στον αέρα, το νερό και το έδαφος, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Το Δεκέμβριο του 2013, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε ένα πακέτο πολιτικών Καθαρού Αέρα, το οποίο βασίστηκε σε μία εκτενή αναθεώρηση της πολιτικής αέρα της ΕΕ που ίσχυε έως τότε. Το συγκεκριμένο πακέτο πολιτικών, περιλαμβάνει ένα Πρόγραμμα Καθαρού Αέρα για την Ευρώπη, καθώς και μία πρόταση οδηγιών τόσο για τη μείωση των εθνικών εκπομπών ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων (οδηγία NEC), όσο και για τον περιορισμό των εκπομπών ορισμένων ρύπων στον αέρα από μονάδες μέσης καύσης (οδηγία MCP) [18]. Ακόμη, το έβδομο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον [19], που είναι σε ισχύ από το 2013, και αποτελεί το συμφωνημένο πλαίσιο για τη δημιουργία περιβαλλοντικής πολιτικής της ΕΕ, έως τις 31 Δεκεμβρίου του 2020, υπήρξε ένα σημαντικό εργαλείο διακυβέρνησης, με ένα χρήσιμο και σχετικό όραμα του έτους 2050, για την καθοδήγηση της περιβαλλοντικής πολιτικής σε ολόκληρη την ΕΕ. Προσδιορίζει τρεις βασικούς στόχους, προστασίας, διατήρησης και ενίσχυσης του φυσικού κεφαλαίου της Ένωσης, μετατροπής της Ένωσης σε μία ανταγωνιστική, πράσινη οικονομία χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και αποδοτικής από πλευράς πόρων και, τέλος, προστασίας των πολιτών της από περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και κινδύνους υγείας και ευημερίας που μπορεί να προκύψουν.

Οι παραπάνω στόχοι θα μπορέσουν να επιτευχθούν με τη βοήθεια τεσσάρων παραγόντων:

- Καλύτερης εφαρμογής της νομοθεσίας
- Καλύτερης πληροφόρησης, χάρη στη βελτίωση του γνωστικού υποβάθρου
- Περισσότερων και πιο σοφών επενδύσεων για το περιβάλλον και την πολιτική του κλίματος
- Πλήρους ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών απαιτήσεων και εκτιμήσεων σε άλλες πολιτικές

### 2.7 Πολιτικές ποιότητας του αέρα της Ελλάδας

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη έρευνα των Ηνωμένων Εθνών [20], που διεξήχθη το 2015, η Ελλάδα, με βασικά σημεία αναφοράς την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, αντιμετώπιζε προβλήματα όσον αφορά τη μόλυνση του ατμοσφαιρικού της αέρα. Η ύπαρξη σκόνης, προερχόμενης από την έρημο Σαχάρα, συμβάλλει αρνητικά στη συσσώρευση αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Έμφαση δίνεται στην Αθήνα, όπου ο συνδυασμός του μεγάλου πληθυσμού, πολλών οικονομικών δραστηριοτήτων και η έντονη ηλιοφάνεια που επικρατεί, συμβάλλει στα υψηλά επίπεδα φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ακόμη, γίνεται αναφορά στην οικονομική κρίση που πέρασε η χώρα μας, και στον αντίκτυπο που είχε στο κομμάτι της ποιότητας του ατμοσφαιρικού της αέρα,

σημειώνοντας πολύ υψηλά επίπεδα ρύπανσης, με τη ρύπανση της πόλης της Αθήνας να βρίσκεται δεκαπέντε φορές υψηλότερα, σε σχέση με τα επιτρεπτά όρια που συμβουλεύει η ΕΕ. Συγκεκριμένα, σημειώνεται το γεγονός αυξημένης καύσης ξύλου για οικιακή θέρμανση, φαινόμενο που αποτέλεσε την κύρια πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Παρόλα αυτά σήμερα, δεδομένου της σταδιακής ανόδου της οικονομίας της χώρας μας και της εξόδου της από την κρίση, πιθανότατα, η παραπάνω κατάσταση να μην υφίσταται στον ίδιο βαθμό.

Σε κάθε περίπτωση, η ποιότητα του αέρα της Ελλάδας, μετράται από ένα εξελιγμένο, εθνικό δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, εφαρμόζοντας τις σχετικές οδηγίες της ΕΕ. Παρακάτω, παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με την προσέγγιση και τις πολιτικές ποιότητας του αέρα που εφάρμοσε η Ελλάδα, έως το 2015:

- Η ελληνική νομοθεσία για την ατμοσφαιρική ρύπανση, συμμορφώνεται πλήρως με τις απαιτήσεις της ΕΕ. Σε γενικά πλαίσια, ο έλεγχος των ατμοσφαιρικών ρύπων και η διαχείριση της ποιότητας του αέρα, είναι ίδιοι με την πρακτική της ΕΕ.
- Σύμφωνα με την οδηγία βιομηχανικών εκπομπών (Industrial Emissions Directive), που εκδόθηκε στις 21 Δεκεμβρίου του 2007, πραγματοποιείται ρύθμιση των επιβλαβών βιομηχανικών εκπομπών σε ολόκληρη την ΕΕ, με σκοπό την επίτευξη σημαντικών οφελών για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα του εισπνεόμενου αέρα, η ΕΕ καθορίζει οριακές τιμές για τη συγκέντρωση κάθε ξεχωριστού ρύπου, οι οποίες δεν πρέπει να ξεπεραστούν σε μία δεδομένη χρονική περίοδο.
- Η πολιτική για την ανανεώσιμη ενέργεια της Ελλάδας καθοδηγείται, επίσης, από τις απαιτήσεις της ΕΕ. Οι μη δεσμευτικοί στόχοι του 2010 για τα βιοκαύσιμα και την ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αντικαταστάθηκαν από έναν δεσμευτικό στόχο για αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας έως το 2020. Σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK9, η Ελλάδα θα πρέπει να αυξήσει αυτό το μερίδιο από 6,9% το 2005, σε 18% το 2020.
- Τα πρότυπα εκπομπών ρύπων που ισχύουν για τα οχήματα, αντιστοιχούν στην κατηγορία Euro 6 για τα πρότυπα LDV (Light Duty Vehicles) και HDV (Heavy Duty Vehicles). Οι κανονισμοί της ΕΕ εισάγουν διαφορετικά όρια εκπομπών για οχήματα ανάφλεξης με συμπίεση (diesel) και θετικής ανάφλεξης (βενζίνη, NG, LPG, αιθανόλη, κλπ.). Τα οχήματα diesel έχουν αυστηρότερα πρότυπα μονοξειδίου του άνθρακα (CO), ωστόσο επιτρέπονται υψηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Από την άλλη, τα οχήματα θετικής ανάφλεξης έως και της κατηγορίας Euro 4, εξαιρέθηκαν από τα πρότυπα αιωρούμενων σωματιδίων. Οι κανονισμοί Euro 5 και 6, εισήγαγαν αντίστοιχα πρότυπα εκπομπών μάζας αιωρούμενων σωματιδίων, με αυτά των οχημάτων diesel, για τα οχήματα θετικής ανάφλεξης με κινητήρες άμεσου ψεκασμού.
- Τα πρότυπα εκπομπών 2000/2005, εισήγαγαν αυστηρότερους κανονισμούς καυσίμων, που απαιτούν καύσιμα diesel και βενζίνης χωρίς θείο, υποχρεωτικά, από το 2009.
- Όλα τα οχήματα χρησιμοποιούν βενζίνη χωρίς μόλυβδο.

Ακόμη, σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) της Ελλάδας [21], η διασφάλιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος, απαιτεί τη συστηματική παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Έτσι, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά το πρόβλημα νέφους, που θα λέγαμε ότι παρατηρείται όταν η ατμοσφαιρική ρύπανση αγγίζει επίπεδα που μπορεί να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες συνθήκες

διαβίωσης, το ΥΠΕΚΑ εγκατέστησε το 2001 το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), επεκτείνοντας και αναβαθμίζοντας το προϋπάρχον δίκτυο του λεκανοπεδίου Αθηνών. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της ποιότητας του αέρα για όλη τη χώρα, στο πλαίσιο του έργου «Επικαιροποίηση της χαρτογραφικής απεικόνισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μέσω της καταγραφής ατμοσφαιρικών εκπομπών των πηγών και ανάπτυξης κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου», ενταγμένου στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη, του ΕΣΠΑ.

Τέλος, αξίζει να αναφερθούμε στον Πράσινο Δακτύλιο, που τέθηκε σε εφαρμογή στις 3/9/2012 με την υπουργική απόφαση ΚΥΑ 16229, ΦΕΚ 1467 3/5/2012. Σκοπός του ήταν, και είναι, να περιοριστούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, με προφανή περιβαλλοντικά οφέλη, και να συμβάλλει σημαντικά στην αποσυμφόρηση του κέντρου της Αθήνας. Αναλυτικά τα βασικά μέτρα που υλοποιούνται βάσει της εν λόγω απόφασης, παρουσιάζονται παρακάτω [22]:

- Ισχύει κανονικά, χωρίς καμία αλλαγή, η εκ περιτροπής είσοδος των Ι.Χ. οχημάτων στο μικρό δακτύλιο (με το σύστημα «μονών – ζυγών»).
- Επιτρέπεται η κυκλοφορία στο μικρό δακτύλιο, χωρίς περιορισμό των Ι.Χ. αυτοκινήτων και των φορτηγών οχημάτων κάτω των 2,2 τόνων, εφόσον είναι τεχνολογίας Euro 5 ή μεταγενέστερης (είτε είναι απλά είτε υβριδικά) και εφόσον εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα λιγότερο από 140g/km. Ειδικά για τα υβριδικά και για τα οχήματα αερίου καυσίμου εκ κατασκευής, επιτρέπεται η κυκλοφορία και αυτών που είναι τεχνολογίας Euro 4, εφόσον εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα λιγότερο από 140g/km.
- Απαγορεύεται η κυκλοφορία στο μεγάλο δακτύλιο των λεωφορείων και των φορτηγών άνω των 2,2 τόνων, πρώτης άδειας κυκλοφορίας στην Ελλάδα πριν από την 1 Ιανουαρίου 1990. Για μια μεταβατική περίοδο ενός έτους (από 1.1.12 έως 1.1.13) η προαναφερθείσα απαγόρευση εφαρμόστηκε για τα ανωτέρω οχήματα πρώτης άδειας κυκλοφορίας στην Ελλάδα πριν από την 1/1/1984. Στην απαγόρευση αυτή δεν περιλαμβάνονται η Νέα Εθνική Οδός Αθηνών – Λαμίας, η Λεωφόρος Κηφισού και η Λεωφόρος Αθηνών, από την Λεωφόρο Κηφισού και δυτικότερα.
- Η ημερομηνία της 1 Ιανουαρίου 1990 προσαυξάνεται αυτόματα κατά ένα έτος, κάθε νέο ημερολογιακό έτος, έτσι ώστε κάθε φορά να απαγορεύονται τα οχήματα που είναι παλαιότερα των 22 ετών.

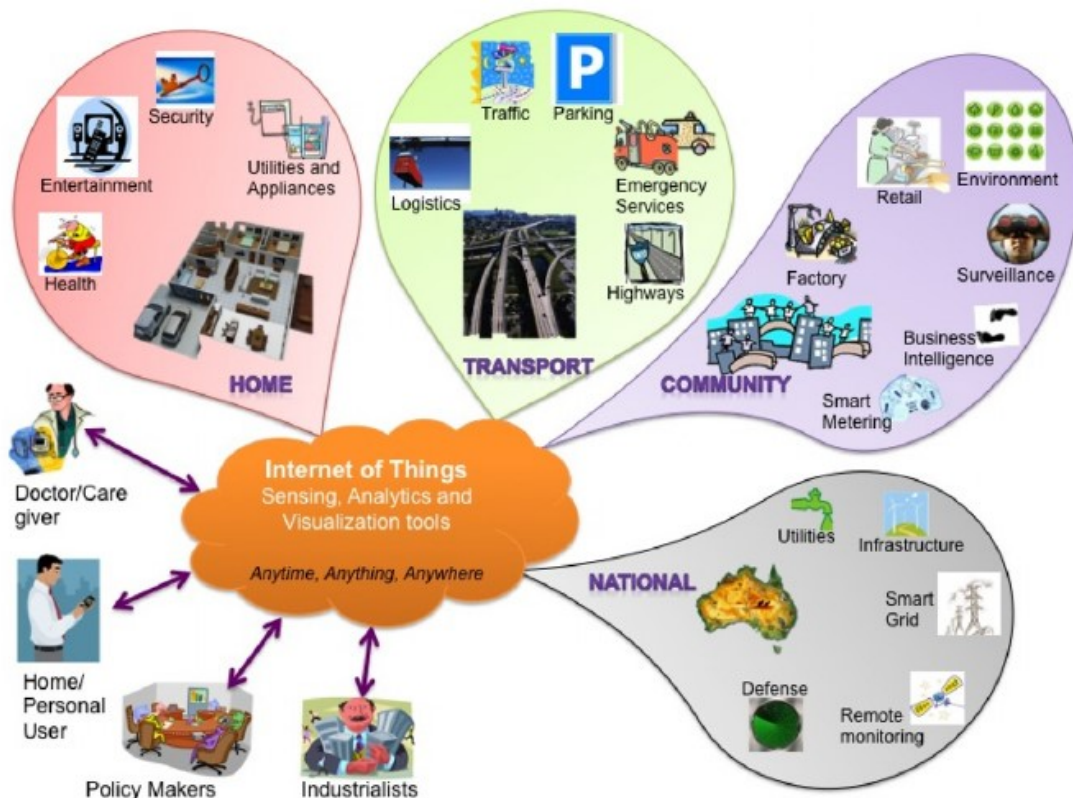
### 2.8 Επίλογος

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι, που μειώνουν σημαντικά την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα που αναπνέουμε, καθώς και οι επιπτώσεις που αυτοί προξενούν στην υγεία των ανθρώπων, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, σύμφωνα με στατιστικές μελέτες και έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο. Στη συνέχεια, έγινε αναφορά στον δείκτη ποιότητας του αέρα, και στη σημασία του για την ανάγκη ενημέρωσης των πολιτών για την τρέχουσα ποιότητα του αέρα που αναπνέουν, με απλό και εύληπτο τρόπο. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη και αναφορά σχετικών κρατικών πολιτικών αέρα που εφαρμόζονται ανά τον κόσμο, με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και της υγείας και της ευημερίας όλων των έμβιων οργανισμών. Την ίδια στιγμή, δόθηκε έμφαση στις πολιτικές αέρα της ΕΕ και της χώρας μας.

## Κεφάλαιο 3ο: ΔτΠ και παρακολούθηση της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών

### 3.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, οι ρυθμοί της καθημερινότητας ολοένα και αυξάνονται, περισσότερες «έξυπνες» συσκευές συνδέονται μεταξύ τους, μέσω του Διαδικτύου, υλοποιώντας εφαρμογές υψηλού επιπέδου, ικανές να οργανώνουν και να αυτοματοποιούν πολλές καθημερινές μας δραστηριότητες, με σκοπό τη μείωση του χαμένου μας χρόνου και τη βελτίωση της παραγωγικότητάς μας. Σύμφωνα με το IERC (European Research Cluster on the Internet of Things) το Internet of Things (IoT), ή αλλιώς Διαδίκτυο των Πραγμάτων (ΔτΠ), ορίζεται ως μία δυναμική, παγκόσμια υποδομή δικτύου, προσαρμοσίμων και διαλειτουργικών συσκευών, ενσωματωμένων σε ένα κοινό δίκτυο πληροφοριών και επικοινωνιών [23]. Το ΔτΠ αναγνωρίζεται ως ένα φλέγον θέμα της εποχής μας, καθώς επίσης αποτελεί ένα σημαντικό στόχο του επιστημονικού κόσμου για το μέλλον της τεχνολογίας και πόλο έλξης πολλών βιομηχανιών. Τόσο στους τομείς της υγείας, της γεωργίας, της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (global warming), της ψυχαγωγίας, του εμπορίου, καθώς και στον τομέα της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και πολλών άλλων, το ΔτΠ προσφέρει έγκαιρες και έγκυρες λύσεις βελτίωσης της απόδοσής τους, καθώς και πρόληψης ανεπιθύμητων γεγονότων, όπως για παράδειγμα πυρκαγιών, μόλυνσης του περιβάλλοντος, ατυχημάτων κλπ. [23].



Σχήμα 3.1: Τελικοί χρήστες του ΔτΠ και περιοχές εφαρμογών βάσει του είδους δεδομένων παρακολούθησης [24]

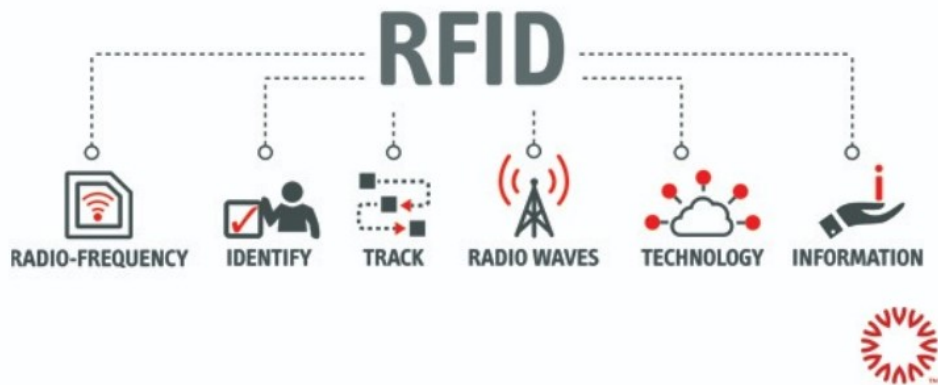
Η χρήση τεχνολογιών ΔτΠ, προσφέρει νέες δυνατότητες και προσεγγίσεις επίλυσης καθημερινών προβλημάτων, προσελκύνοντας μεγάλο ενδιαφέρον από τον επιχειρηματικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, οι παγκόσμιες δαπάνες για το ΔτΠ, προβλέπεται να αγγίξουν τα 1,1 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2022, ενώ νέες τεχνολογίες επικοινωνιών, όπως το 5G, αναμένεται να παίξουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη της αγοράς τα επόμενα χρόνια [25]. Ωστόσο, παρά τα πολυάριθμα θετικά χαρακτηριστικά του ΔτΠ, παράλληλα υπάρχουν ορισμένα αδύναμα σημεία, ασφάλειας και ιδιωτικότητας, στα οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση, προκειμένου ο σχεδιασμός κάθε υλοποίησης να εμπεριέχει μηχανισμούς που να διασφαλίζουν την ακεραιότητα των παραπάνω παραγόντων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζονται σύντομα οι βασικές τεχνολογίες του ΔτΠ, χρήσιμοι και ευρέως γνωστοί αισθητήρες μέτρησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών, χαμηλού κόστους, σε συνδυασμό με τεχνολογίες υλικού (hardware) και πλατφόρμες νέφους (cloud) του ΔτΠ. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο κομμάτι της επεξεργασίας δεδομένων σε επίπεδο άκρων (edge) και cloud, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος, περιγράφονται μέθοδοι και τεχνικές πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα, με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης.

### 3.2 Βασικές τεχνολογίες του ΔτΠ

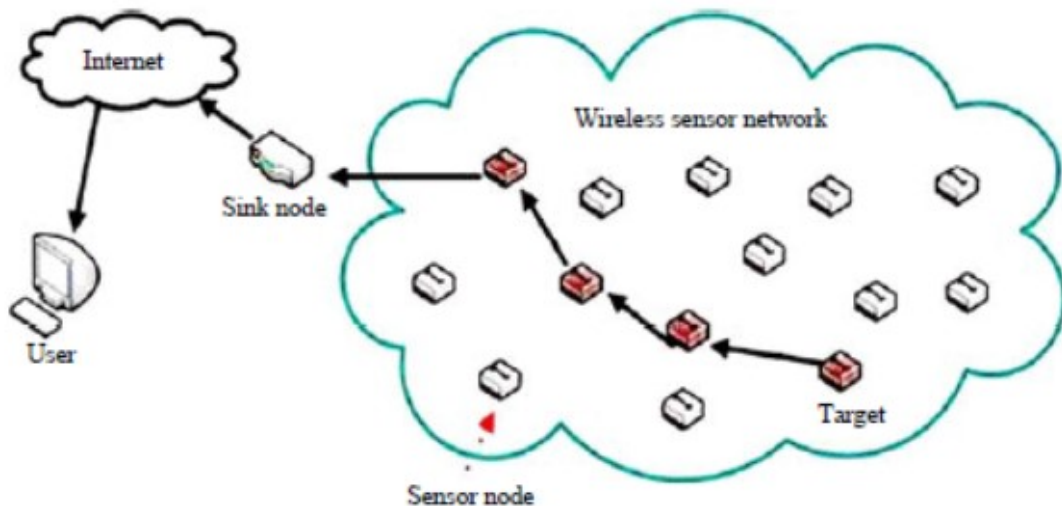
Για την ανάπτυξη επιτυχημένων προϊόντων και υπηρεσιών που βασίζονται στο ΔτΠ, σε ευρεία κλίμακα, χρησιμοποιούνται κυρίως οι παρακάτω πέντε τεχνολογίες:

- Αναγνώριση μέσω Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification – RFID) [26]: Η τεχνολογία RFID επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση και λήψη δεδομένων, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα, μία ετικέτα (tag) και έναν αναγνώστη (reader). Η ετικέτα μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερα δεδομένα, συγκριτικά με την παραδοσιακή χρήση των barcodes. Τα παραπάνω δεδομένα έχουν τη μορφή Ηλεκτρονικού Κώδικα Προϊόντος (Electronic Product Code - EPC), που αποτελεί ένα παγκόσμιο σύστημα αναγνώρισης στοιχείων βασισμένο σε RFID, ανεπτυγμένο από το Κέντρο Αυτόματης Αναγνώρισης (Auto-ID Center). Οι ετικέτες RFID χωρίζονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους, παθητικών, ημι-παθητικών και ενεργών ετικετών. Οι παθητικές ετικέτες RFID βασίζονται στην ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων που μεταφέρεται από τον αναγνώστη στην ετικέτα, προς τροφοδοσία της μπαταρίας της. Εφαρμογές των παραπάνω, μπορούν να βρεθούν σε αλυσίδες εφοδιασμού, διαβατήρια, ηλεκτρονικά δίοδια και παρακολούθηση σε επίπεδο αντικειμένων. Οι ημι-παθητικές ετικέτες RFID, χρησιμοποιούν μπαταρίες για την τροφοδοσία του μικροτσίπ τους, ενώ παράλληλα επικοινωνούν, αντλώντας ενέργεια από τον αναγνώστη. Τέλος, οι ενεργές ετικέτες RFID έχουν τη δική τους τροφοδοσία ενέργειας και μπορούν να εκκινήσουν την επικοινωνία μεταξύ του εαυτού τους και ενός αναγνώστη. Ακόμη, μπορούν να περιέχουν εξωτερικούς αισθητήρες για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της πίεσης, διάφορων χημικών ουσιών και άλλων συνθηκών. Χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, σε νοσοκομειακά εργαστήρια και στη διαχείριση απομακρυσμένων αισθητήρων. Λογικό συμπέρασμα αποτελεί το γεγονός ότι οι ενεργές και οι ημι-παθητικές ετικέτες RFID, κοστίζουν περισσότερο από τις παθητικές ετικέτες [26].



Σχήμα 3.2: Τεχνολογία RFID [27]

- Δίκτυα Ασύρματων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs) [26]: Τα WSNs αποτελούνται από χωρικά κατανεμημένες, αυτόνομες συσκευές με αισθητήρα για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντικών συνθηκών. Όταν συνεργάζονται με συστήματα RFID, πετυχαίνουν καλύτερη παρακολούθηση της κατάστασης των «πραγμάτων» (things), όπως τη γεωγραφική τους θέση, της θερμοκρασίας και των κινήσεών τους. Κυρίως τα WSNs, έχουν χρησιμοποιηθεί στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (cold chain logistics), όπου χρησιμοποιούνται θερμικές και ψυκτικές μέθοδοι συσκευασίας για τη μεταφορά ευαίσθητων, όσον αφορά τη θερμοκρασία, προϊόντων. Τέλος, τα WSNs, χρησιμοποιούνται επίσης σε συστήματα συντήρησης και παρακολούθησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής τους, αποτελεί η μελέτη περίπτωσης της αεροπορικής εταιρείας American Airlines, η οποία χρησιμοποιεί αισθητήρες για την καταγραφή δεδομένων μεγέθους τριάντα terabytes ανά πτήση, για υπηρεσίες, όπως η προληπτική συντήρηση (preventive maintenance) [26].



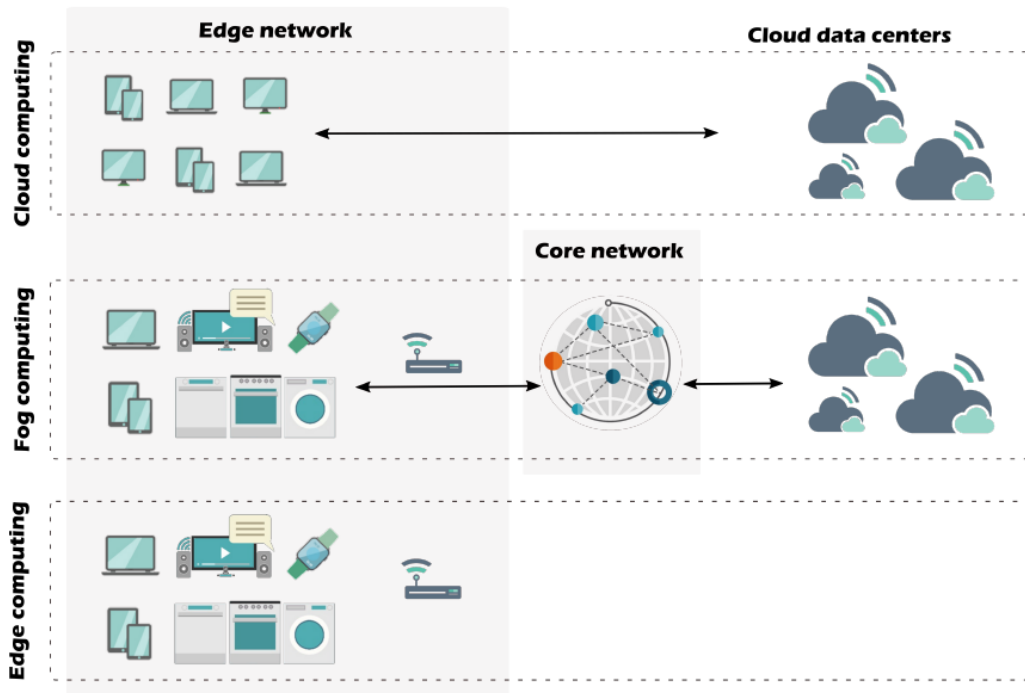
Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική WSN [28]

- **Middleware [26]:** Το middleware αποτελεί ένα επίπεδο λογισμικού που παρεμβαίνει μεταξύ εφαρμογών λογισμικού, με σκοπό να διευκολύνει τους προγραμματιστές λογισμικού να εκτελούν εργασίες επικοινωνίας και εργασίες εισόδου/εξόδου (input/output). Το χαρακτηριστικό, του middleware, απόκρυψης λεπτομερειών διαφόρων τεχνολογιών, είναι θεμελιώδες για τους προγραμματιστές ΔτΠ, ώστε να μην επιλέγουν υπηρεσίες λογισμικού που δε σχετίζονται άμεσα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή ΔτΠ που υλοποιούν. Οι περισσότερες αρχιτεκτονικές middleware για το ΔτΠ, ακολουθούν μία προσέγγιση προσανατολισμένη στις υπηρεσίες (service-oriented), προκειμένου να υποστηρίξουν μία άγνωστη και δυναμική τοπολογία δικτύου [26].
- **Υπολογιστική νέφους (cloud computing) [26]:** Το cloud computing είναι ένα μοντέλο πρόσβασης κατά απαίτηση, σε μία κοινόχρηστη ομάδα διαμορφώσιμων πόρων, όπως υπολογιστές, δίκτυα, διακομιστές και λογισμικό, που μπορούν να παρέχονται με τη μορφή Υποδομής ως Υπηρεσίας (Infrastructure as a Service - IaaS) ή με τη μορφή Λογισμικού ως Υπηρεσίας (Software as a Service - SaaS). Το cloud computing παρέχει μία ιδανική λύση χειρισμού και επεξεργασίας τεράστιων ροών δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο [26].
- **Εφαρμογές Λογισμικού ΔτΠ [26]:** Το ΔτΠ προάγει την ανάπτυξη χιλιάδων εφαρμογών ΔτΠ, τόσο σε επίπεδο βιομηχανίας όσο και σε επίπεδο εφαρμογών χρήστη. Συσκευές και δίκτυα, παρέχουν φυσική συνδεσιμότητα, ενώ εφαρμογές ΔτΠ δίνουν τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης, μεταξύ συσκευών, καθώς και αλληλεπίδρασης ανθρώπου με συσκευές, με αξιόπιστο τρόπο. Οι εφαρμογές ΔτΠ είναι σημαντικό να αναπτύσσονται με κάποιας μορφής νοημοσύνη, προκειμένου οι συσκευές να μπορούν να παρακολουθούν το περιβάλλον τους, να επικοινωνούν μεταξύ τους, να εντοπίζουν τυχόν προβλήματα και να τα επιλύουν, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Ακόμη, οι εφαρμογές ΔτΠ που παρουσιάζουν μία πληθώρα δεδομένων σε τελικούς χρήστες, είναι απαραίτητες, για την απεικόνιση πληροφοριών με εύκολο και κατανοητό τρόπο, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση του χρήστη με το περιβάλλον [26].

Όσον αφορά το cloud computing, τόσο η επεξεργασία όσο και η αποθήκευση δεδομένων πραγματοποιούνται, συνήθως, εντός των ορίων ενός cloud διακομιστή και της σχετικής υποδομής του. Καθώς δεν έχει σχεδιαστεί για να καλύπτει το εύρος γεωγραφικά διεσπαρμένων, ετερογενών τελικών σημείων (end points) και να υποστηρίζει τους μικρούς χρόνους καθυστέρησης που απαιτούνται σε πολλές περιπτώσεις χρήσεις του ΔτΠ, δύο δομές υπολογιστικής άκρων (edge computing) και υπολογιστικής ομίχλης (fog computing) χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων [29].

Το fog computing ορίζεται ως μία οριζόντια, φυσική ή εικονική δομή που βρίσκεται στο ενδιάμεσο «έξυπνων» τελικών συσκευών και παραδοσιακών κέντρων δεδομένων (data centers) ή cloud. Η συγκεκριμένη δομή, υποστηρίζει εφαρμογές κάθετα απομονωμένες και ευαίσθητες σε καθυστερήσεις, παρέχοντας ευρεία, επεκτάσιμη, χωρισμένη σε επίπεδα, ενοποιημένη και κατανοητή υπολογιστική, αποθήκευση και δικτυακή συνδεσιμότητα. Αντιθέτως, το edge computing υλοποιείται τοπικά στο επίπεδο δικτύου, που περιλαμβάνει τις «έξυπνες» τελικές συσκευές και τους χρήστες τους [29].

Συνοψίζοντας, τα edge computing και fog computing παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την επεξεργασία δεδομένων κοντά στην πηγή τους, μετριάζοντας ζητήματα καθυστέρησης που μπορεί να προκύψουν και μειώνοντας το κόστος μετάδοσης δεδομένων και συμφόρησης του δικτύου [29].



Σχήμα 3.4 Cloud, edge και fog computing [29]

### 3.3 Τεχνολογίες συνδεσιμότητας του ΔτΠ

Ένα εύρος πρωτοκόλλων και τεχνολογιών, επικοινωνίας και ανταλλαγής μηνυμάτων, χρησιμοποιείται για την υλοποίηση εφαρμογών ΔτΠ, βάσει αναγκών, σχεδιασμού και δυνατοτήτων κάθε εφαρμογής. Εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε εσωτερικούς χώρους, συνήθως επικοινωνούν τα μετρούμενα δεδομένα τους σε κοντινή απόσταση, χρησιμοποιώντας κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi (Wireless Fidelity), το Bluetooth ή το NFC (Near Field Communications), ενώ αντίστοιχα εφαρμογές εξωτερικών χώρων, όπου είναι κρίσιμη η ανάγκη αποστολής δεδομένων σε μακρινή απόσταση και η όσο το δυνατόν καλύτερη διατήρηση της ενεργειακής αυτονομίας των αισθητήρων, και του όποιου υλικού μέρους μίας εφαρμογής χρειάζεται να εγκατασταθεί σε κάποια δύσβατη ή απομακρυσμένη γεωγραφική τοποθεσία, χρησιμοποιούνται αντίστοιχα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το LoRa, το NB-IoT (Narrow-Band Internet of Things) ή το SigFox.

Βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται ευρέως στο ΔτΠ και θα συναντήσουμε στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 3.3.1 Wi-Fi

Το πρωτόκολλο Wi-Fi περιλαμβάνει τα πρότυπα IEEE 802.11 a/b/g/n/ac, για ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs). Επιτρέπει στους χρήστες να περιηγούνται στο διαδίκτυο με ταχύτητες ευρείας ζώνης, κάθε φορά που συνδέονται σε κάποιο σημείο πρόσβασης (access point) ή σε λειτουργία ad hoc (σετ ασύρματων σταθμών 802.11 που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, χωρίς να χρησιμοποιούν σημείο πρόσβασης ή οποιαδήποτε σύνδεση σε ενσύρματο δίκτυο [30]). Η αρχιτεκτονική IEEE 802.11, αποτελείται από έναν αριθμό στοιχείων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, για να παρέχουν ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο που υποστηρίζει κινητικότητα σταθμού, με διαφάνεια, στα ανώτερα επίπεδα [31]. Τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται τόσο σε επίπεδο οικιακής χρήσης, όσο και σε μεγάλες εταιρείες και πανεπιστημιακές, προσφέροντας από απλές λειτουργίες, όπως περιήγηση

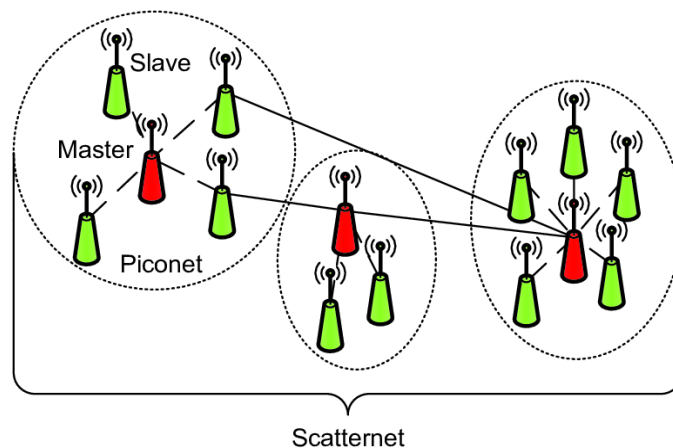
στο Διαδίκτυο και κοινή χρήση ομότιμων (peer-to-peer sharing), έως εφαρμογές που απαιτούν σύνδεση υψηλού εύρους ζώνης και σταθερότητας, όπως ροή πολυμέσων και τηλεδιάσκεψη πραγματικού χρόνου [32].



Σχήμα 3.5: Λογότυπο πρωτοκόλλου Wi-Fi [33]

### 3.3.2 Bluetooth

Το πρωτόκολλο Bluetooth, γνωστό επίσης ως IEEE 802.15.1, βασίζεται σε ένα ασύρματο ραδιοσύστημα σχεδιασμένο για συσκευές μικρής εμβέλειας και χαμηλού κόστους, προς αντικατάσταση καλωδίων περιφερειακών συσκευών (ποντίκια, πληκτρολόγια, χειριστήρια, εκτυπωτές και άλλα). Το συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών, είναι γνωστό ως Ασύρματο Προσωπικό Δίκτυο (Wireless Personal Area Network - WPAN) [31]. Ένας συνδυασμός συσκευών συνδεδεμένων μέσω Bluetooth σε λειτουργία ad-hoc, ονομάζεται piconet. Σε ένα piconet, μία συσκευή Bluetooth λειτουργεί ως «αφέντης» (master) και αποτελεί τη βασική συσκευή, ενώ οι άλλες συσκευές λειτουργούν ως «σκλάβοι» (slaves), και αποτελούν δευτερεύουσες συσκευές. Η επικοινωνία μεταξύ των piconets δημιουργεί ένα scatternet. Τα scatternets υφίστανται όταν μια συσκευή Bluetooth είναι slave σε ένα piconet και ταυτόχρονα master ή slave σε άλλο piconet. Η ανάπτυξη των εξελισσόμενων τεχνολογιών Bluetooth, οδήγησε στη δημιουργία νέων εκδόσεών του, με πιο πρόσφατη την 5.0. Η τελευταία έκδοση, χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ΔτΠ, αφού προσφέρει μεγαλύτερη εμβέλεια και ταχύτητα μετάδοσης, αύξηση της μέγιστης ισχύος μετάδοσης και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας [34].

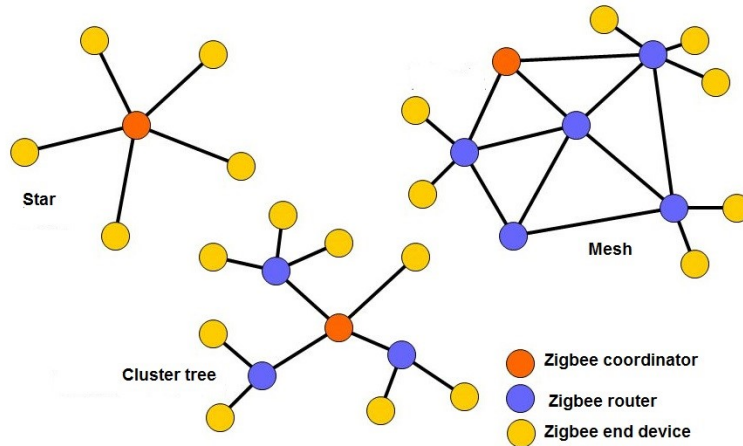


Σχήμα 3.6: Παράδειγμα δικτυακής τοπολογίας πρωτοκόλλου Bluetooth [35]

### 3.3.3 ZigBee

Το πρωτόκολλο ZigBee βασίζεται στο IEEE 802.15.4 και ορίζει τις προδιαγραφές ασύρματου προσωπικού δικτύου WPAN χαμηλού ρυθμού, για την υποστήριξη απλών συσκευών, που καταναλώνουν ελάχιστη ισχύ και συνήθως λειτουργούν σε μικρή εμβέλεια, εντός δέκα μέτρων, με μέγιστη εμβέλεια τα εκατό μέτρα. Το ZigBee παρέχει αυτό-οργανώμενη, πολλαπλών hops, καθώς και αξιόπιστη δικτύωση πλέγματος (mesh networking), με μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας, με αποτέλεσμα να προτιμάται συχνότερα σε εφαρμογές ΔτΠ, όπου η ενεργειακή αυτονομία του

συστήματος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Το πρωτόκολλο ενσωματώνει τεχνικές ευρέος φάσματος στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz, ενώ επιτυγχάνει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 250 Kb/s. Εκτός της δικτυακής τοπολογίας αστέρα (star) που υποστηρίζει το ZigBee, προβλέπει πιο περίπλοκες δομές δικτύου, συστάδας δέντρου (cluster tree) και δικτύου πλέγματος (mesh network) [31].



Σχήμα 3.7: Τοπολογίες του πρωτοκόλλου ZigBee [36]

### 3.3.4 NFC

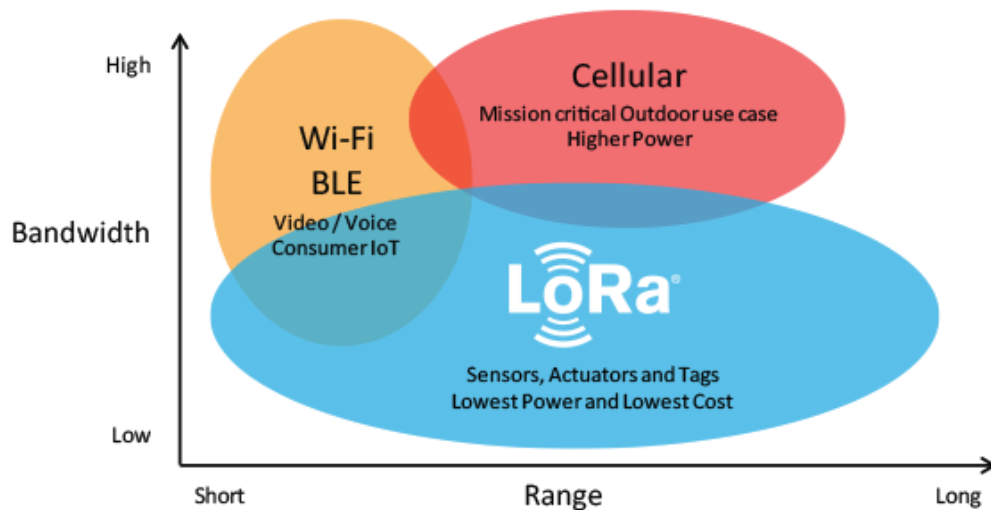
Το NFC είναι μια ασύρματη τεχνολογία που λειτουργεί σε μικρή απόσταση, από τέσσερα έως δέκα εκατοστά, για επικοινωνία και βασίζεται στην τεχνολογία RFID. Το NFC forum, ορίζει το NFC ως μία τεχνολογία ασύρματης συνδεσιμότητας, μικρής εμβέλειας (επίσης γνωστή ως ISO 18092), που παρέχει εύληπτη, απλή και ασφαλή επικοινωνία, μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών. Λειτουργεί στη συχνότητα των 13.56 MHz και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης 106 Kb/s, 212 Kb/s και 424 Kb/s. Έτσι, το NFC καθίσταται κατάλληλο για μετάδοση σύντομων πληροφοριών ή μηνυμάτων, σε μικρό χρονικό διάστημα. Ο πομπός και ο δέκτης είναι μικρά chipset, που μπορούν να ενσωματωθούν σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, τερματικά POS και πολλά άλλα αντικείμενα [37].



Σχήμα 3.8: Περιπτώσεις χρήσης του πρωτοκόλλου NFC [38]

### 3.3.5 LoRa

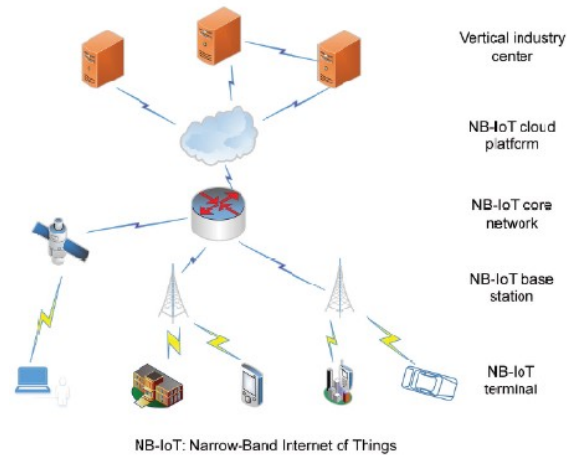
Το LoRa αποτελεί μία νέα οικογένεια ασύρματων επικοινωνιών για το ΔτΠ, που έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια και κερδίζει δημοτικότητα σε ενσωματωμένα συστήματα χαμηλής ισχύος μπαταρίας, που πρέπει να μεταφέρουν μικρή ποσότητα δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα, σε μεγάλη απόσταση. Το LoRa επιτρέπει ασφαλή, αμφίδρομη, χαμηλού κόστους και κινητή επικοινωνία για το ΔτΠ, για «έξυπνες πόλεις», για εφαρμογές που ασχολούνται με την επικοινωνία ανάμεσα σε μηχανές (Machine to Machine – M2M) και για βιομηχανικές εφαρμογές. Ο όρος LPWA (Χαμηλής Ισχύς Ευρείας Περιοχής - Low Power Wide Area) αποτελεί έναν γενικό όρο ενός συνόλου τεχνολογιών επικοινωνίας ευρείας περιοχής (wide area) [39]. Οι συσκευές LoRa και το ανοιχτό πρωτόκολλο LoRaWAN, σε συνδυασμό με έξυπνες εφαρμογές ΔτΠ, συμβάλλουν στην επίλυση μεγάλων προκλήσεων του πλανήτη μας, όπως είναι η διαχείριση ενέργειας, η παρακολούθηση της ρύπανσης και η πρόληψη καταστροφών [40]. Το LoRaWAN καλύπτει το τεχνολογικό κενό των δικτύων που βασίζονται στα πρωτόκολλα Wi-Fi, Bluetooth και κινητής τηλεφωνίας (cellular), που απαιτούν είτε υψηλό εύρος ζώνης είτε υψηλή ισχύ, ή έχουν περιορισμένο εύρος ή αδυναμία διείσδυσης σε βάθος εσωτερικών χώρων [41].



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα σύγκρισης των LoRa, Wi-Fi, Bluetooth και των κυψελωτών δικτύων (cellular networks), βάσει εύρους ζώνης και εμβέλειας [41]

### 3.3.6 NB-IoT

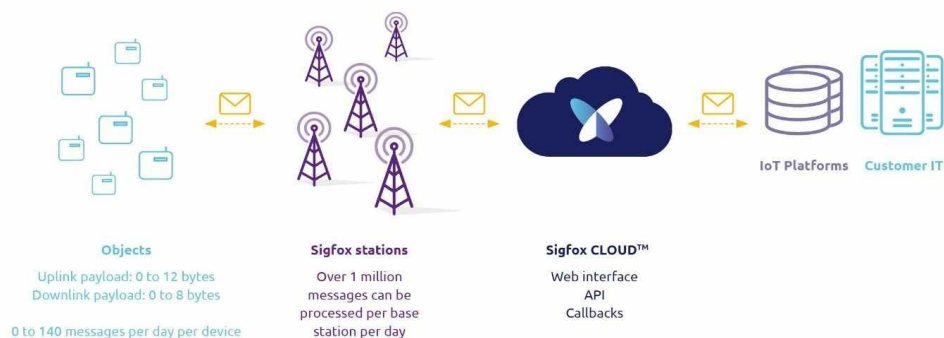
Το NB-IoT αποτελεί μία σημαντική τεχνολογία LPWA του οργανισμού 3GPP, για την αντίληψη και την απόκτηση δεδομένων που προορίζονται για «έξυπνες» εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων, η οποία είναι πολλά υποσχόμενη. Οι τυπικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν το πρότυπο NB-IoT είναι αυτές που ασχολούνται με την έξυπνη μέτρηση (smart metering) και την έξυπνη παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Το NB-IoT υποστηρίζει τεράστιες συνδέσεις, εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, κάλυψη ευρείας περιοχής και αμφίδρομη ενεργοποίηση μεταξύ του επιπέδου σηματοδότησης (signaling plane) και του επιπέδου δεδομένων (data plane) [42].



Σχήμα 3.10: Δικτύωση NB-IoT [42]

### 3.3.7 Sigfox

Η τεχνολογία Sigfox αναπτύχθηκε το 2010 από τη νεοσύστατη εταιρεία Sigfox, στην Τουλούζη της Γαλλίας, που είναι ταυτόχρονα εταιρεία και διαχειριστής δικτύου LPWAN. Η Sigfox, χρησιμοποιεί τις δικές της πατενταρισμένες τεχνολογίες UNB και αναπτύσσει ιδιόκτητους σταθμούς βάσης που εγκαθίστανται σε διάφορες χώρες στις ζώνες ISM χωρίς άδεια (unlicensed), για παράδειγμα 868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 433 MHz στην Ασία. Οι τελικές συσκευές (end-devices) συνδέονται σε αυτούς τους σταθμούς βάσης, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση BPSK σε εξαιρετικά στενή ζώνη των 100 Hz, με μέγιστο ρυθμό δεδομένων τα 100 bps. Εφαρμόζοντας εξαιρετικά στενή ζώνη (ultra narrow band) σε φάσμα υπό-GHz, το Sigfox χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τη ζώνη συχνοτήτων και έχει πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου, οδηγώντας σε πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλή ευαισθησία δέκτη και σχεδιασμό κεραίας χαμηλού κόστους. Αρχικά, η συγκεκριμένη τεχνολογία, υποστήριζε μόνο μετάδοση uplink, ενώ στη συνέχεια εξελίχθηκε σε αμφίδρομη επικοινωνία. Ο μέγιστος αριθμός των μηνυμάτων μέσω του uplink περιορίζεται στα 140 μηνύματα την ημέρα, ενώ το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου κάθε μηνύματος uplink, είναι 12 bytes. Το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου για κάθε μήνυμα downlink είναι 8 bytes [43]. Ένας στόχος της Sigfox, αποτελεί η δημιουργία ενός παγκόσμιου τηλεπικοινωνιακού προτύπου 0G, αφιερωμένου στη μεταφορά μικρών μηνυμάτων, με σκοπό να δοθεί πρόσβαση σε μία ελάχιστη υπηρεσία επικοινωνίας, σε όλους τους ανθρώπους του πλανήτη [44].



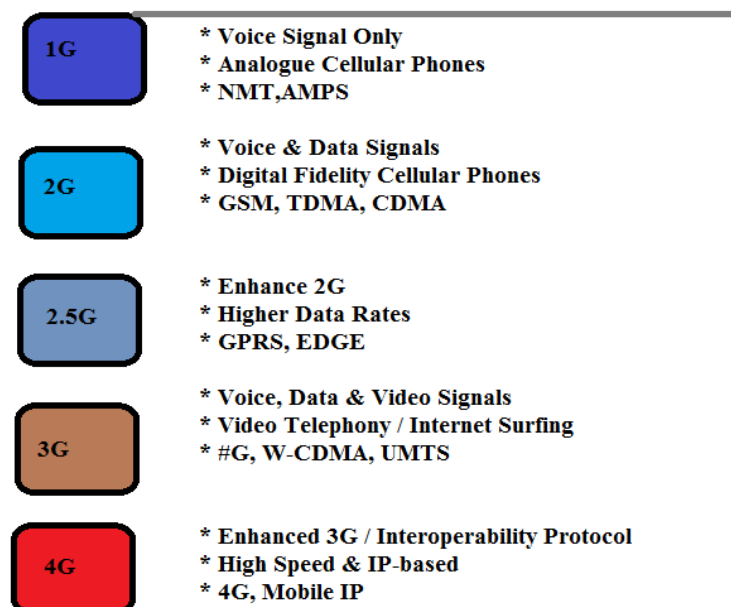
Σχήμα 3.11: Επισκόπηση του παγκόσμιου δικτύου Sigfox [45]

### 3.3.8 2G/3G/4G

Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας δεύτερης γενιάς 2G, που παρουσιάστηκε στα τέλη του 1980, αποτελεί μία ψηφιακή τεχνολογία που χρησιμοποιεί ψηφιακά σήματα για τη μετάδοση φωνής, έχει ταχύτητα 64 kbps και εύρος ζώνης 30-200 kHz. Προσφέρει έναν αριθμό υπηρεσιών, όπως υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων (Short Message Services - SMS), μηνύματα εικόνων και υπηρεσίες μηνυμάτων πολυμέσων (Multimedia Message Services - MMS). Η τεχνολογία 2G χρησιμοποιεί Πολλαπλή Πρόσβαση Διάρθρωσης Χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA) και Πολλαπλή Πρόσβαση Διάρθρωσης Κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA). Η τεχνολογία TDMA GSM (Global System for Mobile Communication) αποτελεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας 2G και ήταν η πρώτη τεχνολογία που υποστήριξε την διεθνή περιαγωγή (roaming) [46].

Το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας τρίτης γενιάς 3G, που παρουσιάστηκε το 2000, προσφέρει αυξημένους ρυθμούς δεδομένων από 144 kbps έως 384 kbps σε περιοχές ευρείας κάλυψης και έως 2 Mbps σε περιοχές τοπικής κάλυψης. Συγκριτικά με τους προκατόχους του, 1G και 2G, παρέχει προηγμένες υπηρεσίες στους χρήστες του, καθώς εκτός της επικοινωνίας με φωνή, περιλαμβάνει υπηρεσίες δεδομένων, πρόσβαση σε βίντεο, περιήγηση στο διαδίκτυο, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και άλλα, έχοντας εύρος ζώνης 15-20 MHz [46].

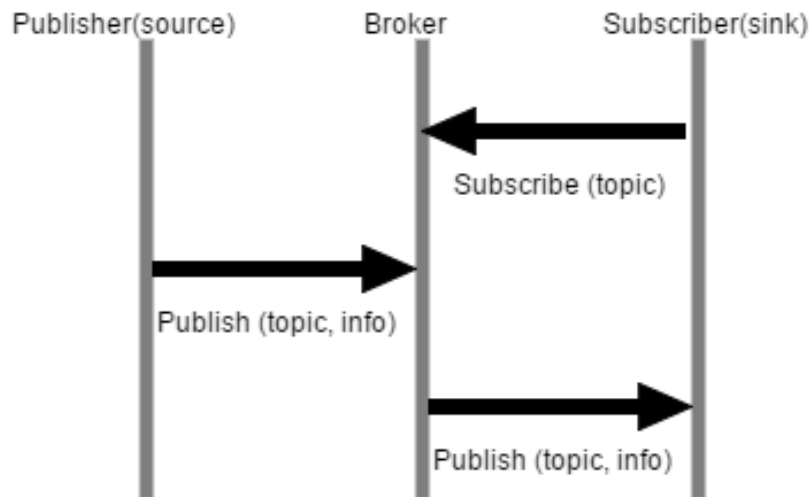
Τέλος, το σύστημα ασύρματης κινητής επικοινωνίας τέταρτης γενιάς 4G, που παρουσιάστηκε στα τέλη του 2000, αποτελεί ένα δικτυακό σύστημα καθόλα βασισμένο στο IP. Κύριος στόχος του 4G είναι η παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας, ποιότητας, χωρητικότητας, ασφάλειας και χαμηλού κόστους, για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, πολυμέσων και διαδικτύου χάρη στο πρωτόκολλο IP. Οι τεχνολογίες LTE (Long Term Evolution) και WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) θεωρούνται τεχνολογίες 4G [46].



Σχήμα 3.12: Γενιές κυβελωτών δικτύων (cellular networks) [47]

### 3.3.9 MQTT

Το πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) βασίζεται στο μοτίβο επικοινωνίας δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe) και αποτελεί πρωτόκολλο του επιπέδου εφαρμογής (application layer). Μεταφέρει μηνύματα χρησιμοποιώντας έναν κεντρικό broker μεταξύ πολλών συσκευών, και είναι κατάλληλο για συσκευές περιορισμένων διαθέσιμων πόρων, που χρησιμοποιούνται σε αναξιόπιστες συνδέσεις ή σε συνδέσεις χαμηλού εύρους ζώνης. Μία συσκευή μπορεί να δημοσιεύσει (publish) δεδομένα σε έναν broker, σε μία συγκεκριμένη διεύθυνση, που καλείται θέμα (topic). Μία ή περισσότερες συσκευές μπορούν να εγγραφούν (subscribe) στο συγκεκριμένο θέμα, προκειμένου να λαμβάνουν όλα τα μηνύματα που δημοσιεύονται σε αυτό, ενώ η μετάδοση των δεδομένων βασίζεται στο πρωτόκολλο TCP. Ένας MQTT broker είναι ένας διακομιστής που λαμβάνει όλα τα μηνύματα από τους πελάτες (clients), και στη συνέχεια δρομολογεί όλα τα μηνύματα στους κατάλληλους πελάτες προορισμού. Αντίστοιχα, ένας πελάτης MQTT μπορεί να είναι οποιαδήποτε συσκευή που συνδέεται σε έναν MQTT broker μέσω ενός δικτύου. Ένας broker μπορεί να εξυπηρετεί χιλιάδες πελάτες ταυτόχρονα. Τέλος, το MQTT θεωρείται το πιο ευνοϊκό πρωτόκολλο σύνδεσης για εφαρμογές M2M και εφαρμογές ΔτΠ [48].



Σχήμα 3.13: Διαδικασία δημοσίευσης/εγγραφής που χρησιμοποιείται από το MQTT [48]

Παρακάτω, πραγματοποιείται σύγκριση των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων που συζητήθηκαν στο τρέχον κεφάλαιο, με τη μορφή ενός πίνακα.

Πίνακας 3.1: Σύγκριση τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων [31], [37], [42], [43], [46], [49]

Πρωτόκολλα	Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	Εμβέλεια	Αυθεντικοποίηση και κρυπτογράφηση	Ενεργειακή αυτονομία συσκευών
NFC	424 Kbps	0.04 μ. – 0.1 μ.	Όχι [52]	Υψηλή
Wi-Fi	54 Mbps	100 μ.	WEP, WPA, WPA2, WPA3 [53]	Χαμηλή

<b>2G/3G/4G</b>	64 Kbps / 2 Mbps / 200 Mbps - 1 Gbps	Παγκόσμια κάλυψη	Αυθεντικοποίηση GSM / LTE	Μέτρια
<b>ZigBee</b>	250 Kbps	10 μ. – 100 μ.	AES-CTR	Υψηλή
<b>Bluetooth 5.0</b>	Θεωρητικά 2 Mbps (στην πράξη 1.6 Mbps με την επικοινωνιακή επιβάρυνση)	200 μ. (40 μ. σε εσωτερικούς χώρους)	AES-CCM [50]	Μέτρια
<b>NB-IoT</b>	<100 Kbps	< 25 χλμ.	Κρυπτογράφηση LTE	Πολύ υψηλή (έως 10 έτη)
<b>LoRaWAN</b>	<100 Kbps	5 χλμ. (πόλη), 20 χλμ. (ύπαιθρος)	AES 128-bit	Υψηλή
<b>Sigfox</b>	<100 Kbps	10 χλμ. (πόλη), 40 χλμ. (ύπαιθρος)	Όχι απαραίτητα [51]	Υψηλή

Παραπάνω γίνεται αναφορά στον Πίνακα 3.1, όπου η ενεργειακή αυτονομία συσκευών που χρησιμοποιούν τα παραπάνω πρωτόκολλα, διαχωρίζεται σε τέσσερα επίπεδα και χαρακτηρίζεται ως «Χαμηλή» (ελάχιστες ώρες), «Μέτρια» (αρκετές ώρες), «Υψηλή» (μερικά έτη) και «Πολύ υψηλή» (έως 10 έτη).

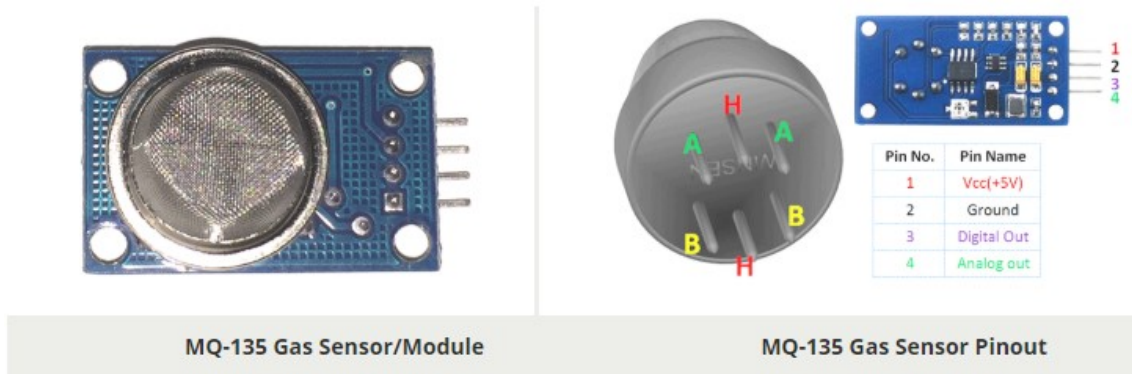
### 3.4 Αισθητήρες μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων και συνθηκών

Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα πραγματοποιείται χάρη σε μία πληθώρα υλοποιημένων αισθητήρων. Πολλές υλοποιήσεις, στηρίζονται στη χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους και αποδεκτής ακρίβειας, όπως στους αισθητήρες MQ, προκειμένου να συνδυάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων του κάθε αισθητήρα και να οδηγηθούν σε κάποιο εύλογο συμπέρασμα, όσον αφορά την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος ενδιαφέροντος. Εκτός των αισθητήρων αέριων ρύπων, αισθητήρες μέτρησης και παρακολούθησης άλλων ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως της θερμοκρασίας ή της υγρασίας, συμβάλλουν θετικά στην καλύτερη αξιολόγηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, καθώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αυξομείωση των συγκεντρώσεων διάφορων ρύπων. Παρακάτω, παρουσιάζονται ορισμένοι σημαντικοί αισθητήρες που συναντάμε συχνά σε επιστημονικές υλοποιήσεις παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με χρήση τεχνολογιών του ΔτΠ.

#### 3.4.1 MQ-135

Ο αισθητήρας MQ-135 για πολλούς θεωρείται ως ο κυριότερος αισθητήρας παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, καθώς μπορεί να παρακολουθεί μία σειρά αέριων ρύπων, αποτελώντας μία πολύ καλή αυτόνομη λύση μίας εφαρμογής χαμηλού κόστους, ή μία ιδανική προσθήκη σε ένα σύστημα που ενσωματώνει ένα σύνολο αισθητήρων, θέλοντας να βελτιώσει την ακρίβειά του και, πιθανώς, να μετρήσει επιπρόσθετες παραμέτρους των συνθηκών του περιβάλλοντος. Ο αισθητήρας αερίου MQ-135, έχει υψηλή ευαισθησία στον ατμό αμμωνίας, οξειδίων του αζώτου και βενζολίου, ενώ επίσης είναι ευαίσθητος στον καπνό, στην αλκοόλη και στο διοξείδιο του άνθρακα. Μία μονάδα ενός τέτοιου αισθητήρα, εμπεριέχει ένα ψηφιακό pin που επιτρέπει στον αισθητήρα να λειτουργεί ακόμη και μόνος του, χωρίς την απαραίτητη χρήση κάποιου μικροελεγκτή. Όταν πρόκειται για τη μέτρηση κάποιου

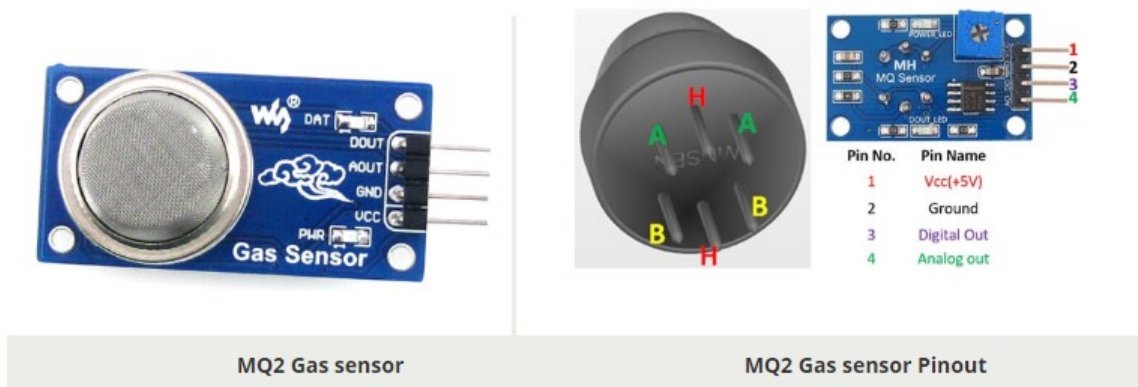
αερίου σε μέρη στο εκατομμύριο (parts per million – ppm), πρέπει να χρησιμοποιείται το αναλογικό pin, το οποίο κινείται με λογική τρανζίστορ-τρανζίστορ (Transistor–transistor logic – TTL) και λειτουργεί στα 5V, μπορώντας έτσι να χρησιμοποιηθεί με τους πιο κοινούς μικροελεγκτές του εμπορίου [54 - 55].



Σχήμα 3.14: Μονάδα αισθητήρα αερίων MQ-135 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα (δεξιά) [54]

### 3.4.2 MQ-2

Ο αισθητήρας MQ-2 μπορεί να ανιχνεύσει αέρια όπως υγραέριο, αλκοόλη, προπάνιο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο. Ομοίως με τον MQ-135, μία μονάδα ενός τέτοιου αισθητήρα, εμπεριέχει ένα ψηφιακό pin που επιτρέπει στον αισθητήρα να λειτουργεί ακόμη και μόνος του, χωρίς την απαραίτητη χρήση κάποιου μικροελεγκτή. Όταν πρόκειται για τη μέτρηση κάποιου αερίου σε μέρη στο εκατομμύριο (parts per million – ppm), πρέπει να χρησιμοποιείται το αναλογικό pin, το οποίο κινείται με λογική TTL και λειτουργεί στα 5V, μπορώντας έτσι να χρησιμοποιηθεί με τους πιο κοινούς μικροελεγκτές του εμπορίου [56 - 57].

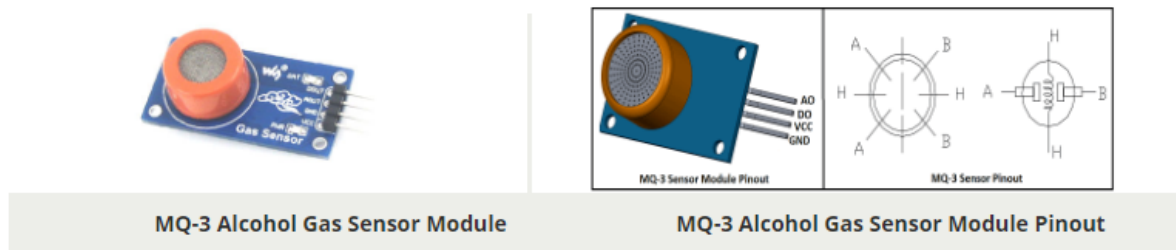


Σχήμα 3.15: Αισθητήρας αερίων MQ-2 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα (δεξιά) [56]

### 3.4.3 MQ-3

Ο αισθητήρας MQ-3 χρησιμοποιείται για την ανίχνευση αλκοόλης, βενζίνης, μεθανίου, εξανίου, υγραερίου και μονοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση που υπάρχει στην ατμόσφαιρα ένα από τα μετρούμενα αέρια, η αγωγιμότητα του αισθητήρα αυξάνεται σε αντιστοιχία με την αύξηση της συγκέντρωσης του εκάστοτε αερίου, χάρη στην ύπαρξη μίας αναλογικής αντίστασης εξόδου (analog

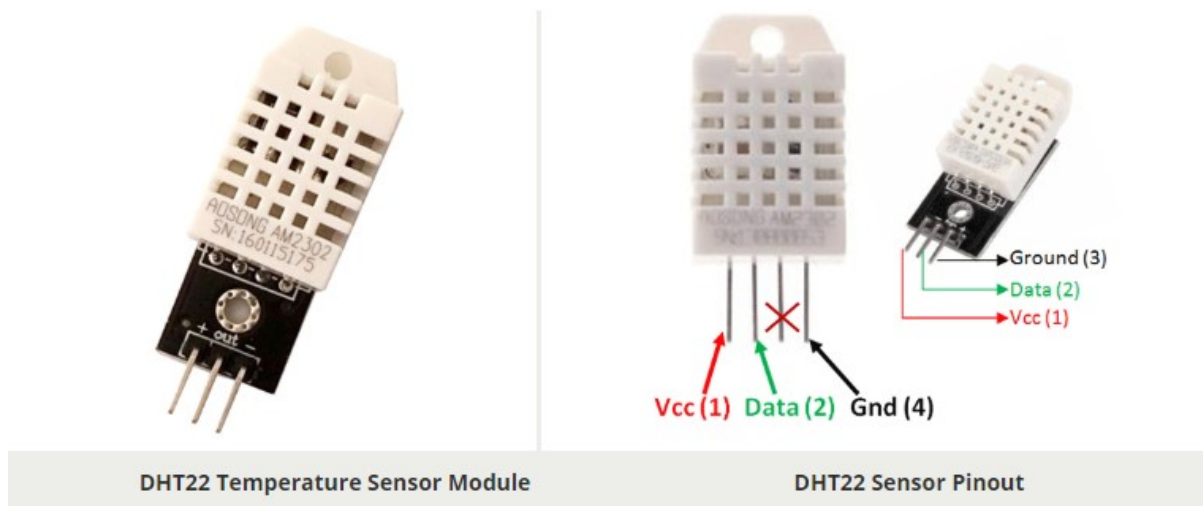
resistive output). Ο αισθητήρας αερίου MQ-3 έχει υψηλή ευαισθησία στην αλκοόλη και καλή αντοχή σε διακυμάνσεις της βενζίνης, του καπνού και των ατμών [57 - 58].



Σχήμα 3.16: Μονάδα αισθητήρα αερίων MQ-3 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα και της μονάδας (δεξιά) [58]

### 3.4.4 DHT22

Ο DHT22 αποτελεί έναν από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Ο αισθητήρας είναι εφοδιασμένος με έναν ειδικό αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας, NTC (Negative Temperature Coefficient), για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, και έναν μικροελεγκτή των 8-bit για την εξαγωγή των τιμών θερμοκρασίας και υγρασίας σε σειριακή μορφή. Επίσης, ο DHT22 είναι εργοστασιακά βαθμονομημένος, με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η διασύνδεσή του με άλλους μικροελεγκτές, ενώ μπορεί να μετρήσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο εύρος από -40 °C έως 80 °C, και την υγρασία από 0% έως 100%, με ακρίβεια  $\pm 1$  °C και  $\pm 1\%$ , αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο DHT22 αποτελεί διάδοχο του DHT11 και είναι σχετικά πιο ακριβός από τον τελευταίο, ωστόσο έχει υψηλότερο εύρος μέτρησης και ελαφρώς καλύτερη ακρίβεια [59 - 60].



Σχήμα 3.17: Μονάδα αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα και της μονάδας (δεξιά) [59]

### 3.4.5 PLANTOWER PMS5003

Ο αισθητήρας PLANTOWER PMS5003, αποτελεί ένα είδος ψηφιακού και καθολικού (universal) αισθητήρα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα του περιβάλλοντος. Μπορεί να εγκατασταθεί σε μεταβλητά όργανα μέτρησης που σχετίζονται με τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα ή σε άλλους εξοπλισμούς περιβαλλοντικής βελτίωσης, με σκοπό την παροχή ορθών δεδομένων συγκέντρωσης, εγκαίρως. Ως αισθητήρας σκόνης λέιζερ, χρησιμοποιεί την αρχή

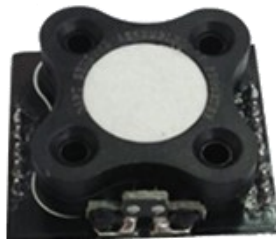
σκέδασης φωτός λέιζερ για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων σκόνης που αιωρούνται στον αέρα, προσφέροντας ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα μέτρησης  $PM_{1.0}$ ,  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$  [61 - 62].



Σχήμα 3.18: Αισθητήρας σκόνης λέιζερ PLANTOWER PMS5003 [61]

### 3.4.6 WZ-S-K

Ο WZ-S-K αποτελεί έναν ηλεκτροχημικό αισθητήρα δύο ηλεκτροδίων, με υψηλή ακρίβεια μέτρησης και ευκολία λειτουργίας. Χάρη στη χρήση προηγμένης τεχνολογίας μικροανίχνευσης, είναι σε θέση να μετράει την συγκέντρωση φορμαλδεύδης στο περιβάλλον, και να την μετατρέπει άμεσα σε μία μετρήσιμη τιμή, προς παρακολούθησή της [63].



Σχήμα 3.19: Αισθητήρας φορμαλδεύδης WZ-S-K [64]

### 3.4.7 MQ-131

Ο αισθητήρας MQ-131 είναι ευαίσθητος στο όζον σε ευρεία εμβέλεια, ενώ ταυτόχρονα συνδυάζει μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος. Εφόσον εντοπίζεται αέριο όζοντος στην ατμόσφαιρα, η αγωγιμότητα του αισθητήρα μειώνεται, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του αερίου. Ο MQ-131, επίσης, εμφανίζει ευαισθησία σε ισχυρά οξειδία, όπως το χλώριο και το διοξείδιο του αζώτου. Χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό, τόσο σε στατικά οικιακά συστήματα συναγερμού συγκέντρωσης όζοντος, όσο και σε φορητούς ανιχνευτές συγκέντρωσης όζοντος [65].



Σχήμα 3.20: Αισθητήρας όζοντος MQ-131 [65]

### 3.4.8 MQ-4

Ο αισθητήρας αερίων MQ-4 έχει υψηλή ευαισθησία στο μεθάνιο, καθώς επίσης στο προπάνιο και το βουτάνιο. Εφόσον εντοπίζεται κάποιο εύφλεκτο αέριο από τα παραπάνω στην ατμόσφαιρα, η αγωγιμότητα του αισθητήρα αυξάνεται, ταυτόχρονα, μαζί με την αύξηση της συγκέντρωσης του σχετικού αερίου. Αποτελεί την κατάλληλη λύση για ένα εύρος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών οικιακής χρήσης, βιομηχανίας και φορητών υλοποιήσεων, ενώ χαρακτηρίζεται από το χαμηλό του κόστος [66].



Σχήμα 3.21: Μονάδα αισθητήρα όζοντος MQ-4 (αριστερά) και αντίστοιχο pinout του ίδιου αισθητήρα και της μονάδας (δεξιά) [67]

## 3.5 Πλατφόρμες υλικού για το ΔτΠ

Προκειμένου οι μετρήσεις των αισθητήρων να μπορούν να προ-επεξεργαστούν ή να επεξεργαστούν τελικώς, καθώς και να μπορούν να μεταδοθούν με τη χρήση κάποιου τηλεπικοινωνιακού πρωτοκόλλου σε κάποιο απομακρυσμένο διακομιστή cloud, ή κάπου ενδιάμεσα (π.χ. edge και fog computing), η παρουσία κάποιου υπολογιστή ή μικροελεγκτή είναι απαραίτητη. Παρακάτω, παρουσιάζονται μερικά σχετικά παραδείγματα υλικού μέρους (hardware), που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι πολλών ολοκληρωμένων εφαρμογών ΔτΠ.

### 3.5.1 Arduino

Το Arduino αποτελεί μία πλατφόρμα ηλεκτρονικών (electronics platform) ανοιχτού κώδικα, που βασίζεται σε υλικό και λογισμικό, εύκολο στη χρήση. Υπάρχει διαθέσιμη μία πληθώρα εκδόσεων πλακετών Arduino, βάσει αναγκών και είδους υλοποίησης, οι οποίες είναι σε θέση να διαβάσουν εισόδους (inputs), όπως το πάτημα ενός κουμπιού, και να τις μετατρέψουν σε εξόδους, ανάβοντας, για παράδειγμα, κάποιο φως LED ή δημοσιεύοντας κάτι στο διαδίκτυο. Οι εκάστοτε εντολές, μπορούν να σταλούν στον μικροελεγκτή της πλακέτας, μέσω χρήσης της γλώσσας προγραμματισμού Arduino, που

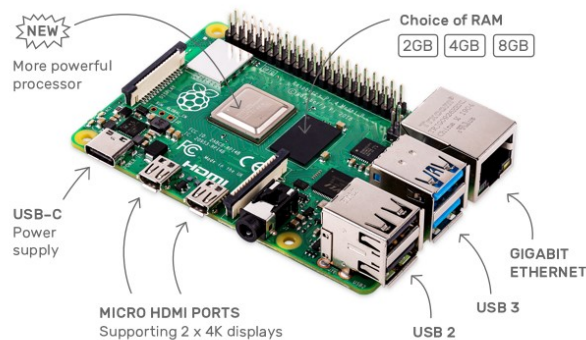
βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Wiring, και του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος ανάπτυξης Arduino IDE. Χάρη στην απλότητά του, το Arduino έχει χρησιμοποιηθεί σε χιλιάδες υλοποιήσεις και εφαρμογές. Συγκριτικά με άλλους μικροελεγκτές και τις αντίστοιχες πλατφόρμες τους, που κυκλοφορούν στην αγορά, το Arduino απλοποιεί τη διαδικασία εργασίας με μικροελεγκτές και, παράλληλα, προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα για καθηγητές, μαθητές και ερασιτέχνες. Πρακτικά, προσφέρει επεκτάσιμο λογισμικό και υλικό ανοιχτού κώδικα, απλό και διαπλατορμικό (cross-platform) προγραμματιστικό περιβάλλον, που λειτουργεί σε πληθώρα λειτουργικών συστημάτων, ενώ ταυτόχρονα το κόστος του είναι χαμηλό [68].



Σχήμα 3.22: Παράδειγμα πλακέτας Arduino (μοντέλο Arduino UNO REV3) [69]

### 3.5.2 Raspberry Pi

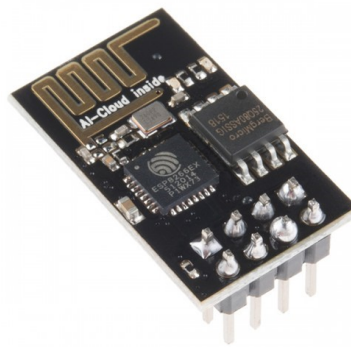
Το Raspberry Pi είναι ένας υπολογιστής μεγέθους πιστωτικής κάρτας, χαμηλού κόστους, που μπορεί να συνδεθεί σε οθόνη υπολογιστή ή τηλεόραση, ενώ χρησιμοποιεί συμβατικές περιφερειακές συσκευές ποντικιού και πληκτρολογίου. Έχοντας αρκετή υπολογιστική ισχύ, παρά το μικρό του μέγεθος, επιτρέπει σε άτομα όλων των ηλικιών να εξοικειωθούν με τους Η/Υ και να μάθουν πως να προγραμματίζουν σε γλώσσες προγραμματισμού, όπως η Scratch και η Python. Τέλος, το Raspberry Pi μπορεί να εκτελέσει εφαρμογές και εργασίες που μπορεί να εκτελέσει ένας υπολογιστής κανονικού μεγέθους, όπως περιήγηση στο διαδίκτυο, αναπαραγωγή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, επεξεργασία κειμένου, παιχνίδια και άλλα. Στόχος του ιδρύματος Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation), αποτελεί η χρήση του υπολογιστή από παιδιά σε ολόκληρο τον πλανήτη, προκειμένου να έχουν την ευκαιρία να μάθουν προγραμματισμό και να κατανοήσουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ένας υπολογιστής [70].



Σχήμα 3.23: Το πιο πρόσφατο μοντέλο Raspberry Pi (Raspberry Pi 4 Model B) [71]

### 3.5.3 ESP8266

Αξίζει να αναφερθούμε στον μικροελεγκτή ESP8266, που συχνά συναντάμε σε έναν μεγάλο αριθμό υλοποιήσεων ΔτΠ. Ο τελευταίος, αποτελεί έναν πολύ οικονομικό και εξαιρετικά ολοκληρωμένο μικροελεγκτή Wi-Fi για εφαρμογές ΔτΠ, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να ενσωματωθεί σε τρίτους μικροελεγκτές, όπως σε ένα Arduino, προσφέροντας συνδεσιμότητα Wi-Fi. Πιο συγκεκριμένα, ο μικροελεγκτής ESP8266EX, ενσωματώνει έναν επεξεργαστή 32-bit RISC Tensilica L106, ο οποίος επιτυγχάνει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος και φτάνει σε μέγιστη ταχύτητα ρολογιού 160 MHz. Έτσι, η χρήση του συγκεκριμένου μικροελεγκτή προσφέρει συνδεσιμότητα μέσω του πρωτοκόλλου Wi-Fi, ενώ συνδυάζει αξιοπιστία και στιβαρότητα, καταναλώνοντας την ίδια στιγμή ελάχιστη ενέργεια. Για τον παραπάνω λόγο, η χρήση του σε εφαρμογές που λειτουργούν με μπαταρία, θεωρείται μία πολύ καλή λύση [72].



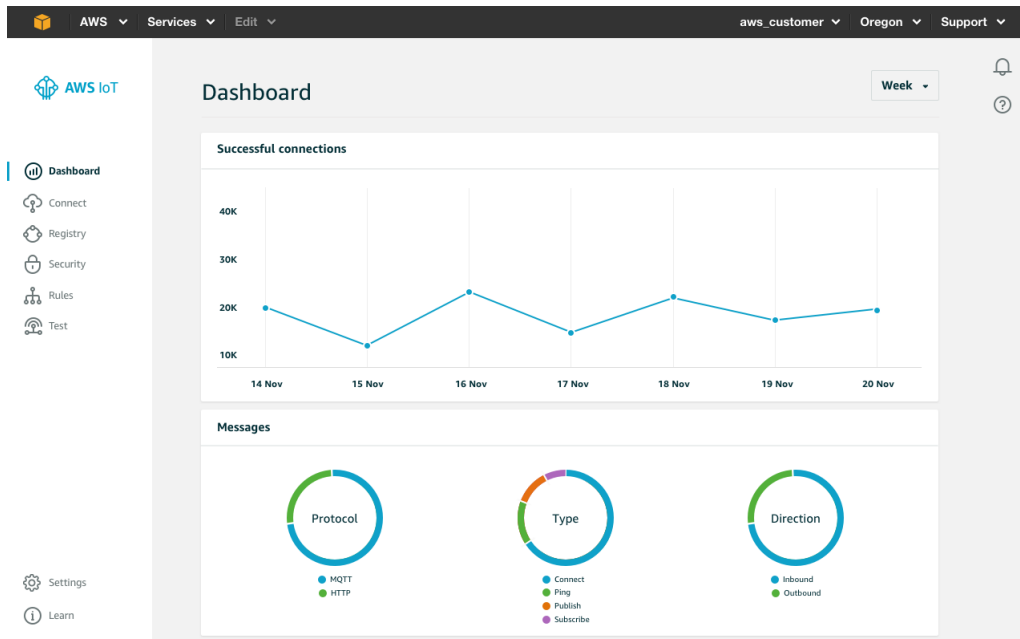
Σχήμα 3.24: Μονάδα μικροελεγκτή ESP8266 [73]

## 3.6 Πλατφόρμες λογισμικού για το ΔτΠ

Η διαχείριση και η αυτοματοποίηση των συνδεδεμένων συσκευών ενός συστήματος ΔτΠ, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μίας πλατφόρμας ΔτΠ, η οποία είναι σε θέση να παρέχει τόσο υπηρεσίες επικοινωνίας M2M, όσο και δυνατότητες ανάλυσης δεδομένων με τη χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και γενικότερης επεξεργασίας των συλλεγόμενων δεδομένων, με σκοπό την κάλυψη οποιαδήποτε ανάγκης ΔτΠ. Παρακάτω, παρουσιάζονται ορισμένες πλατφόρμες ΔτΠ που συναντήθηκαν σε μεγάλο βαθμό, κατά τη βιβλιογραφική έρευνα.

### 3.6.1 AWS IoT

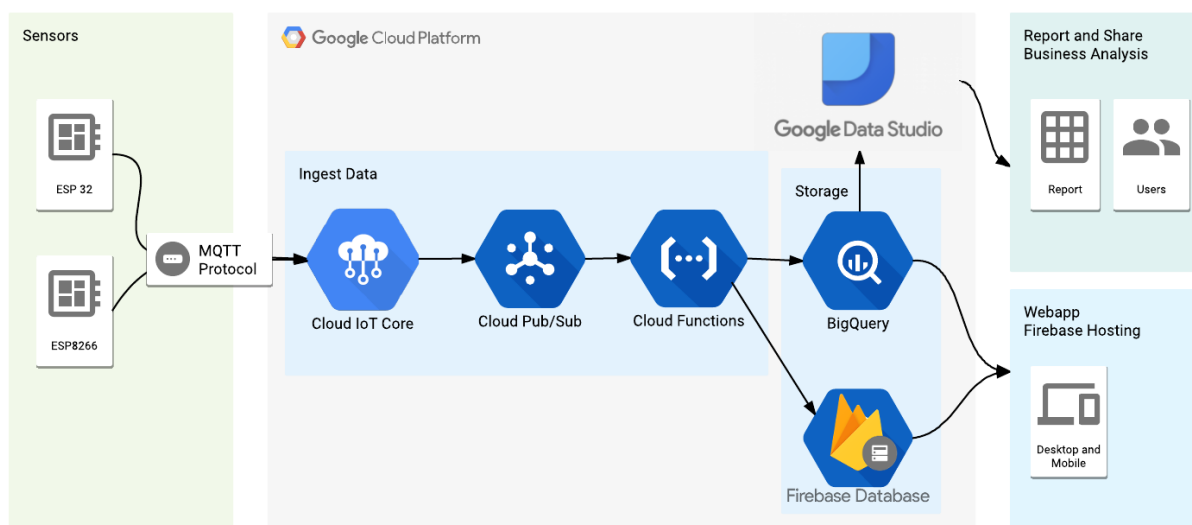
Η πλατφόρμα AWS (Amazon Web Services) IoT, της εταιρείας Amazon, παρέχει υπηρεσίες ΔτΠ τόσο για βιομηχανικές και εμπορικές λύσεις, όσο και για λύσεις που απευθύνονται στο καταναλωτικό κοινό, όπως η δημιουργία ενός «έξυπνου σπιτιού» και η διαχείρισή του. Η AWS IoT διαθέτει βαθιές (deep) υπηρεσίες μεγάλου εύρους, από το edge έως το cloud, ενώ αποτελεί τον μοναδικό προμηθευτή cloud υπηρεσιών, που συνδυάζει διαχείριση δεδομένων και πλούσιες στατιστικές αναλύσεις (analytics) σε εύχρηστες υπηρεσίες, σχεδιασμένες για δεδομένα ΔτΠ που διέπονται από θόρυβο. Ακόμη, προσφέρει ασφάλεια, παρέχοντας μηχανισμούς κρυπτογράφησης και υπηρεσία συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου ρυθμίσεων, καθώς και επεκτασιμότητα, ύψους δισεκατομμυρίων συσκευών και τρισεκατομμυρίων μηνυμάτων. Τέλος, η πλατφόρμα AWS IoT ενσωματώνεται σε άλλες υπηρεσίες AWS, για την υλοποίηση ολοκληρωμένων συστημάτων [74].



Σχήμα 3.25: Κονσόλα διαχείρισης AWS IoT [75]

### 3.6.2 Google Cloud Platform

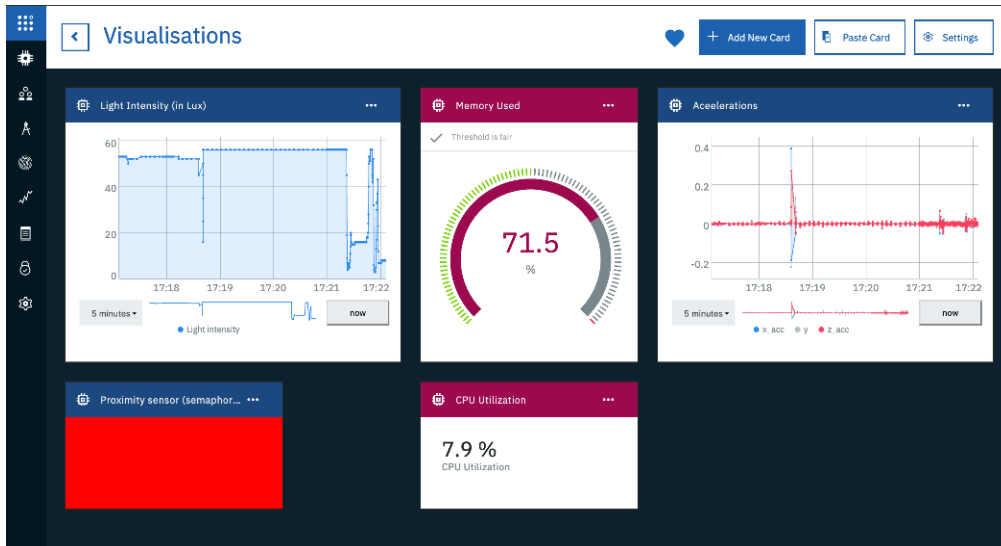
Το Google Cloud Platform, αποτελεί μία πλατφόρμα «έξυπνων» υπηρεσιών για το ΔτΠ. Πιο συγκεκριμένα, είναι ένα πλήρες σύνολο εργαλείων για τη σύνδεση, την επεξεργασία, την αποθήκευση και την ανάλυση δεδομένων τόσο σε επίπεδο edge όσο και στο cloud. Η πλατφόρμα αποτελείται από επεκτάσιμες και πλήρως διαχειριζόμενες υπηρεσίες cloud, καθώς και από μία ενσωματωμένη στοιβή λογισμικού για υπολογιστές άκρων (edge), με δυνατότητες μηχανικής μάθησης για τις ανάγκες κάθε εφαρμογής ΔτΠ [76]. Συνδυαστικά με το Firebase, την πλατφόρμα της Google που δίνει τη δυνατότητα γρήγορης δημιουργίας και ανάπτυξης μίας smartphone και Web εφαρμογής, η πλατφόρμα Google Cloud Platform μπορεί να συνεργαστεί αρμονικά, αναπτύσσοντας περαιτέρω μία υπάρχουσα υποδομή [77].



Σχήμα 3.26: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής εφαρμογής ΔτΠ, που συνδυάζει τη χρήση του Firebase και της πλατφόρμας Google Cloud Platform [78]

### 3.6.3 Watson IoT

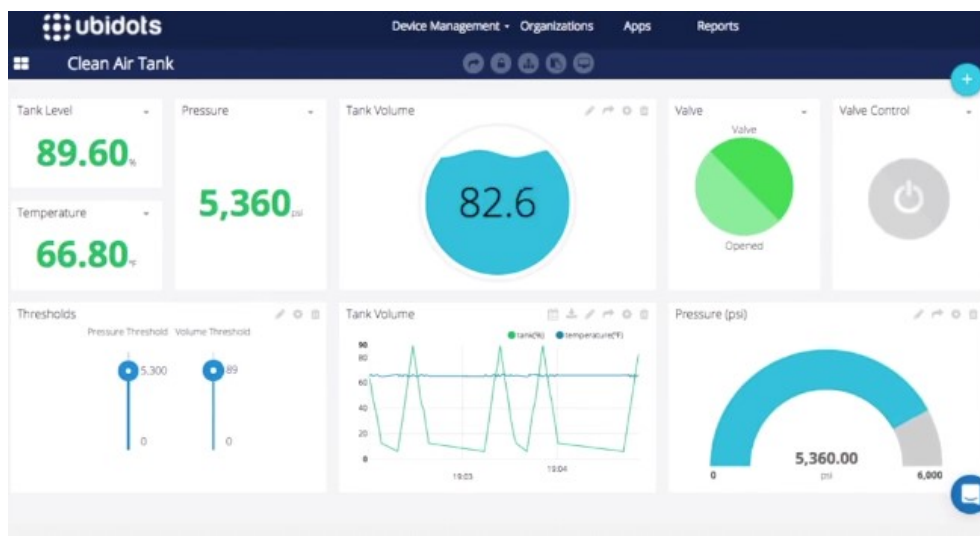
Η πλατφόρμα Watson IoT της IBM, αποτελεί μία διαχειριζόμενη υπηρεσία cloud για εφαρμογές του ΔτΠ. Η ίδια, καθώς και οι πρόσθετες υπηρεσίες blockchain και στατιστικής ανάλυσης που παρέχει, επιτρέπουν σε οργανισμούς και ιδιώτες, να συλλέξουν και να εξερευνήσουν δεδομένα συσκευών, εξοπλισμού και μηχανημάτων, ώστε να ανακαλύψουν πληροφορίες που μπορούν να βελτιώσουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων [79].



Σχήμα 3.27: Περιβάλλον χρήστη της πλατφόρμας ΔτΠ IBM Watson IoT [80]

### 3.6.4 Ubidots

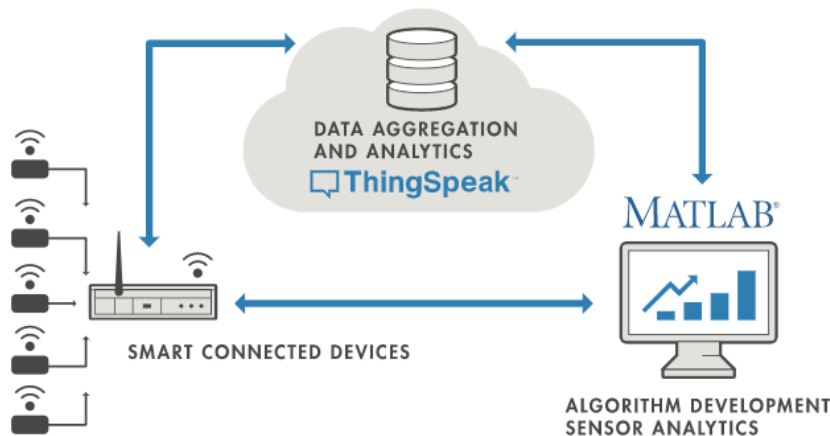
Η πλατφόρμα ΔτΠ Ubidots, της ομώνυμης εταιρείας, αποτελεί μία ολοκληρωμένη λύση ανάλυσης και απεικόνισης (visualization) δεδομένων για εφαρμογές ΔτΠ, που συναντάμε συχνά σε μία πληθώρα ερευνητικών έργων. Εμπορικές ή βιομηχανικές εφαρμογές πρέπει να χρησιμοποιούν τα προηγμένα εργαλεία ανάπτυξης της βασικής πλατφόρμας Ubidots, ακόμη και σε αρχικά στάδια πρωτοτύπων, ενώ εφαρμογές μαθητών, ερευνητών και ερασιτεχνών, γενικότερα, μπορούν να χρησιμοποιούν τη μη εμπορική άδεια της πλατφόρμας Ubidots STEM [81 - 82].



Σχήμα 3.28: Περιβάλλον χρήστη της πλατφόρμας ΔτΠ Ubidots [81]

### 3.6.5 ThingSpeak

Το ThingSpeak αποτελεί μία υπηρεσία πλατφόρμας ανάλυσης δεδομένων ΔτΠ, που επιτρέπει τη συλλογή, την απεικόνιση και την ανάλυση ροών δεδομένων, πραγματικού χρόνου (real-time), στο cloud. Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω της δυνατότητας εκτέλεσης κώδικα MATLAB, μέσα στο περιβάλλον της πλατφόρμας ThingSpeak στο διαδίκτυο, ενώ το τελευταίο, συχνά χρησιμοποιείται για την δημιουργία πρωτοτύπων και την απόδειξη ιδεών (proof of concept) συστημάτων ΔτΠ, που απαιτούν διεξαγωγή στατιστικών αναλύσεων [83].



Σχήμα 3.29: Διάγραμμα γενικής αρχιτεκτονικής συστημάτων ΔτΠ, που ενσωματώνουν την πλατφόρμα ThingSpeak στο σχεδιασμό τους [83]

### 3.7 Επεξεργασία δεδομένων και τεχνικές πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα

Όπως θα δούμε παρακάτω στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, μία ολοκληρωμένη υλοποίηση ενός συστήματος ΔτΠ για την παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, συνήθως απαρτίζεται από αρκετά επίπεδα. Στη βάση μίας τέτοιας αρχιτεκτονικής, βρίσκονται οι τερματικοί κόμβοι αίσθησης, εξοπλισμένοι με ειδικούς αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης αέριων ρύπων και ατμοσφαιρικών συνθηκών του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Τα παραπάνω δεδομένα μετατρέπονται από αναλογικά σήματα σε ψηφιακά δεδομένα και μεταδίδονται μέσω μίας τηλεπικοινωνιακής οδού, χρησιμοποιώντας κάποιο αντίστοιχο πρωτόκολλο επικοινωνίας, είτε σε μία ενδιάμεση συσκευή, είτε απευθείας σε έναν διακομιστή cloud. Η επεξεργασία των δεδομένων και η εξαγωγή συμπερασμάτων ή δεδομένων πρόβλεψης, συνήθως πραγματοποιείται στην πλευρά του διακομιστή cloud, λόγω αυξημένης επεξεργαστικής ισχύς και μεγάλου αποθηκευτικού χώρου.

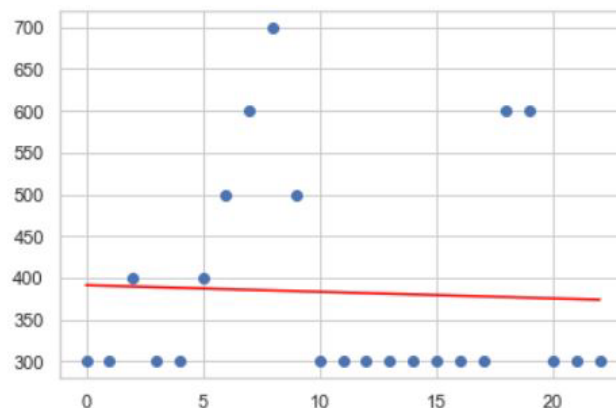
Συμπέρασμα μίας στατιστικής ανάλυσης, θα μπορούσε να αποτελεί ο υπολογισμός του προγράμματος δειγματοληψίας δεδομένων ποιότητας του αέρα, μίας συγκεκριμένης τοποθεσίας στην πλευρά του διακομιστή cloud, χρησιμοποιώντας στατιστική ανάλυση, με σκοπό τη βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας των κόμβων αίσθησης της εκάστοτε τοποθεσίας [84]. Με αυτό τον τρόπο, οι αισθητήρες λειτουργούν, πραγματοποιώντας διεργασίες μετρήσεων, μόνο όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο, αυξάνοντας έτσι την ενεργειακή αυτονομία τους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένες τεχνικές επεξεργασίας και πρόβλεψης δεδομένων της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με τη χρήση αλγορίθμων και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης.

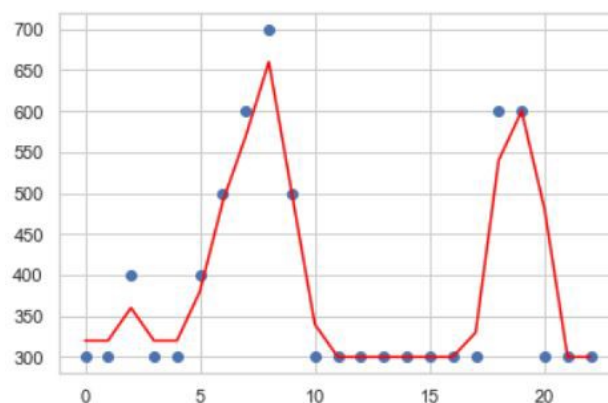
### 3.7.1 Μηχανική μάθηση

Το φαινόμενο κατά το οποίο ένα σύστημα βελτιώνει την απόδοσή του κατά την εκτέλεση μίας συγκεκριμένης εργασίας, χωρίς να υπάρχει ανάγκη να προγραμματιστεί εκ νέου, ορίζεται ως Μηχανική Μάθηση (Machine Learning). Πρακτικά, η Μηχανική Μάθηση (MM) αποτελεί κλάδο της Τεχνητής Νοημοσύνης, και ασχολείται με τη μελέτη αλγορίθμων που βελτιώνουν τη συμπεριφορά και την απόδοσή τους, πάνω σε κάποια εργασία που τους έχει ανατεθεί, χρησιμοποιώντας την εμπειρία τους, βασιζόμενοι δηλαδή σε μία πληθώρα δεδομένων που τους έχουν δοθεί στο παρελθόν, προκειμένου να «κατανοήσουν» ορισμένες έννοιες και να γίνουν αρτιότεροι στο κομμάτι εξαγωγής συμπερασμάτων, με ή χωρίς επίβλεψη από κάποιον άνθρωπο. Η δυνατότητα μάθησης, προσδιορίζεται ως η ικανότητα πρόσκτησης επιπλέον γνώσης, που επιφέρει μεταβολές στην υπάρχουσα καταχωρημένη γνώση, είτε αλλάζοντας χαρακτηριστικά της, είτε με τη σχετική αυξομείωσή της [85].

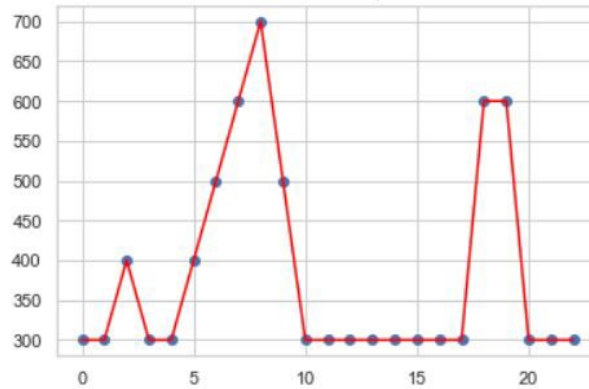
Ένα σύστημα πρόβλεψης τιμών μονοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και όζοντος ( $\text{O}_3$ ), παρουσιάζεται στο [86]. Οι ερευνητές, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Anaconda και τη γλώσσα προγραμματισμού Python, αφού συγκέντρωσαν δεδομένα αέριων ρύπων  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  και μετεωρολογικά δεδομένα, όπως τιμές θερμοκρασίας, ταχύτητας, κατεύθυνσης ανέμου και υγρασίας, τα χρησιμοποίησαν καταλλήλως, προκειμένου να εκπαιδεύσουν το σύστημα MM. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα MM, γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression), δένδρου απόφασης (decision tree) και τυχαίου δάσους (random forest), με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, και κατ' επέκταση, της συνολικής απόδοσής τους. Τα αποτελέσματα των παραπάνω, παρουσιάζονται σε μορφή γραφήματος.



Σχήμα 3.30: Προσαρμοσμένη καμπύλη του μοντέλου Γραμμικής Παλινδρόμησης για το  $\text{CO}$  [86]



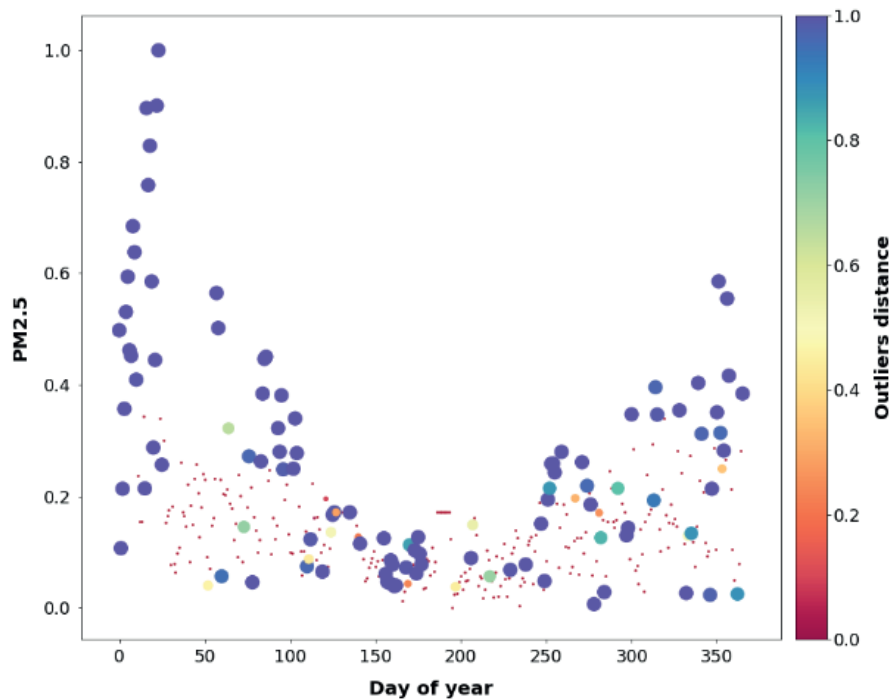
Σχήμα 3.31: Προσαρμοσμένη καμπύλη του μοντέλου Δένδρου Απόφασης για το  $\text{CO}$  [86]



Σχήμα 3.32: Προσαρμοσμένη καμπύλη του μοντέλου Τυχαίου Δάσους για το CO [86]

Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως ο αλγόριθμος Τυχαίου Δάσους προβλέπει καλύτερα, από τους υπόλοιπους αλγορίθμους MM που χρησιμοποιήθηκαν, τον δείκτη ποιότητας του αέρα, βάσει πρόβλεψης των τιμών των επιμέρους αέριων ρύπων του περιβάλλοντος.

Στο [87], τα δεδομένα παρακολούθησης των περιβαλλοντικών συνθηκών που συλλέγονται από το υλοποιημένο σύστημα, αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων του συστήματος για τη δημιουργία αποθετηρίου ιστορικών δεδομένων, που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια προς ανάλυση παρτίδας (batch analysis). Εκτός της τελευταίας, πραγματοποιείται ανάλυση ροής (stream analysis) βάσει των εισερχόμενων δεδομένων που προέρχονται από τελικές συσκευές αίσθησης, σε πραγματικό χρόνο. Ο συνδυασμός ανάλυσης παρτίδας και ανάλυσης ροής, καλείται αρχιτεκτονική Lambda, και επιτρέπει τη χρήση μοντέλων, δημιουργημένων με ιστορικά δεδομένα, για την εξήγηση φαινομένων που συμβαίνουν σε πραγματικό χρόνο. Σημαντικό γεγονός, αποτελεί η μη αναγκαία χρήση ακριβούς εξοπλισμού μέτρησης και παρακολούθησης των περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς η χρήση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής αυξάνει την ποιότητα και την ακρίβεια των παραγόμενων δεδομένων. Η ανάλυση παρτίδας, επιτρέπει την επιλογή της σωστής μεθόδου καθαρισμού των δεδομένων (data cleaning), καθώς αφού απορριφθούν οι ακραίες τιμές των μετρήσεων, μπορούν να ληφθούν οι σημαντικές τιμές των συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$ . Ο αλγόριθμος LoOP (Local Outlier Probabilities) χρησιμοποιήθηκε, για την εναρμόνιση του συστήματος ανάλυσης δεδομένων, και για την εφαρμογή των ίδιων κανόνων ανάλυσης δεδομένων για μελλοντική χρήση. Το αποτέλεσμα της παραπάνω μεθόδου, μετατρέπεται σε πιθανότητα, χάρη στη κανονικοποίηση (normalization) και στη συνάρτηση Γκαουσιανού Σφάλματος, καθώς μία τιμή είναι δυσκολότερο να ερμηνευθεί συγκριτικά με ένα αποτέλεσμα πιθανότητας. Τέλος, για τα δεδομένα ροής, εφαρμόζεται ένας τροποποιημένος αλγόριθμος LoOP.

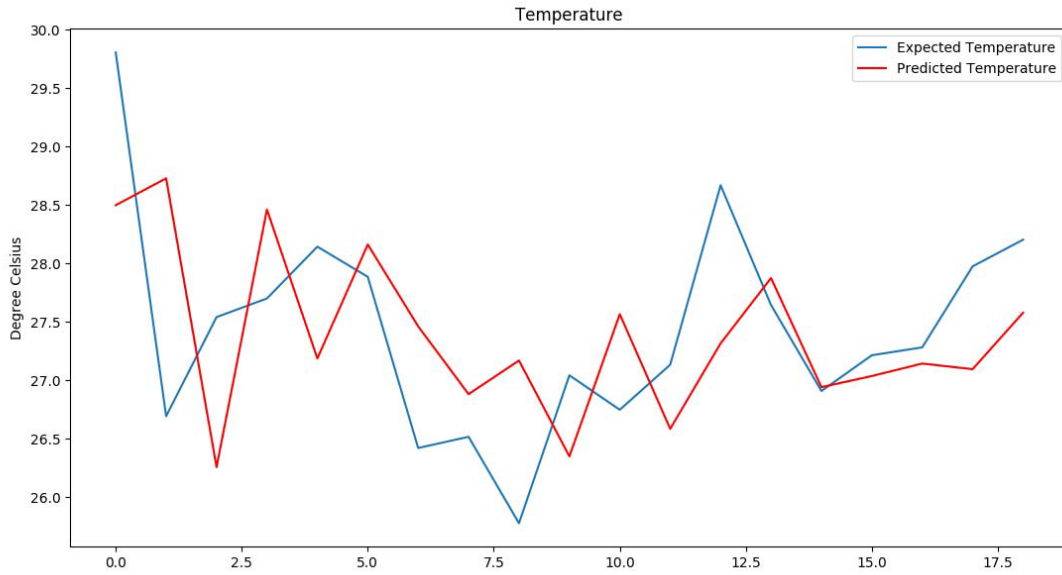


Σχήμα 3.33: Γράφημα απεικόνισης ακραίων τιμών μετρήσεων αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  σε αναλογία με την εκάστοτε ημέρα του έτους [87]

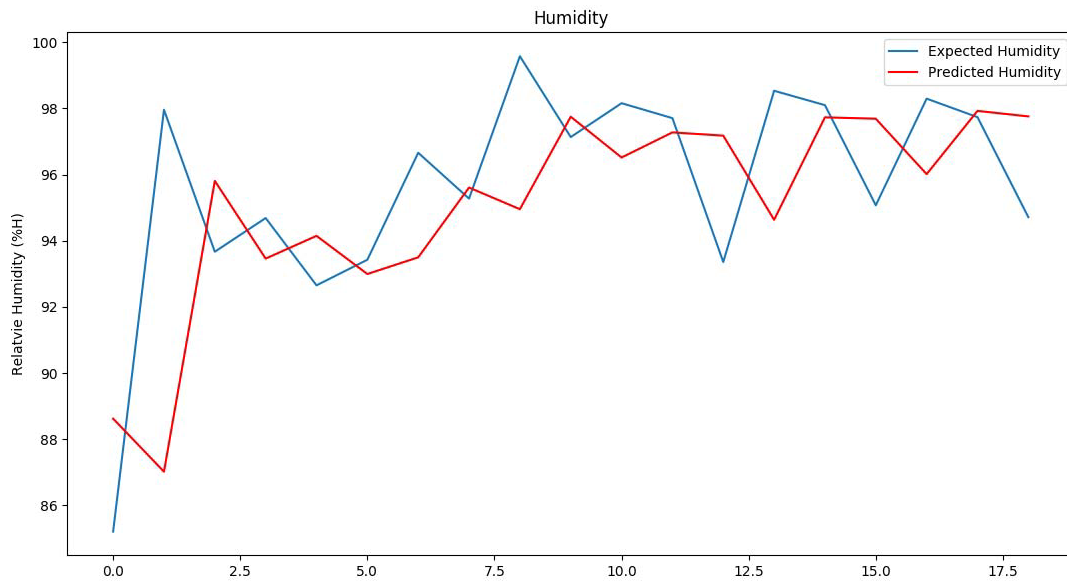
Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω γράφημα, κατόπιν χρήσης του αλγορίθμου LoOP για το φιλτράρισμα των ιστορικών δεδομένων αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$ , του πειράματος που διεξήχθη, οι υψηλότερες τιμές των ακραίων τιμών των μετρήσεων, παρατηρούνται κατά συγκεκριμένες χρονικές περιόδους του έτους, οι οποίες αντιστοιχούν στις περιόδους ανόδου της θερμοκρασίας της Πολωνίας, όπου και πραγματοποιήθηκε η εν λόγω έρευνα, φτάνοντας στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων του περιβάλλοντος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  πολλές φορές δεν είναι εφικτή ή θεωρείται δύσκολη, λόγω αιφνίδιων γεγονότων που μπορούν να προκαλέσουν αλλοίωση των σχετικών μετρήσεων. Για παράδειγμα, οι απροσδόκητες αλλαγές της θερμοκρασίας ή των βροχοπτώσεων, που παρατηρούνται την άνοιξη και το καλοκαίρι, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης. Στο [88], προτείνεται η περαιτέρω προσεκτική εξέταση και μελέτη των επιπτώσεων αιφνίδιων γεγονότων, με σκοπό τη σημαντική βελτίωση συστημάτων βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  στο περιβάλλον.

Το προτεινόμενο σύστημα του [89], χρησιμοποιεί MM, προκειμένου να προβλέπει τις αναμενόμενες τιμές των παραμέτρων ποιότητας του αέρα, βάσει σχετικών συνόλων δεδομένων ιστορικού, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Python και το Αυτοπαλινδρομικό Μοντέλο Κινητού Μέσου Όρου (Autoregressive Integrated Moving Average - ARIMA). Ωστόσο, τόσο τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται όσο και τα δεδομένα πρόβλεψης που παράγονται, αφορούν τους παράγοντες θερμοκρασίας και υγρασίας του περιβάλλοντος, χωρίς να γίνεται κάποια αναφορά σε άλλες συνθήκες του περιβάλλοντος, εκτός από το γεγονός ότι αντίστοιχα μπορούμε να προσεγγίσουμε και άλλες μεταβλητές αέριων ρύπων. Τα αποτελέσματα είναι σχετικά ικανοποιητικά και παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ συμπεραίνουμε πως η συγκεκριμένη εργασία MM αποτελεί πιλοτική έρευνα.



Σχήμα 3.34: Γράφημα θερμοκρασίας τιμών πρόβλεψης (κόκκινο) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (μπλε) [89]

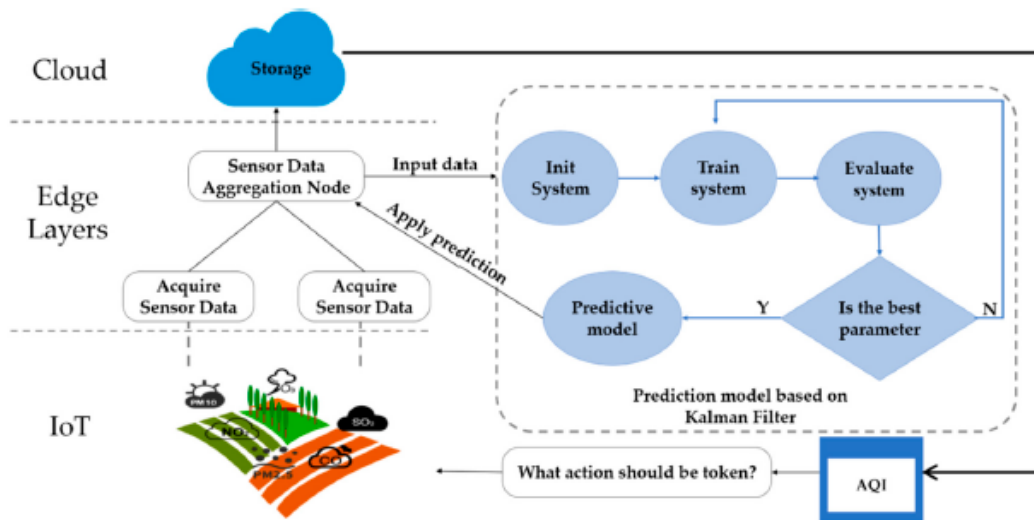


Σχήμα 3.35: Γράφημα υγρασίας τιμών πρόβλεψης (κόκκινο) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (μπλε) [89]

Τέλος, αφού μελετήσαμε τις παραπάνω μεθόδους και αλγορίθμους που εκτελούνται στην πλευρά του cloud διακομιστή, αξίζει να αναφερθούμε στην περίπτωση διεξαγωγής αντίστοιχων στατιστικών ερευνών, στο ενδιάμεσο μίας αρχιτεκτονικής ΔτΠ. Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερη ακρίβεια πρόβλεψης, πολλά μοντέλα MM απαιτούν μεγάλο ιστορικό δεδομένων για εκπαίδευση (πρόβλημα αποθήκευσης), ενώ ταυτόχρονα διέπονται από υψηλή πολυπλοκότητα χρόνου, καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τόσο προβλήματα αποθήκευσης όσο και υπολογισμού. Αντίστοιχο πρόβλημα συναντάται και κατά τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Έτσι, οι παραπάνω λύσεις μπορεί να προσφέρουν υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης, ωστόσο δεν μπορούν να ενσωματωθούν στον κόμβο edge computing ενός ελαφρύτερου μοντέλου. Προκειμένου να επιλυθούν

οι αδυναμίες των παραπάνω μοντέλων και να διασφαλιστεί η ακρίβεια πρόβλεψης, οι πολυπλοκότητες χώρου και χρόνου, απλοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο, έτσι ώστε τα μοντέλα να είναι προσαρμόσιμα στο σενάριο εφαρμογής edge computing.

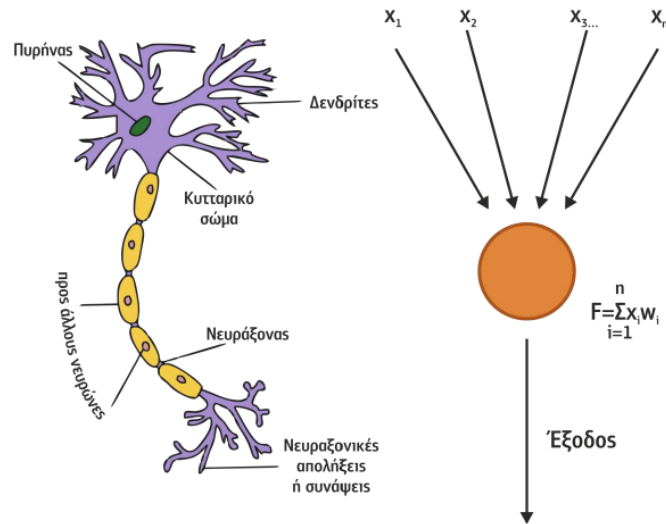
Το μοντέλο πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα που προτείνεται στο [90], βασίζεται στον αλγόριθμο φίλτρου Kalman. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, αποτελεί ένα μοντέλο αναδρομικού φίλτρου, που καταλαμβάνει πολύ λίγη μνήμη και χρειάζεται να διατηρεί δεδομένα μόνο για μία κατάσταση του συστήματος, αντί ιστορικών δεδομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι τιμές των μετρούμενων δεδομένων, χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης. Τέλος, καθώς η ταχύτητα λειτουργίας του αλγορίθμου είναι πολύ υψηλή, ο ίδιος καθίσταται κατάλληλος τόσο για την επίλυση προβλημάτων, όσο και για την εφαρμογή του στο edge κομμάτι της αρχιτεκτονικής ΔτΠ, σε πραγματικό χρόνο. Ως edge συσκευή, καθώς και συσκευή στην οποία συνδέονται διάφοροι αισθητήρες παρακολούθησης παραμέτρων της ποιότητας του αέρα, χρησιμοποιείται ένα Raspberry Pi 3B, όπου και εκτελείται ο αλγόριθμος φίλτρου Kalman, παράγοντας άμεσες προβλέψεις για έξι διαφορετικούς τύπους ατμοσφαιρικών ρύπων, διοξειδίου του θείου, διοξειδίου του αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα, όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>. Συγκριτικά με άλλους τρεις αλγορίθμους πρόβλεψης, SMA (Simple Moving Average), EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) και ARIMA, ακόμη και με τη χρήση αισθητήρων χαμηλής ακρίβειας, το σφάλμα των αποτελεσμάτων πρόβλεψης με βάση τον αλγόριθμο φίλτρου Kalman είναι το μικρότερο, καθιστώντας τον ως τον πιο αποδοτικό αλγόριθμο πρόβλεψης εκ των τεσσάρων.



Σχήμα 3.36: Μηχανική Μάθηση σε περιβάλλον άκρων-σε-cloud (edge-to-cloud) [90]

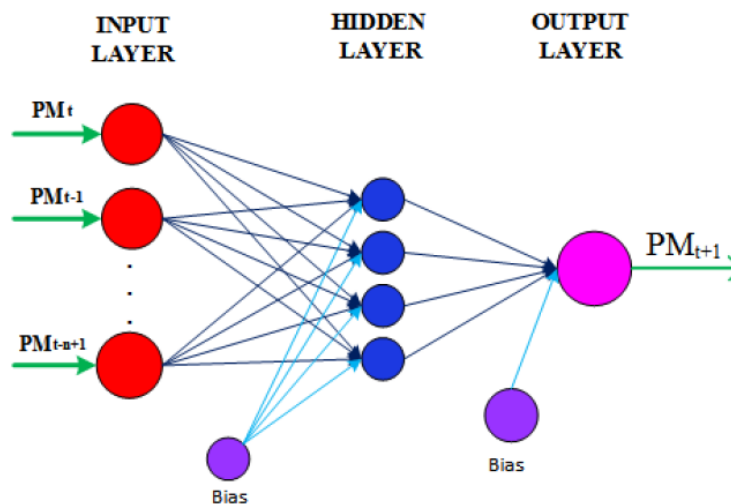
### 3.7.2 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Ο όρος Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks) περιγράφει έναν αριθμό από διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα, εμπνευσμένα από αντίστοιχα βιολογικά μοντέλα, που πρακτικά προσπαθούν να μιμηθούν τη συμπεριφορά των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα μαθηματικά μοντέλα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, σε πλήρη αντιστοιχία με τα βιολογικά, αποτελούνται από έναν αριθμό απλών και με υψηλό βαθμό εσωτερικής διασύνδεσης επεξεργαστικών μονάδων, οργανωμένων σε στρώματα. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANN) ή ΤΝΔ επεξεργάζονται πληροφορίες, ανταποκρινόμενα δυναμικά σε εξωτερικά ερεθίσματα-εισόδους [85].

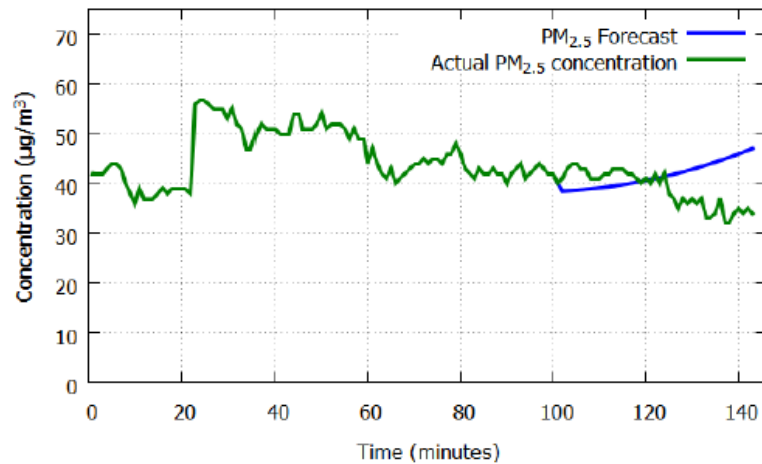


Σχήμα 3.37: Ο φυσικός νευρώνας (αριστερά), συγκριτικά με τον στοιχειώδη τεχνητό νευρώνα Perceptron (δεξιά) [85]

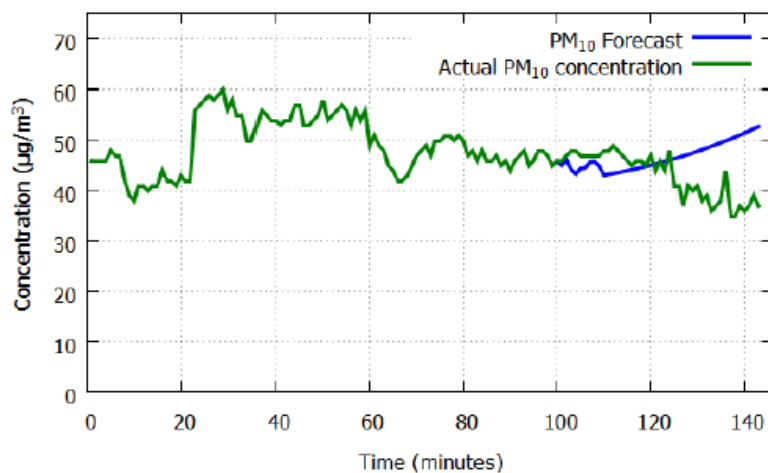
Τα ΤΝΔ, όπως η ΜΜ, χρησιμοποιούνται συχνά για την πρόβλεψη τιμών των παραμέτρων των ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως και του δείκτη ποιότητας του αέρα. Στο [91], μετρούμενες τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας, αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$ , διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα, χρησιμοποιούνται ως παράμετροι για την κατασκευή ενός σχεσιακού μοντέλου Grey, με σκοπό την εύρεση των πιο σημαντικών αέριων ρύπων ενός εσωτερικού χώρου, καταλήγοντας στο συμπέρασμα, ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι μόλυνσης της ποιότητας του αέρα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$ . Οι συγκεντρώσεις αυτών των δύο ρύπων, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης χάρη στη δημιουργία ενός ΤΝΔ. Η απόδοση της πρόβλεψης του μοντέλου ΤΝΔ, αξιολογείται με τη χρήση του Μέσου Απολύτου Σφάλματος (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) και τον σχετικό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ), και χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητικά επαρκής. Τέλος, παρουσιάζονται δύο γραφήματα σύγκρισης πραγματικών τιμών και τιμών πρόβλεψης, των συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$ , του ΤΝΔ.



Σχήμα 3.38: Δομή του μοντέλου πρόβλεψης ΤΝΔ [91]

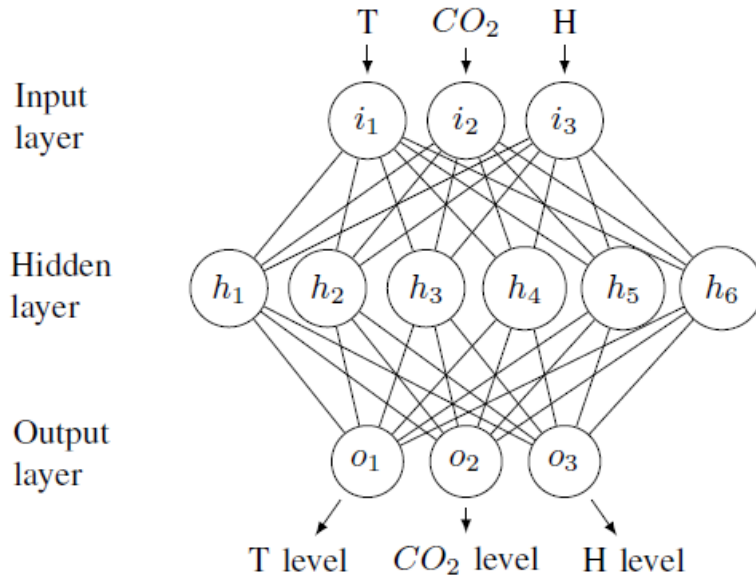


Σχήμα 3.39: Γράφημα συγκέντρωσης  $PM_{2.5}$ , τιμών πρόβλεψης (μπλε) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (πράσινο) [91]



Σχήμα 3.40: Γράφημα συγκέντρωσης  $PM_{10}$ , τιμών πρόβλεψης (μπλε) και τιμών που σχετίζονται με αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις (πράσινο) [91]

Στο [92], ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, ενσωματώνει ένα ΤΝΔ σε ένα Arduino Uno, προκειμένου κατά την ολοκλήρωση κάθε μέτρησης παραμέτρων της ποιότητας του αέρα, να εκτιμάται η ποιότητα του επιπέδου της κάθε επιμέρους παραμέτρου, και να προσαρμόζεται, αντιστοίχως, ο κλιματισμός του εσωτερικού χώρου, βελτιώνοντας ή διατηρώντας την ποιότητα του αέρα του. Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα ΤΝΔ σε προγραμματιστικό περιβάλλον C/C++, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη FANN (Fast Artificial Neural Network) και τους ενσωματωμένους αλγόριθμους Incremental, Batch, Quickprop και iRPROP, προς εκπαίδευσή του. Το ΤΝΔ δέχθηκε ως παραμέτρους εισόδου, τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα, επιστρέφοντας το επίπεδο της κάθε παραμέτρου, ταξινομημένο σε μία από τις τρεις πιθανές καταστάσεις: χαμηλό, άνετο, υψηλό. Η μηχανή ανάλυσης (analytic engine) εκπαιδεύτηκε επιτυχώς, με μέσο τετραγωνικό σφάλμα ίσο με 0,0002, αποτέλεσμα που επιτρέπει 100% ακρίβεια αξιολόγησης. Στη συνέχεια, το εκπαιδευμένο ΤΝΔ μεταφέρθηκε στη βιβλιοθήκη του Arduino Uno, και ανακατασκευάστηκε από την αρχή μέσα στη βιβλιοθήκη του, χωρίς τη χρήση εξωτερικών βιβλιοθηκών. Για κάθε σετ παραμέτρων εισόδου, η αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα με τη χρήση της σχετικής βιβλιοθήκης, υπολογίζεται σε 1,4 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 3.41: Δομή του μοντέλου ΤΝΔ [92]

### 3.8 Επίλογος

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε μία σύντομη εισαγωγή στο ΔτΠ, στους τομείς εφαρμογής του και στη σημασία του για το παρόν και το μέλλον, ενώ στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι βασικές του τεχνολογίες. Αμέσως μετά, μελετήθηκαν τόσο κάποιες από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες συνδεσιμότητας που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον κόσμο του ΔτΠ, όσο και το υλικό μέρος συστημάτων ΔτΠ, για την παρακολούθηση ατμοσφαιρικών συνθηκών, με έμφαση στην ποιότητα του αέρα, μέσα από την παρουσίαση ειδικών αισθητήρων μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών, μικροελεγκτών και του υπολογιστή, μικρού μεγέθους, Raspberry Pi. Επίσης, δημιουργήθηκε ένας πίνακας σύγκρισης των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων που μελετήθηκαν, προκειμένου να ξεχωρίζουν με ευκολία οι ομοιότητες και οι διαφορές τους. Τέλος, αναφορά έγινε στο κομμάτι της επεξεργασίας δεδομένων σε επίπεδο edge και cloud, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων, και αναλύθηκαν ορισμένοι μέθοδοι και τεχνικές πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα, με τη χρήση διαφόρων ειδών τεχνητής νοημοσύνης.

## **Κεφάλαιο 4ο: Εμπορικές mobile εφαρμογές παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών**

### **4.1 Εισαγωγή**

Η ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε αποτελεί σημαντικό κομμάτι της καθημερινότητας όλων των ανθρώπων. Ο κακός νυκτερινός ύπνος λόγω της ποιότητας του εισπνεόμενου ατμοσφαιρικού αέρα, οι ανθυγιεινές ατμοσφαιρικές συνθήκες του περιβάλλοντος εργασίας, καθώς και η έκθεση του αναπνευστικού μας συστήματος σε υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων σε εξωτερικούς χώρους, αποτελούν μερικούς από τους παράγοντες υποβάθμισης της ποιότητας ζωής ενός ανθρώπου. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και του ΔτΠ, μία πληθώρα mobile εφαρμογών, και μη, προσφέρει κάθε μία με τη δική της προσωπική προσέγγιση, λύσεις στον τομέα της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, και της απεικόνισης ζωτικών πληροφοριών στον μέσο χρήστη. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω πληροφορίες ή έκτακτες ειδοποιήσεις, ένας χρήστης μπορεί να τροποποιήσει ή να αποφύγει ορισμένες του καθημερινές μετακινήσεις και δραστηριότητες, προκειμένου να μειώσει την έκθεσή του σε επιβλαβείς για την υγεία περιβαλλοντικές συνθήκες, βελτιώνοντας έτσι άμεσα την ποιότητα της ζωής του.

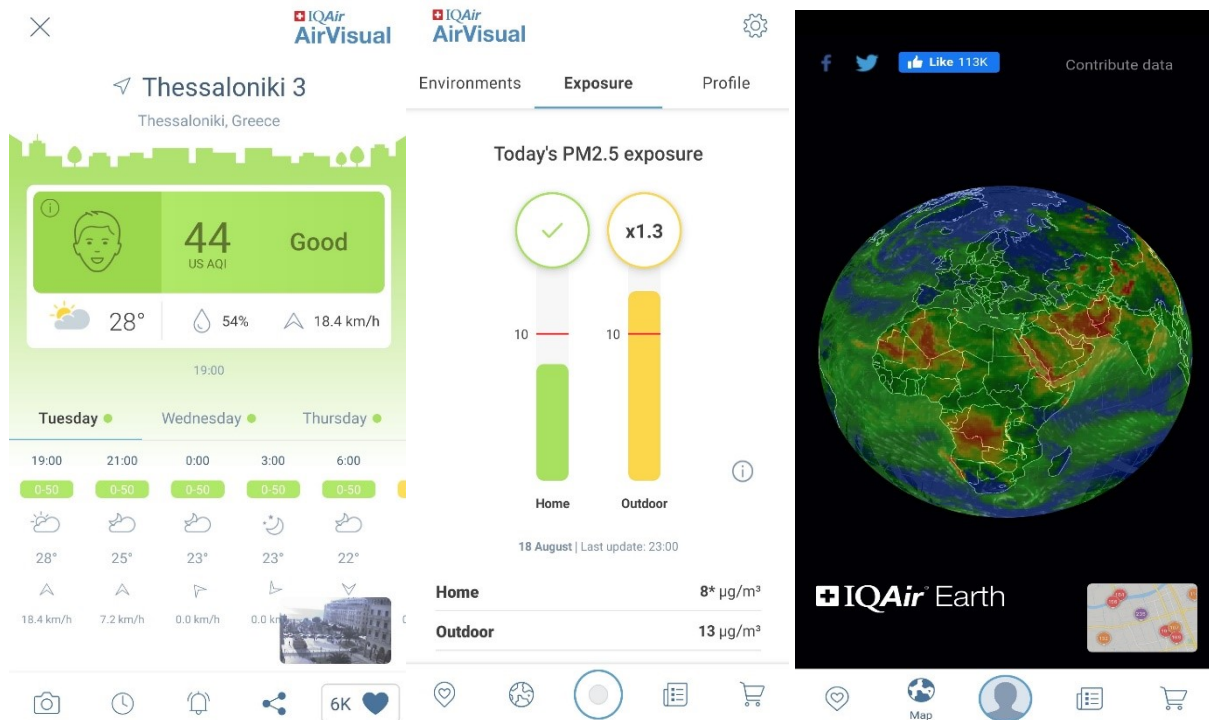
Κατόπιν σχετικής έρευνας, επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικές mobile εφαρμογές παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών, σε πραγματικό χρόνο, που προσφέρουν σημαντικά εργαλεία κατανόησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, για οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος. Οι εν λόγω εφαρμογές δοκιμάστηκαν σε συσκευή smartphone Samsung Galaxy S9, σε συνδυασμό με το λειτουργικό σύστημα Android 10, και αξιολογήθηκαν βάσει προσωπικής εμπειρίας χρήσης και άποψης. Τέλος, δημιουργήθηκε ένας συγκριτικός πίνακας, προκειμένου να συγκρίνουμε με μία γρήγορη ματιά τις πέντε εφαρμογές.

### **4.2 AirVisual**

Η ελβετική εταιρεία IQAir έχει σημαντική συμβολή στην υλοποίηση πληθώρας συσκευών καθαρισμού και παρακολούθησης του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας κατασκευάσει το πρώτο, παγκοσμίως, οικιακό φίλτρο αέρα το 1963, πρότεινε το AirVisual, μία mobile εφαρμογή συνοδευόμενη από μία συσκευή παρακολούθησης του αέρα εσωτερικών χώρων (AirVisual Pro), η οποία ξεκίνησε ως start-up στο Πεκίνο και το 2017 εξαγοράστηκε από την IQAir [93]. Η εφαρμογή AirVisual επιτρέπει στον χρήστη να παρακολουθεί δωρεάν την ποιότητα του αέρα δεκάδων χιλιάδων περιοχών σε παγκόσμια κλίμακα, προσφέροντας αξιόπιστα δεδομένα περισσότερων από 60.000 σταθμών παρακολούθησης, σε πραγματικό χρόνο. Εντός της εφαρμογής, παρουσιάζονται μετεωρολογικά δεδομένα, δεδομένα του τρέχοντος δείκτη ποιότητας αέρα AQI, ζωντανή παρακολούθηση βασικών ρύπων PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, όζοντος, διοξειδίου του αζώτου, διοξειδίου του θείου και μονοξειδίου του άνθρακα, σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη, παρέχεται επταήμερη πρόγνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των καιρικών συνθηκών, γραφήματα ιστορικών δεδομένων των τελευταίων 24 ωρών, προτάσεις υγείας, εκπαιδευτικό υλικό σχετικά με την ποιότητα του αέρα, blog με σχετικά νέα και η επιλογή δημιουργίας προσωπικού προφίλ, δωρεάν, με σκοπό την συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα που αναπνέει ο χρήστης βάσει της τοποθεσίας του [94].

Τέλος, η συσκευή AirVisual PRO για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, καθώς και μία πληθώρα συσκευών οικιακής και επαγγελματικής χρήσης, είναι διαθέσιμες μέσω της

επίσημης ιστοσελίδας της εταιρείας, με το αντίστοιχο κόστος. Ένα πλεονέκτημα της συγκεκριμένης mobile εφαρμογής, αποτελεί το γεγονός ότι παρέχεται, χωρίς τη χρήση της συσκευής AirVisual PRO, σχετική εκτίμηση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων που εισπνέει ο χρήστης, βάσει των εξωτερικών παραγόντων της ποιότητας του αέρα, φυσικά με μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με την ύπαρξη συσκευής παρακολούθησης στο χώρο.



Σχήμα 4.1: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής AirVisual [94]

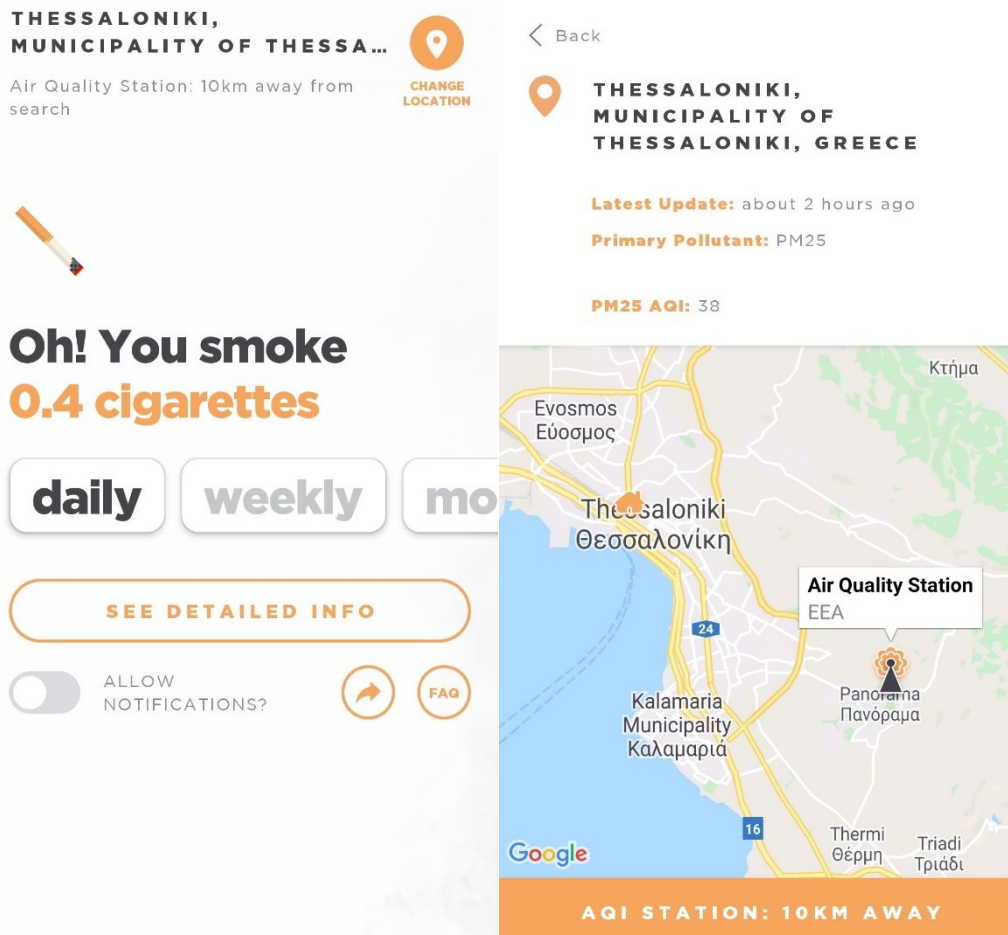


Σχήμα 4.2: Συσκευή παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, οικιακής χρήσης, AirVisual Pro [95]

### 4.3 Sh\*\*t! I Smoke

Η συγκεκριμένη εφαρμογή υλοποιήθηκε βασισμένη σε μία έρευνα του πανεπιστημίου Berkeley (Berkeley Earth) και των ευρημάτων της, προκειμένου να παρουσιάζει στο χρήστη των εικονικό αριθμό τσιγάρων που έχει καπνίσει παθητικά, σε καθημερινή βάση, λόγω της έκθεσής του σε αιωρούμενα σωματίδια PM<sub>2.5</sub> [96]. Σημειώνεται πως, σύμφωνα με τη σχετική έρευνα, ένα τσιγάρο την ημέρα ισούται με 22 µg/m<sup>3</sup> συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub>. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τοποθεσία ενδιαφέροντος με τη χρήση

λειτουργίας αναζήτησης ή χρησιμοποιώντας τη γεωγραφική του θέση μέσω του GPS του smartphone του. Τέλος, παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τις τιμές των αέριων ρύπων που συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα, καθώς και του βασικού αέριου ρύπου, σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή προσφέρει την επιλογή δημιουργίας ειδοποιήσεων, εφόσον το επιθυμεί ο χρήστης, ενώ οι τιμές των μετρήσεων της, θα σχολιάζαμε πως δεν είναι πάντοτε τόσο ακριβείς, καθώς η αναζήτηση βάσει ορισμένων πόλεων επιστρέφει μηδενικές τιμές ρύπων.



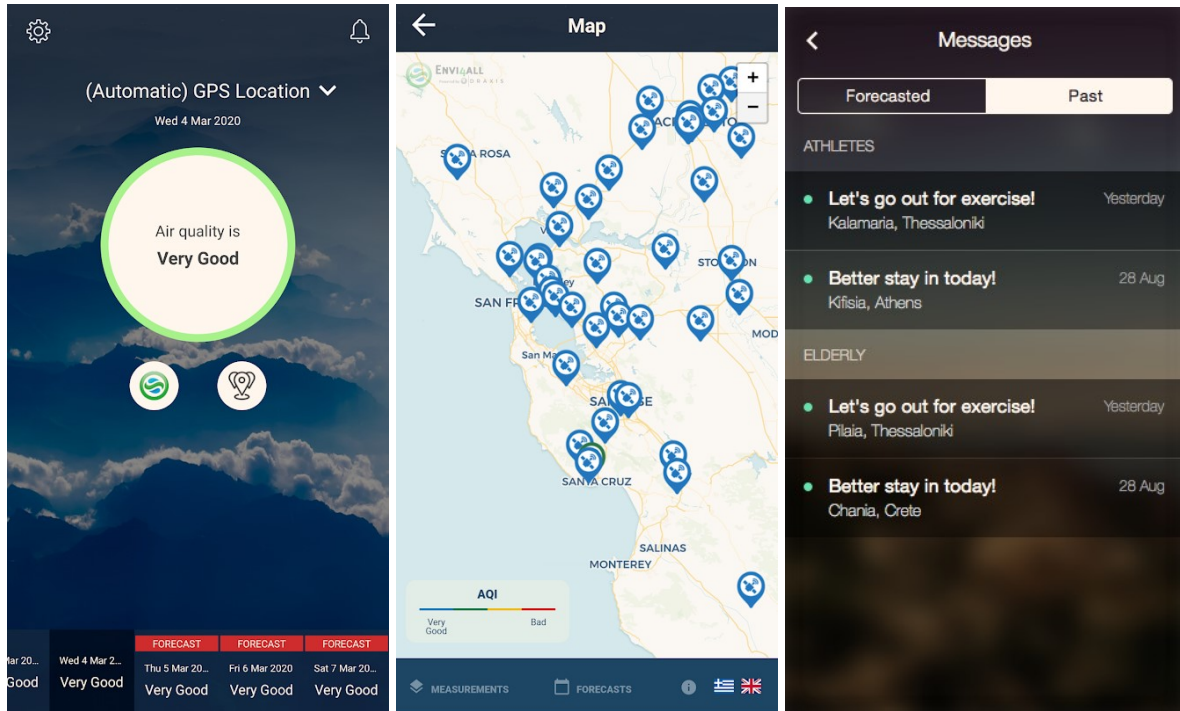
Σχήμα 4.3 Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής Sh\*\*t! I Smoke [96]

#### 4.4 ENVI4ALL

Η ελληνική περιβαλλοντική εταιρεία DRAXIS, με έδρα τη Θεσσαλονίκη, είναι υπεύθυνη για την υλοποίηση της mobile εφαρμογής ENVI4ALL, η οποία προσφέρεται δωρεάν και παρέχει αξιόπιστα δεδομένα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, όπως δεδομένα μονοξειδίου και διοξειδίου του αζώτου, όζοντος, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>, προερχόμενα από επίσημους επίγειους σταθμούς ανά τον κόσμο, σε πραγματικό χρόνο [97]. Χρησιμοποιώντας δεδομένα 9.000 σταθμών και αισθητήρων, καθώς και δεδομένα ανάδρασης (feedback) χρηστών, το ENVI4ALL παρέχει προσωποποιημένες πληροφορίες και συστάσεις για ειδικές ομάδες του πληθυσμού, χρησιμοποιώντας το δικό του προσαρμοσμένο δείκτη ποιότητας του αέρα, απεικόνιση των δεδομένων σε χάρτη, ιστορικά στοιχεία ποιότητας του αέρα, αξιόπιστη πρόγνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε επίπεδο δρόμου, καθώς και επεξεργασμένα δεδομένα πρόγνωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την υπηρεσία του Copernicus, σε βάθος τριών ημερών. Σημειώνεται πως

η χρήση της mobile εφαρμογής ENVI4ALL απαιτεί δημιουργία δωρεάν λογαριασμού και δεν παρέχεται επιλογή χρήσης επισκέπτη [98].

Παράλληλα, η DRAXIS υλοποίησε το ερευνητικό έργο Symphnia που στοχεύει στην παροχή στοχευμένων πληροφοριών σχετικά με τα τρέχοντα και τα προβλεπόμενα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συνδυάζοντας δεδομένα επίσημων επίγειων σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, δορυφορικών δεδομένων του Copernicus (CAMS), και μετρήσεις αισθητήρων χαμηλού κόστους που διαχειρίζονται οι ίδιοι οι πολίτες. Τέλος, ένα υψηλής ακρίβειας μοντέλο ποιότητας αέρα, το WRF-Chem, παρέχει τριήμερη πρόγνωση των επιπέδων της αέριας ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, για την καλύτερη ενημέρωση του κοινού [97].



Σχήμα 4.4: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής ENVI4ALL [98]

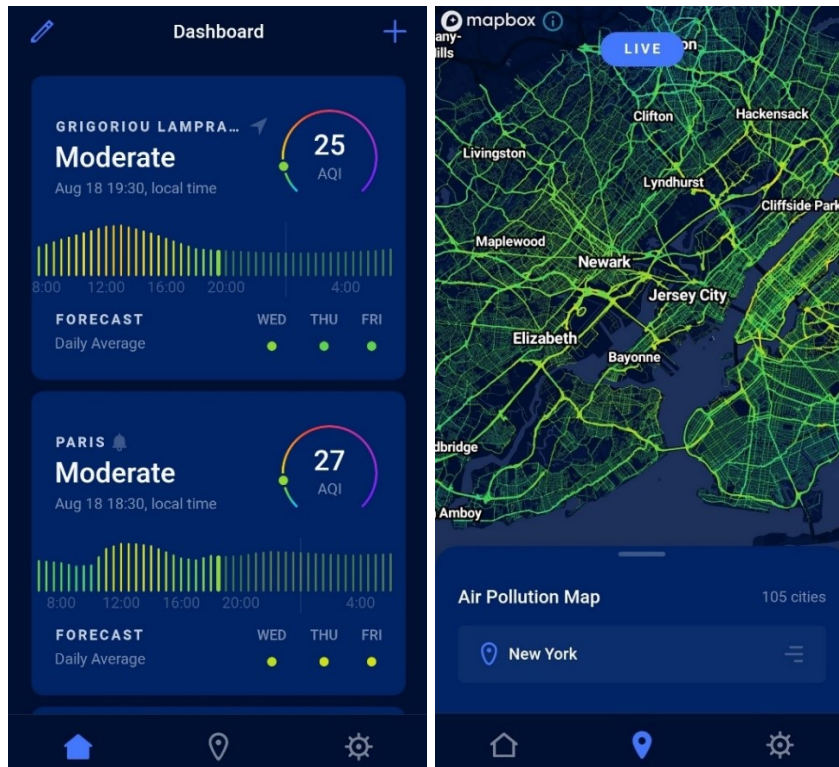
## 4.5 AIR

Η εφαρμογή AIR, της εταιρείας περιβαλλοντικής τεχνολογίας Plume Labs, παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας ζωντανά, ιστορικά και προγνωστικά δεδομένα, σε βάθος τεσσάρων ημερών, των σημαντικότερων αέριων ρύπων, σε παγκόσμια κλίμακα αίσθησης (sensing), όπως δεδομένα διοξειδίου του αζώτου, όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$  [99]. Ακόμη, παρουσιάζονται προσωποποιημένες πληροφορίες και συστάσεις προς τους χρήστες, με σκοπό να υιοθετήσουν καλύτερες καθημερινές συνήθειες, όσον αφορά τα μέρη τα οποία επισκέπτονται και τις δραστηριότητές τους, βελτιώνοντας έτσι έμπρακτα την ποιότητα της ζωής τους, καθώς σύμφωνα με έρευνες, η γνώση σχετικών πληροφοριών πραγματικού χρόνου, μπορεί να μειώσει την έκθεση του χρήστη σε επιβλαβείς συνθήκες του περιβάλλοντος σε ποσοστό έως και 50%. Το AIR χρησιμοποιεί το δικό του προσαρμοσμένο δείκτη ποιότητας αέρα Plume AQI [100].

Παράλληλα με την παραπάνω εφαρμογή, η εταιρεία έχει υλοποιήσει τη δεύτερη γενιά μίας εμπορικής «έξυπνης», φορητής συσκευής παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, που ονομάζεται FLOW 2 και είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{1.0}$ ,

## Κεφάλαιο 4

PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>, διοξειδίου του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs). Ο συνδυασμός συσκευής και εφαρμογής, επιτρέπουν στο χρήστη να πάρει καλύτερες και πιο υγιείς αποφάσεις στην καθημερινότητά του, επιλέγοντας για παράδειγμα το λεωφορείο για την μετακίνησή του και όχι το τραμ, γνωρίζοντας πως η ποιότητα του αέρα στην πρώτη περίπτωση θα είναι λιγότερο επιβλαβής για την υγεία του.



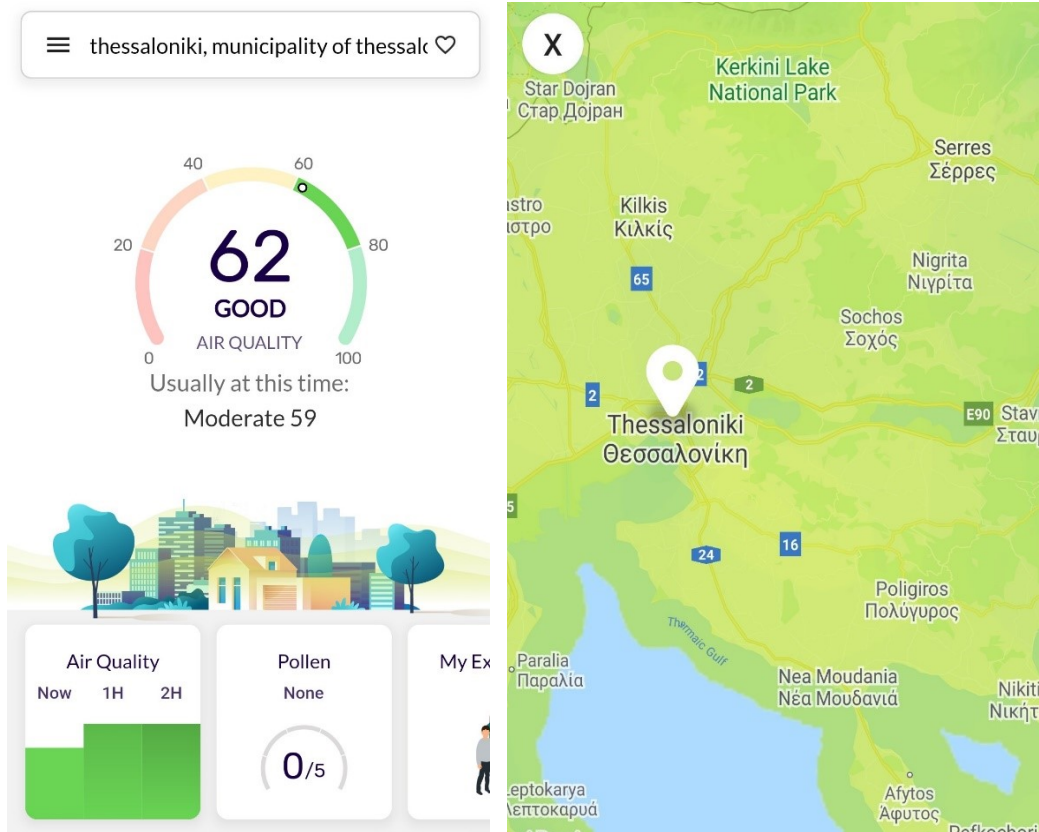
Σχήμα 4.5: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής AIR [100]



Σχήμα 4.6: FLOW 2: Έξυπνη φορητή συσκευή παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο [101]

#### 4.6 BreezoMeter

Η συγκεκριμένη mobile εφαρμογή παρέχει στο χρήστη δεδομένα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, γύρης, καθώς και πληροφορίες σχετικά με συμβάντα πυρκαγιών (μόνο μέσω της επίσημης ιστοσελίδας), σε πραγματικό χρόνο [102]. Πιο συγκεκριμένα, παρέχονται χάρτες θερμότητας της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, καθημερινές πληροφορίες σχετικά με τη γύρη δένδρων διαφόρων ειδών, γρασιδιού και αγριόχορτου, πρόβλεψη καιρικών συνθηκών, προσωποποιημένες πληροφορίες και συστάσεις προς τους χρήστες, ενώ η εταιρεία BreezoMeter ισχυρίζεται πως τα δεδομένα που παρέχει είναι τόσο ακριβή, που συγκρίνει την ίδια με κυβερνητικούς σταθμούς παρακολούθησης [103]. Ακόμη, η εφαρμογή προσφέρει το δικό της προσαρμοσμένο δείκτη ποιότητας αέρα, BreezoMeter Air Quality Index (BAQI), με σκοπό να παρέχει έναν ομογενή τρόπο σύγκρισης των διάφορων δεικτών ποιότητας του αέρα που υφίστανται στον πλανήτη (π.χ. USA AQI, CHINA AQI, EU CAQI κλπ.) [104]. Τέλος, οι υπηρεσίες της εταιρείας έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με οικιακές εμπορικές συσκευές μεγάλων εταιρειών, με σκοπό τη δημιουργία «έξυπνων σπιτιών», αίσθησης της ποιότητας του αέρα [102].



Σχήμα 4.7: Γραφικό περιβάλλον της mobile εφαρμογής του BreezoMeter [103]

Πίνακας 4.1: Σύγκριση mobile εφαρμογών παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών [94], [96], [98], [100], [103]

Mobile εφαρμογές	Ακρίβεια δεδομένων	Αριθμός μετρούμενων ρύπων	Χρονικό περιθώριο πρόβλεψης δεδομένων	Προσαρμοσμένος δείκτης AQI	Παροχή API για χρήση τρίτων	Υλοποιημένη εμπορική συσκευή
AirVisual	Πολύ καλή	6	7 ημέρες	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sh**t! I Smoke	Μέτρια	6	Κανένα	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ENVI4ALL	Πολύ καλή	6	3 ημέρες	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
AIR	Καλή	4	3 ημέρες	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
BreezoMeter	Πολύ καλή	7 (μετράται και η γύρη)	4 ημέρες	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Παραπάνω γίνεται αναφορά στον Πίνακα 4.1 και σε βασικά κριτήρια σύγκρισης των mobile εφαρμογών παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών που επιλέχθηκαν, βάσει σχετικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε, κατόπιν προσωπικής χρήσης των παραπάνω εφαρμογών και αντίστοιχης αξιολόγησής τους. Η ακρίβεια των δεδομένων διαχωρίζεται σε τέσσερα επίπεδα και χαρακτηρίζεται ως «Κακή», «Μέτρια», «Καλή» και «Πολύ καλή». Ο αριθμός μετρούμενων ρύπων αναφέρεται στα επιμέρους δεδομένα διαφορετικών αέριων ρύπων, που προσφέρει η κάθε εφαρμογή αντίστοιχα. Το χρονικό περιθώριο πρόβλεψης δεδομένων παρουσιάζει τον αριθμό ημερών δυνατής πρόβλεψης που παρέχεται από την εκάστοτε εφαρμογή. Επιπλέον, πολλές από τις εταιρείες υλοποίησης των συγκεκριμένων εφαρμογών έχουν προχωρήσει σε σχετικές μελέτες και στατιστικές αναλύσεις, προκειμένου να προσφέρουν έναν προσαρμοσμένο δείκτη AQI στους χρήστες τους, θέλοντας να αυξήσουν την ακρίβεια των παραδοσιακών δεικτών, όπως των US AQI και CN AQI. Κάθε προσαρμοσμένος δείκτης AQI παρέχει δική του κλίμακα αξιολόγησης της ποιότητας του αέρα και ενσωματώνεται στην αντίστοιχη εφαρμογή της εκάστοτε εταιρείας. Ακόμη, καθώς κάποιες από τις εφαρμογές προσφέρουν δυνατότητα χρήσης των δεδομένων τους για εμπορικούς και ερευνητικούς σκοπούς τρίτων με τη χρήση δικού τους API, η σχετική δυνατότητα προστέθηκε ως κριτήριο στον πίνακα σύγκρισης. Τέλος, ορισμένες εφαρμογές μπορούν να συνδυαστούν με συσκευές παρακολούθησης του AQI που έχουν υλοποιηθεί από τις εταιρείες του, προκειμένου να αυξήσουν την ακρίβεια των παραγόμενων δεδομένων ποιότητας του εισπνεόμενου αέρα, σε πραγματικό χρόνο, και να προσφέρουν μία προσωποποιημένη υπηρεσία στον τελικό χρήστη, με το αντίστοιχο κόστος απόκτησής τους.

#### 4.7 Επίλογος

Στο 4ο Κεφάλαιο, μελετήσαμε κάποιες από τις πιο πετυχημένες και ιδιαίτερες mobile εφαρμογές παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, και των ατμοσφαιρικών συνθηκών γενικότερα, που είναι διαθέσιμες για τα λειτουργικά συστήματα Android και iOS. Κάποιες από τις παραπάνω, πέραν του λογισμικού, παρέχουν τη δυνατότητα συνδυασμού του τελευταίου με μία ή περισσότερες συσκευές, με το αντίστοιχο κόστος, προκειμένου να προσφέρουν ολοκληρωμένες και ακριβείς υπηρεσίες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για τον τελικό χρήστη. Τέλος, έχει δημιουργηθεί ένας συγκριτικός πίνακας, όπου παρουσιάζονται σημαντικές ομοιότητες και διαφορές κάθε μίας ξεχωριστής λύσης λογισμικού.

## Κεφάλαιο 5ο: Εφαρμογές ΔτΠ παρακολούθησης και μέτρησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών

### 5.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με χρήση του ΔτΠ έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και μελετάται εκτενώς σε παγκόσμιο επίπεδο. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα ΔτΠ υλοποιημένο προς παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, συνδυάζει ειδικούς αισθητήρες μέτρησης αέριων ρύπων, σχετικά επικοινωνιακά πρωτόκολλα προς μετάδοση αυτών των τιμών μέτρησης, όπως και αρχιτεκτονικές cloud, με σκοπό την επεξεργασία αυτών των μετρήσεων και την κατάλληλη παρουσίασή τους στον τελικό χρήστη μέσω κάποιας διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (API) ή κάποιας διαδικτυακής εφαρμογής, Android, iOS κλπ. Σε πολλές περιπτώσεις, πραγματοποιείται προ-επεξεργασία των δεδομένων που παράγονται από τους εν λόγω αισθητήρες σε τοπικό επίπεδο, ή πιο κοντά σε σχέση με το cloud (edge και fog computing), κάπου στο ενδιάμεσο, προκειμένου τα δεδομένα να φιλτραριστούν και να εξαχθεί η ωφέλιμη πληροφορία που χρειαζόμαστε, αφαιρώντας διπλότυπα και πιθανό θόρυβο.

Πολλές από τις παραπάνω εφαρμογές μπορεί να έχουν απλά ενημερωτικό χαρακτήρα, παροτρύνοντας το χρήστη να ακολουθήσει κάποιες γενικές οδηγίες βάσει των τιμών των αέριων ρύπων που συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα, σε πραγματικό χρόνο, μέσω κάποιας εφαρμογής smartphone (application), άλλες μπορεί να παρέχουν τις μετρήσεις τους στο κοινό μέσω ενός API προς επιστημονική χρήση, ενώ άλλες μπορεί να συνδυάζουν τον ενημερωτικό χαρακτήρα των παραπάνω, με τη λήψη ορισμένων αποφάσεων προς βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Για παράδειγμα, μία υλοποίηση εσωτερικού χώρου μπορεί να χρησιμοποιεί έναν ανεμιστήρα, ο οποίος ξεκινά τη λειτουργία του τη στιγμή που η τιμή κάποιου αέριου ρύπου ξεπεράσει το ορισμένο επιτρεπτό όριο (threshold), ενώ μία υλοποίηση εξωτερικού χώρου, σε περίπτωση ανάγκης, μπορεί να ειδοποιεί εγκαίρως τις αρμόδιες αρχές προς διαχείριση της κατάστασης.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε επιστημονικά άρθρα και δημοσιεύσεις που σχετίζονται με αρχιτεκτονικές ΔτΠ για τη μέτρηση της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών και κατ' επέκταση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, χρησιμοποιώντας διαφορετικά τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα, τεχνολογίες, αισθητήρες και τρόπους υλοποίησης ΔτΠ. Καθώς, ο σκοπός δημιουργίας της κάθε εφαρμογής διαφέρει, οι λύσεις σχετικά με τον τρόπο σχεδιασμού και υλοποίησης του κάθε συστήματος ποικίλουν. Οι εφαρμογές έχουν χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες, εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, ενώ με τη σειρά τους χωρίζονται σε υποκατηγορίες πραγματικού (real time) ή μη πραγματικού χρόνου (non-real time) και σε μικρής ή μεγάλης εμβέλειας, όσον αφορά την επιλογή τηλεπικοινωνιακού πρωτοκόλλου μεταφοράς των πληροφοριών στις εφαρμογές εξωτερικού χώρου. Στις τελευταίες, επίσης, περιγράφονται διαφορετικές υλοποιήσεις συστημάτων ΔτΠ για τη μέτρηση της ποιότητας του αέρα, εγκατεστημένων, αντίστοιχα, σε οχήματα, όπως αυτοκίνητα, ποδήλατα, μέσα μαζικής μεταφοράς και drones, καθώς και υλοποιήσεις στατικών και συνδυαστικά υλοποιημένων συστημάτων.

Οι επιστημονικές μελέτες που παρουσιάζονται παρακάτω χωρίστηκαν αντίστοιχα σε δύο παραγράφους, όπου αρχικά πραγματοποιείται μία περίληψη των σημαντικότερων στοιχείων τους και στη συνέχεια μία σχετική αναφορά των αποτελεσμάτων τους.

## 5.2 Εφαρμογές εσωτερικού χώρου

### 5.2.1 Πραγματικού χρόνου

#### *Σύστημα ΔτΠ παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο – Εφαρμογή στο Μπαγκλαντές [57]*

Καθώς η ποιότητα του αέρα του Μπαγκλαντές κρίνεται κακή λόγω περιστατικών διαρροής αερίου και άλλων φαινομένων, ειδικότερα στην πόλη της Ντάκα, η δημιουργία ενός συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο θεωρήθηκε επιτακτική από τους Ahmed, Banu και Paul, και έτσι προχώρησαν στη σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος. Χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό ειδοποίησης έκτακτης ανάγκης χάρη σε μία αρχιτεκτονική του ΔτΠ, το σύστημα επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν, σε πραγματικό χρόνο, την ποιότητα του αέρα του σπιτιού τους ή κάποιου άλλου προσωπικού τους χώρου. Σε ακραίες περιπτώσεις, όπου απειλείται η ζωή του χρήστη, ενεργοποιείται ένας συναγερμός. Η υλοποίηση έγινε πραγματικότητα χάρη στους αισθητήρες MQ-2, MQ-3 και MQ-7 για τη μέτρηση της συγκέντρωσης διάφορων αερίων, όπως και του μικροελεγκτή Intel Edison. Ακόμη, ένας βομβητής (buzzer) και ένα λαμπάκι τύπου LED, ενσωματώθηκαν στο όλο κύκλωμα, προσφέροντας ήχο και προειδοποιητικό φως σε περίπτωση ανίχνευσης ανθυγιεινής ποιότητας αέρα. Αφού συνδέθηκε ο μικροελεγκτής στο διαδίκτυο μέσω Wi-Fi, χρησιμοποιήθηκε το ανοικτό λογισμικό, SSH/TELNET πελάτη (client), PUTTY, προκειμένου να εγκαθιδρυθεί μία σύνδεση SSH με τον πρώτο, και να εκτελεστεί ο κώδικας των ερευνητών, ολοκληρώνοντας με την εγκατάσταση του flask (micro framework της Python).

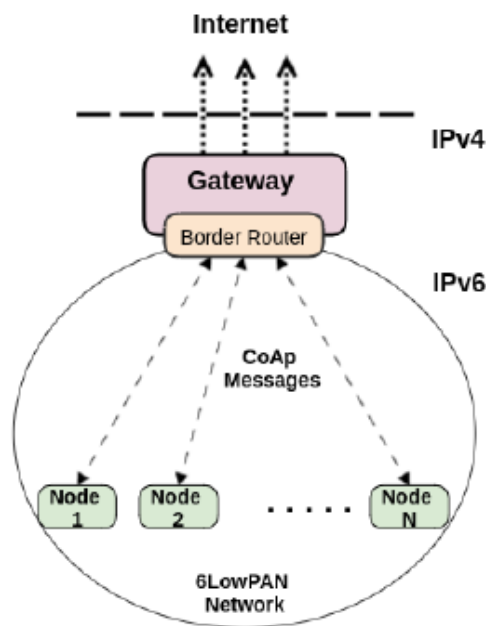
Σε πειραματικό επίπεδο, οι ερευνητές δοκίμασαν το παραπάνω σύστημα εγκατεστημένο δίπλα στο φούρνο μίας οικιακής κουζίνας αερίου. Συνήθως, στο Μπαγκλαντές, χρησιμοποιείται φυσικό αέριο, του οποίου το βασικό συστατικό είναι το μεθάνιο. Το σύστημα λειτούργησε ορθώς παρουσιάζοντας μέσω της πλατφόρμας χρήστη τα αντίστοιχα επίπεδα μεθανίου και μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα της κουζίνας, ενώ αντίστοιχα πυροδοτήθηκε ο βομβητής (buzzer) και το λαμπάκι τύπου LED όταν εντοπίστηκε υψηλή συγκέντρωση των παραπάνω αερίων στο χώρο. Το σύστημα, αν και φθινό από άποψη κόστους, αποδείχθηκε αποτελεσματικό, ενώ χάρη σε αυτό μπορεί να σωθούν ανθρώπινες ζωές στο μέλλον. Τέλος, οι ερευνητές προτείνουν ως μελλοντική βελτίωση του συστήματος, την προσθήκη δυνατότητας ανίχνευσης πίεσης αέρα λέβητα, με σκοπό την περαιτέρω αποφυγή ατυχημάτων.

#### *Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου, χρησιμοποιώντας τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων και την πλατφόρμα Ubidots [105]*

Οι Esquiagola, Manini, Aikawa, Yoshioka και Zuffo του πανεπιστημίου Sao Paulo της Βραζιλίας, μελέτησαν την ποιότητα του αέρα εσωτερικά του κτηρίου CIETEC του πανεπιστημίου τους, υλοποιώντας ένα δικό τους σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα των εσωτερικών χώρων του. Επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν ένα Raspberry Pi 3 ως το gateway που πραγματοποιεί τα αιτήματα, προκειμένου να λάβει τα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες μέτρησης των αερίων. Ακόμη, το σύστημά τους αποθηκεύει όλα τα δεδομένα σε μία τοπική βάση δεδομένων MariaDB και μπορεί να εκτελεί ορισμένες εργασίες (processing tasks). Ως λειτουργικό σύστημα έχει επιλεγθεί το Raspbian Linux. Σε δεύτερο επίπεδο, βρίσκεται ένα border router, το οποίο είναι υπεύθυνο της εγκαθίδρυσης σύνδεσης μεταξύ των αισθητήρων και του gateway, ενώ μπορεί να θεωρηθεί ως διεπαφή μεταξύ δικτύων IPv6 και IPv4. Τέλος, με χρήση του πρωτοκόλλου RPL δημιουργείται ένα δίκτυο IPv6. Το

συγκεκριμένο σύστημα είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει έως δέκα διαφορετικούς αισθητήρες. Το gateway είναι υπεύθυνο για την όποια προεπεξεργασία των παραγόμενων δεδομένων, όπως και για την αποστολή τους στο cloud. Η απεικόνιση (visualization) των δεδομένων γίνεται μέσω της πλατφόρμας ΔτΠ Ubidots. Ακόμη, προκειμένου να είναι δυνατή η σύνδεση στη συγκεκριμένη πλατφόρμα, παρέχεται υποστήριξη API σε τρίτους, ενώ υποστηρίζονται τα πρωτόκολλα MQTT, HTTP, TCP και UDP.

Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζουν αύξηση των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), καθώς και της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα εσωτερικά του κτηρίου κατά τις μεσημεριανές ώρες, στιγμές τις ημέρας όπου επιστρέφει ο κόσμος στις αίθουσες μετά το μεσημεριανό. Οι εν λόγω αυξημένες τιμές VOCs, πιθανώς οφείλονται στην παρουσία πολλών ατόμων ταυτοχρόνως στο γραφείο, καθώς όλοι οι άνθρωποι παράγουμε VOCs από τη φύση μας.



Σχήμα 5.1: Αρχιτεκτονική συστήματος ΔτΠ [105]



Σχήμα 5.2: Πίνακας ελέγχου (dashboard) της εσωτερικής ποιότητας του αέρα στην πλατφόρμα ΔτΠ Ubidots [105]

***Ευφυής αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, σε ενσωματωμένη πλατφόρμα περιορισμένων πόρων [92]***

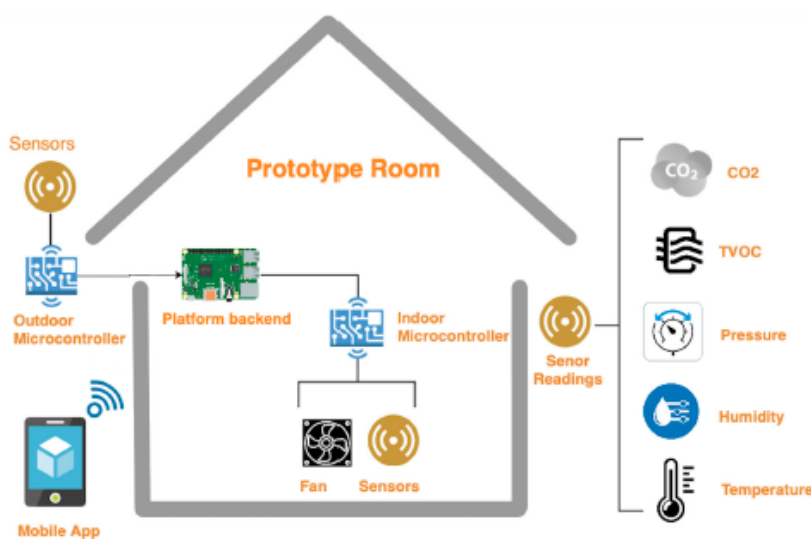
Οι Ahmadinia και Alexandrona σχεδίασαν ένα πλήρες, ευέλικτο και χαμηλού κόστους σύστημα παρακολούθησης και αξιολόγησης του αέρα εσωτερικών χώρων, σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας (DHT-11) και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (MQ-135), συνδεδεμένους σε ένα Arduino Uno. Με τη δημιουργία και χρήση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου ενσωματωμένου σε έναν έξυπνο ελεγκτή, μπορεί να εκτιμηθεί ο βαθμός άνεσης του τελικού χρήστη βάσει της θερμοκρασίας, της υγρασίας, και της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στο χώρο, με σκοπό την αυτόματη προσαρμογή των συστημάτων κλιματισμού προς ρύθμιση της ποιότητας του αέρα. Η αλληλεπίδραση χρήστη και αισθητήρων πραγματοποιείται μέσω μίας διεπαφής web (web interface). Ένα λογισμικό διακομιστή cloud χρησιμοποιείται με σκοπό την παραμετροποίηση των αισθητήρων, ώστε να δέχονται δεδομένα και να συνδέονται με τις συσκευές των τελικών χρηστών μέσω του πρωτοκόλλου Bluetooth. Τέλος, μία mobile εφαρμογή παρουσιάζει στο χρήστη πληροφορίες σχετικά με τις μετρήσεις, καθώς, επίσης, παρέχει ένα σύστημα συναγερμού σε περίπτωση κακής ποιότητας του αέρα.

Το σύστημα λειτούργησε επιτυχώς, ενώ, αφού ολοκληρώθηκε η εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν ίσο με 0,0002 που επιτρέπει 100% ακρίβεια της αξιολόγησης.

***Πλατφόρμα ΔτΠ πολλαπλών αισθητήρων για τη βελτιστοποίηση των επιπέδων εσωτερικής ποιότητας του αέρα, IAQ, σε κτήρια μέσω ενός έξυπνου συστήματος εξαερισμού [106]***

Οι Chiesa, Cesari, Garcia, Issa και Li, παρουσιάζουν ένα διαφορετικό σύστημα παρακολούθησης και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, χρησιμοποιώντας δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό να μοντελοποιήσουν την ποιότητα του αέρα ενός εσωτερικού χώρου και, με ακρίβεια, να ελέγξουν, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, το σύστημα εξαερισμού μέσω αλγορίθμων, ώστε να διατηρήσουν την ποιότητα αέρα του εσωτερικού χώρου, ισορροπώντας τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού περιβάλλοντος. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος προσφέρονται ως REST Web APIs μέσω της χρήσης αιτημάτων HTTP. Περιβαλλοντικά δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα, πτητικών οργανικών ενώσεων, θερμοκρασίας, υγρασίας και βαρομετρικής πίεσης (DFRobot BME680 αισθητήρας περιβάλλοντος 4-σε-1 - Shanghai, Κίνα), μεταδίδονται χάρη στο πρωτόκολλο MQTT, προκειμένου να υπολογισθεί ο δείκτης ποιότητας του αέρα και να τροφοδοτηθούν αντίστοιχα οι αλγόριθμοι ελέγχου του συστήματος, ενώ οι δύο ανεξάρτητες βάσεις δεδομένων του συστήματος είναι βασισμένες στη MongoDB. Το MQTT προσφέρει αξιοπιστία και διασφάλιση της παράδοσης των δεδομένων. Ακόμη, το Raspberry Pi 3B+ που χρησιμοποιήθηκε, επιλέχθηκε ως κύρια μονάδα (master unit) για να ελέγχει τη συνολική λειτουργία του συστήματος, ενώ το Arduino Uno R3 είναι αρκετά ισχυρό για να χειριστεί τις σχετικές εργασίες απόκτησης και προ-επεξεργασίας των εξαρτημένων μονάδων (slave units), εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Η ενσωματωμένη δυνατότητα Wi-Fi του Raspberry Pi 3B+, χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σημείου πρόσβασης (hotspot) προς σύνδεση των μικροϋπηρεσιών με μία εξωτερική συσκευή που εκτελεί την Android mobile εφαρμογή. Τέλος, η απεικόνιση των δεδομένων γίνεται μέσω της παραπάνω εφαρμογής, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο από ειδικούς στον τομέα της ποιότητας του αέρα όσο και από αρχάριους χρήστες, αφού παρουσιάζει διαφορετικά δεδομένα βάσει προφίλ χρήσης, και προσφέρει δυνατότητες παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος.

Κατά την ολοκλήρωση του συστήματος, πραγματοποιήθηκαν ρεαλιστικά πειράματα διαφορετικών πιθανών οικιακών καταστάσεων, προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργικότητά του σε πραγματικές συνθήκες. Τελικά, οι ερευνητές συμπεραίνουν πως τα επίπεδα όλων των αέριων ρύπων ελέγχθηκαν μέσω αποτελεσματικού εξαερισμού, ώστε να παρέχουν ένα υγιές και ασφαλές εσωτερικό περιβάλλον, ρυθμίζοντας ορθά τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Η υλοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε ένα μικρό κιβώτιο-πρωτότυπο, φτάνοντας σε τεχνολογικά επίπεδα ετοιμότητας (Technology Readiness Level - TRL) 3 με 4. Όπου το Επίπεδο 3 χαρακτηρίζεται από την αναλυτική και πειραματική κριτική λειτουργία και/ή χαρακτηριστική απόδειξη της έννοιας (proof-of-concept) και το Επίπεδο 4 από την επικύρωση συστατικών μερών και/ή πλακέτα διασύνδεσης (breadboard) σε εργαστηριακό περιβάλλον [107].

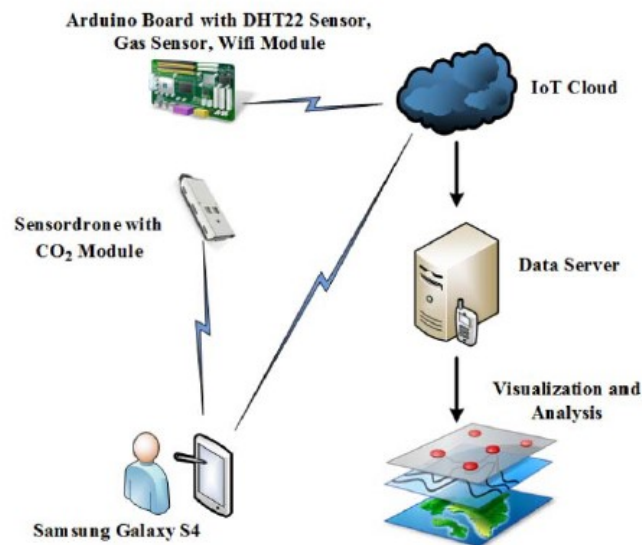


Σχήμα 5.3: Επισκόπηση του ανεπτυγμένου συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την δοκιμαστική περίπτωση του πειράματος [106]

### **SmartVent: Ένα σύστημα ΔτΠ για τη μέτρηση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων και του ρυθμού εξαερισμού τους [108]**

Οι Lohani και Acharya προτείνουν ένα σύστημα ΔτΠ για τη μέτρηση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων βασισμένο σε smartphones, και παρουσιάζουν δύο διαφορετικούς τρόπους αίσθησης και ανάλυσης των ατμοσφαιρικών δεδομένων. Μία εγκατάσταση Arduino με αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας (DHT-22) και διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και έναν εμπορικό αισθητήρα συμβατό με Android smartphones, που ονομάζεται Sensordrone, με χρήση του πρωτοκόλλου Bluetooth. Η εγκατάσταση με το Arduino χρησιμοποιήθηκε σε πανεπιστημιακές αίθουσες, όπου μπορούσε να ενσωματωθεί σε κάποιο σταθερό σημείο, αποστέλλοντας τα παραγόμενα δεδομένα μέσω Wi-Fi (μονάδα ESP8266) στο cloud, ενώ η κινητή εγκατάσταση με χρήση του Sensordrone χρησιμοποιήθηκε σε περιοχές, όπου δεν ήταν εφικτή η στατική τοποθέτηση της εγκατάστασης.

Το διοξείδιο του άνθρακα λαμβάνεται ως αέριο ανιχνευτής (tracer gas) και παρατηρείται η αύξηση και η μείωσή του, προκειμένου τόσο ο ρυθμός αλλαγής του αέρα όσο και ο ρυθμός εξαερισμού να μπορούν να υπολογισθούν. Έπειτα από μία σειρά πειραμάτων και σχετικής ανάλυσης, οι ερευνητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση του παραπάνω συνδυαστικού συστήματος, διορθωτικά μέτρα όσον αφορά τον επαρκή εξαερισμό των εσωτερικών χώρων, μπορούν να παρθούν σε πραγματικό χρόνο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο χρήστη μέσω μίας εφαρμογής Android.



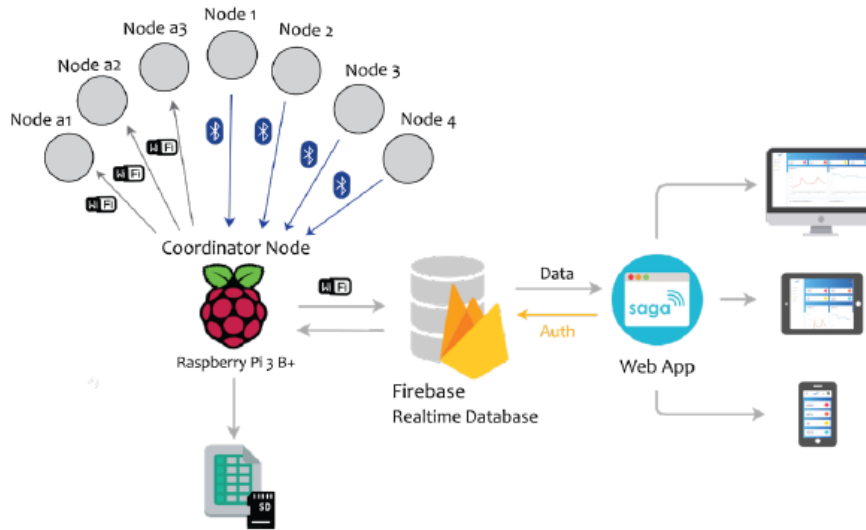
Σχήμα 5.4: Πλαίσιο (framework) ΔτΠ για την παρακολούθηση και την ανάλυση της εσωτερικής ποιότητας του αέρα [108]

#### ***Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου για την πρόληψη της πυροδότησης αναπνευστικής δυσφορίας [55]***

Οι Rodrigues, Postolache και Cercas σχεδίασαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης και βελτίωσης της ποιότητας της ζωής σε εσωτερικούς χώρους, τόσο για άτομα με αναπνευστικά ζητήματα, όπως το άσθμα, όσο και για υγιή άτομα, έχοντας ως γνώμονα όχι μόνο την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα που αναπνέουν, αλλά και τον επαρκή φωτισμό του χώρου, καθώς και την ελάττωση υψηλών επιπέδων έντασης ήχου. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά σε μία έρευνα όπου σημειώνεται η σημαντικότητα των σωστών επιπέδων φωτός και ήχου στο εσωτερικού ενός χώρου. Τα κοινά συμπτώματα κακού επιπέδου των παραπάνω συμπεριλαμβάνουν μεταξύ άλλων πονοκεφάλους, κόπωση, δύσπνοια, βήχα και ζάλη, δημιουργώντας αρνητικό αντίκτυπο στην ευημερία ενός ατόμου. Έτσι, σε πραγματικό χρόνο παρακολουθούνται τα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας (Si7021) του εσωτερικού χώρου, οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων, όπως μονοξειδίου του άνθρακα, αμμωνίας (MQ-135) και μεθανίου (MQ-4 και MQ-9) και προειδοποιείται ο χρήστης όταν ορισμένες παράμετροι ποιότητας του αέρα υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια που έχουν τεθεί, ενεργοποιώντας παράλληλα ένα σύστημα εξαερισμού και έναν υγραντήρα (humidifier), με σκοπό τη μείωση της συγκέντρωσης αέριων ρύπων, ενώ την ίδια στιγμή, ένα έξυπνο σύστημα φωτισμού προσαρμόζει το επίπεδο και το χρώμα του εσωτερικού φωτισμού καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμη, τα επίπεδα ήχου παρακολουθούνται με τη βοήθεια ενός ειδικού αισθητήρα, επίσης, προς ενημέρωση του χρήστη, όταν αυτό θεωρηθεί αναγκαίο. Οι αισθητήρες προωθούν τα δεδομένα μέτρησής τους μέσω Bluetooth σε ένα Raspberry Pi 3 B+, που λειτουργεί ως συντονιστής των αισθητήρων. Το Raspberry Pi, με τη σειρά του, προωθεί τα δεδομένα στην cloud πλατφόρμα Google Firebase. Τέλος, για να είναι εφικτή η ανάλυση και η παρουσίαση των δεδομένων, καθώς και ο πλήρης απομακρυσμένος έλεγχος του συστήματος, έχει υλοποιηθεί μία εφαρμογή Web, που ονομάστηκε Saga.

Λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εσωτερικού χώρου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς κόμβους αισθητήρων

τοποθετημένους σε διαφορετικές τοποθεσίες του. Μετρήθηκαν τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας και εφαρμόστηκαν ορισμένες στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας σε κάθε κόμβο με σκοπό την επέκταση της ενεργειακής αυτονομίας τους. Το σύστημα αποδείχθηκε ικανό να φέρει εις πέρας τις εργασίες για τις οποίες υλοποιήθηκε, όντας πλήρως λειτουργικό σε πραγματικές συνθήκες και πραγματικό χρόνο.



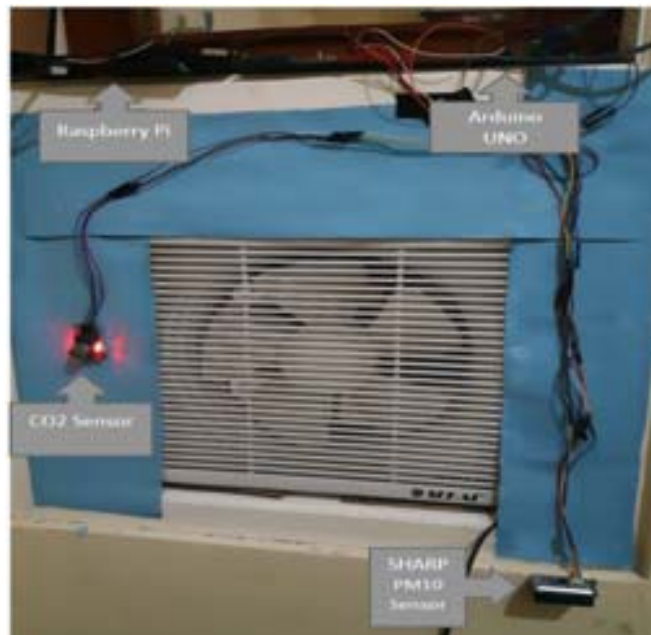
Σχήμα 5.5: Η αρχιτεκτονική του συστήματος [55]

### ***Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου Ποιότητας Εσωτερικού αέρα βασισμένο στο ΔτΠ και την Ασαφή Λογική [109]***

Το σύστημα ΔτΠ παρακολούθησης, ελέγχου και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, που παρουσιάζουν οι Pradityo και Surantha, ισορροπεί τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (MQ-135) και αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> (Sharp GP2Y1010AU0F), χάρη στη βοήθεια ενός ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται με ασαφή λογική, με σκοπό τον έλεγχο του διαστήματος (interval) λειτουργίας του ανεμιστήρα, βάσει της συγκέντρωσης των βλαβερών αερίων στο χώρο. Όλοι οι αισθητήρες συνδέονται σε ένα Arduino UNO, όπου το αναλογικό σήμα των μετρήσεων μετατρέπεται σε ψηφιακό, και στη συνέχεια τα παραγόμενα δεδομένα προωθούνται σε ένα Raspberry Pi 3 μέσω σειριακού καλωδίου. Με τη σειρά του το τελευταίο επεξεργάζεται τα δεδομένα κάνοντας χρήση ασαφούς λογικής, και στη συνέχεια τα αποστέλλει, μέσω μίας Wi-Fi σύνδεσης, στο AWS cloud, χάρη στο πρωτόκολλο MQTT. Οι αποθηκευμένες, πλέον, πληροφορίες, παρουσιάζονται σε έναν πίνακα ελέγχου (dashboard) μέσω του εργαλείου απεικόνισης ανοιχτού κώδικα Kibana, ενώ είναι προσβάσιμες μέσω υπολογιστή ή smartphone. Ο πίνακας ελέγχου αποτελείται από τον δείκτη ποιότητας του αέρα (AQI) βάσει PM<sub>10</sub>, τον AQI βάσει διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και από ένα γράφημα πραγματικού χρόνου των τιμών PM<sub>10</sub> και CO<sub>2</sub> στο περιβάλλον του δωματίου.

Οι ερευνητές προχώρησαν σε τρία βασικά πειράματα βασισμένα σε τρεις διαφορετικές πιθανές περιπτώσεις κατάστασης, συγκρίνοντας την απόδοση του συστήματός τους με αυτή ενός συμβατικού συστήματος εξαερισμού, όπου ο ανεμιστήρας λειτουργεί συνεχώς, ανεξαρτήτως κατάστασης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Πρώτη περίπτωση αποτελεί αυτή της ύπαρξης υψηλής περιεκτικότητας CO<sub>2</sub> και χαμηλής περιεκτικότητας PM<sub>10</sub> στο χώρο. Ως δεύτερη περίπτωση επιλέχθηκε το ακριβώς αντίθετο, με την περιεκτικότητα PM<sub>10</sub> να είναι σε υψηλά επίπεδα, και το CO<sub>2</sub> σε χαμηλά, αντίστοιχα, ενώ, τέλος, η περίπτωση υψηλής περιεκτικότητας και των δύο στον αέρα του εσωτερικού χώρου. Το σύστημα αποδείχθηκε άκρως αποτελεσματικό για τη διατήρηση καλής ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου, με τη διάσπαση PM<sub>10</sub> να πραγματοποιείται σε μικρότερο χρόνο συγκριτικά με αυτή

του CO<sub>2</sub>. Ακόμη, συγκριτικά με το συμβατικό σύστημα, η συγκεκριμένη υλοποίηση εξισορροπεί τον AQI για περισσότερη ώρα, καθώς, επίσης, εξοικονομεί ενέργεια ενεργοποιώντας τον ανεμιστήρα μόνο όταν ο AQI είναι σε μη φυσιολογικά επίπεδα, και αυτό καθίσταται αναγκαίο.

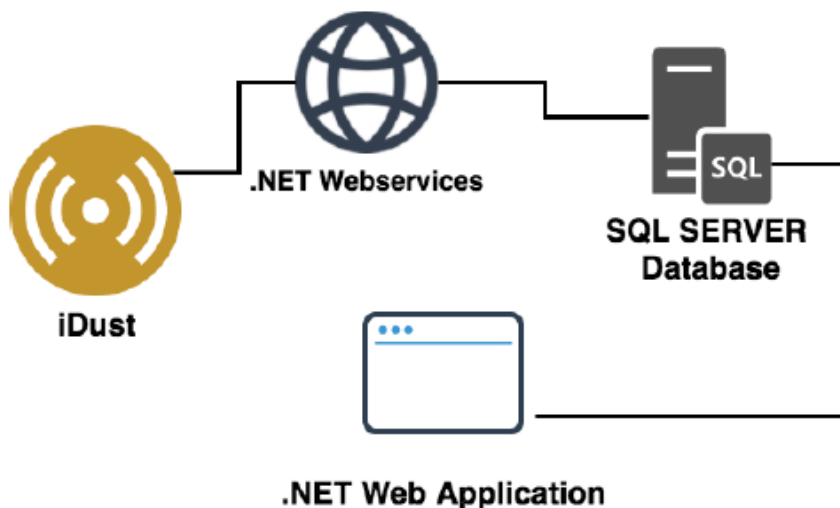


Σχήμα 5.6: Υλοποίηση Συστήματος [109]

***Ένα σύστημα βασισμένο στο ΔτΠ για την παρακολούθηση αιωρούμενων σωματιδίων σε κτήρια, σε πραγματικό χρόνο [110]***

Το επωνομαζόμενο σύστημα iDust, που παρουσιάζουν οι Marques, Ferreira, και Pitarma, αποτελεί ένα σύστημα βασισμένο σε τεχνολογίες ανοιχτού κώδικα για την παρακολούθηση αιωρούμενων σωματιδίων, στο εσωτερικό κτηρίων, σε πραγματικό χρόνο. Η υλοποίηση χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα πρωτότυπο υλικού με σκοπό τη συλλογή των δεδομένων περιβάλλοντος, και μία διαδικτυακή πύλη, υλοποιημένη σε .NET, για υπηρεσίες παρουσίασης και δημιουργίας ειδοποιήσεων, βάσει των δεδομένων, προς τον χρήστη, σε περίπτωση υπέρβασης κάποιου ορίου τιμής μίας μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων. Ο μικροελεγκτής WEMOS D1 με ενσωματωμένη δυνατότητα συνδεσιμότητας Wi-Fi, χρησιμοποιείται ως μονάδα επικοινωνίας, αλλά και επεξεργασίας, αποστέλλοντας τα παραγόμενα δεδομένα μέτρησης στο cloud, ενώ είναι πλήρως συμβατός με την πλατφόρμα Arduino IDE, η οποία χρησιμοποιείται για ανάπτυξη λογισμικού. Ένας αισθητήρας μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων (PMS5003) συνδεδεμένος στον μικροελεγκτή, είναι υπεύθυνος για τη μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων διαμέτρου PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>1.0</sub> (διάμετρος μικρότερη ή ίση του ενός μικρού - micron).

Το iDust, σύμφωνα με τους ερευνητές, υπερέρχει ως σύστημα συγκριτικά με τον ανταγωνισμό, λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής, εγκατάστασης και επεκτασιμότητάς του, ενώ παρέχει εύκολη πρόσβαση σε δεδομένα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, σε πραγματικό χρόνο, μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής του. Τα αποτελέσματα των σχετικών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζουν ένα λειτουργικό εργαλείο ικανό να συνεισφέρει στην υγεία των πολιτών, βελτιώνοντας την ποιότητα της ζωής τους.



Σχήμα 5.7: Αρχιτεκτονική συστήματος iDust [110]

**Σχεδιασμός και υλοποίηση ενός ανιχνευτή ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου, που βασίζεται στο ΔτΠ με πολλαπλές διεπαφές επικοινωνίας [63]**

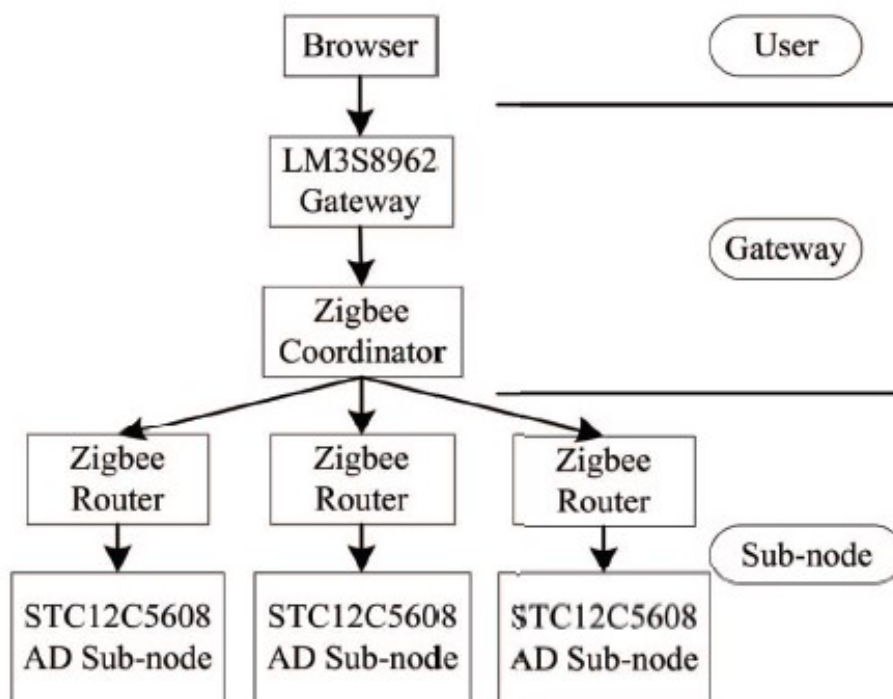
Το σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου που παρουσιάζουν οι Zhao, Wu και Li, χρησιμοποιεί αισθητήρες, θερμοκρασίας και υγρασίας (SHT30), αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> (PM5003), διοξειδίου του άνθρακα (S80053, SenseAir - Σουηδία) και φορμαλδεΰδης (WZ-S-K), που μπορούν να ανιχνεύσουν τις σχετικές τιμές βλαβερών αέριων ρύπων σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας πολλαπλές διεπαφές επικοινωνίας, προκειμένου να καλυφθούν όλα τα πιθανά σενάρια εφαρμογών. Έτσι, το σύστημα προσφέρει τόσο ενσύρματη όσο και ασύρματες λειτουργίες. Η ενσύρματη τεχνολογία επικοινωνίας που χρησιμοποιείται είναι το Modbus. Οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, μικρής εμβέλειας με χρήση του πρωτοκόλλου LoRa και μεγάλης εμβέλειας μετάδοσης στην πλατφόρμα cloud, με χρήση GPRS, Wi-Fi, και NB-IoT. Σε σύγκριση με συστήματα που χρησιμοποιούν μόνο ένα ή λιγότερους αισθητήρες, η ενσωμάτωση πολλαπλών αισθητήρων μπορεί να παρακολουθεί το εσωτερικό περιβάλλον σε επίπεδο διαφορετικών διαστάσεων και το εσωτερικό περιβάλλον μπορεί να αξιολογηθεί καλύτερα μέσω της συγχώνευσης δεδομένων (data fusion). Ακόμη, η ενσωμάτωση πολλαπλών διεπαφών επικοινωνίας στο σύστημα, προσφέρει δυνατότητες χρήσης του τόσο σε σενάρια παρακολούθησης ενός δωματίου όσο και σε αυτά ολόκληρων κτιρίων. Ένας μικροελεγκτής STM32F103C8T6 είναι υπεύθυνος για την εναλλαγή τρόπου λειτουργίας του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής ενσύρματης ή ασύρματης επικοινωνίας, καθώς και για τη διαμόρφωση ασύρματων μονάδων (modules) και ανιχνευτών ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου. Τα δεδομένα ποιότητας του αέρα είναι διαθέσιμα για τους χρήστες του συστήματος μέσω μίας mobile εφαρμογής ή μέσω μίας ιστοσελίδας υπό τη μορφή web εφαρμογής.

Έπειτα από μία σειρά πειραμάτων, οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης υποδεικνύουν την αξιοπιστία και την υψηλή απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, προσδίδοντας καλύτερη κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης της ποιότητας του αέρα.

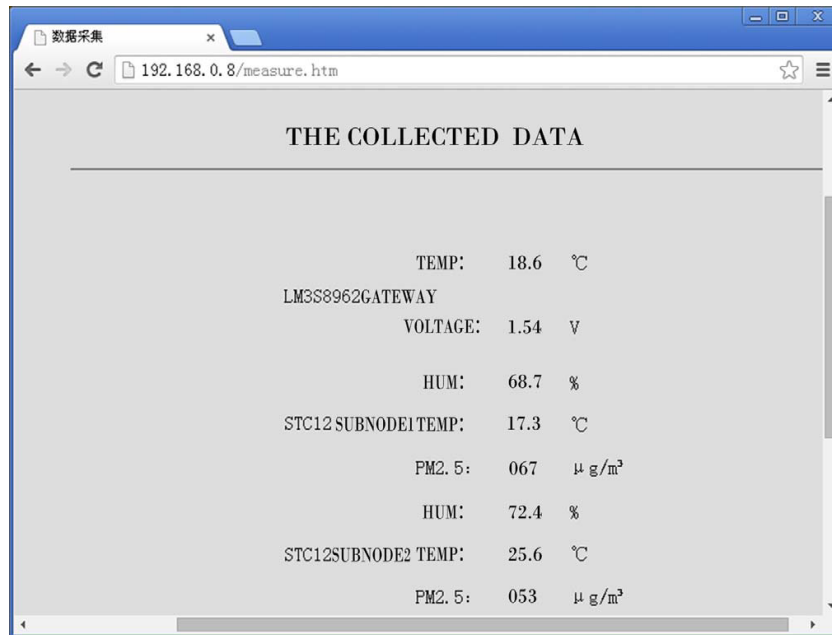
### Σχεδιασμός συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα που βασίζεται στο ΔτΠ και το πρωτόκολλο ZigBee [111]

Οι Wang, Jiang και Dan, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο επικοινωνίας ZigBee, ως αντικαταστάτη του Wi-Fi, προσφέροντας υψηλή ασφάλεια, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και άλλα πλεονεκτήματα, σε βάθος χρόνου. Το σύστημα χωρίζεται σε δύο μέρη, πυλών (gateways) και υποκόμβων (sub-nodes). Ως βασική πύλη συλλογής δεδομένων και δικτυακής μετάδοσης, χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής LM3S8962 αρχιτεκτονικής Cortex-M3 v7M, όπου σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο LwIP (Lightweight IP), συνδέεται στο Διαδίκτυο αποκτώντας αυτόματα μία διεύθυνση IP. Τσιπ STC12C5608AD χρησιμοποιούνται ως μονάδες βασικού ελέγχου, διαθέτοντας έναν αισθητήρα AM2305 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας, όπως και έναν οπτικό αισθητήρα σκόνης GP2Y1010AU0F για τη μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Μία μονάδα ZigBee CC2530 είναι υπεύθυνη για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων, ενώ μία οθόνη LCD5110 αναλαμβάνει το ρόλο της μονάδας παρουσίασης, στο άκρο της αρχιτεκτονικής. Σε επίπεδο λογισμικού, αρχικά δημιουργήθηκαν στατικές ιστοσελίδες με τη χρήση του λογισμικού Dreamweaver, ενώ, στη συνέχεια, με τη βοήθεια της ανοικτής πλατφόρμας Διαδικτύου των Πραγμάτων Yeelink, και ενός σχετικού API που η ίδια παρέχει, δημιουργείται μία δεύτερη υλοποίηση λογισμικού, έτσι ώστε να προστεθεί η δυνατότητα περιήγησης των δεδομένων ενδιαφέροντος μέσω του διαδικτύου.

Κατόπιν σχετικής πειραματικής δοκιμής του συστήματος, παρατηρείτε πως οι τιμές των δεδομένων που παράγονται και συλλέγονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος είναι πολύ σταθερές, αποδεικνύοντας τη σταθερότητα της απόκτησης των μετρούμενων δεδομένων, μέσω της παρουσίας τους στη διεπαφή ελέγχου συσκευής του υπολογιστή, όπως και στην ανοικτή πλατφόρμα Yeelink, καθώς και τη σταθερότητα του συστήματος συνολικά.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα δομής συστήματος [111]



Σχήμα 5.9: Διεπαφή απόκτησης δεδομένων του υπολογιστή [111]



Σχήμα 5.10: Σελίδα προβολής της πλατφόρμας Yeelink μέσω του φυλλομετρητή Google Chrome [111]

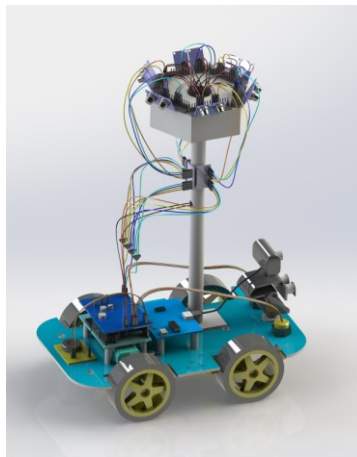
## 5.2.2 Μη πραγματικού χρόνου

### *Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα για ευάλωτες ομάδες, σε κατοικημένα περιβάλλοντα, με τη χρήση ανιχνευτή αερίου πολλαπλών κινδύνων [1]*

Οι Wu, Yujiao, Liu, Ling, Szymanski, Zhang και Su παρουσιάζουν ένα έξυπνο σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για εσωτερικούς χώρους, εγκατεστημένο σε ένα μικρό αμαξίδιο-ρομπότ που μπορεί να ελεγχθεί εξ αποστάσεως. Πάνω στο συγκεκριμένο ρομπότ μπορούμε να παρατηρήσουμε μία κάμερα, ένα ηχείο, αισθητήρες υπερήχων και υπερύθρων, καθώς και έναν μικροελεγκτή Arduino, ενώ η υλοποίηση έχει χωριστεί σε τρία βασικά μέρη υλικού (hardware): κεντρικής πλακέτας, διεπαφής πελάτη και συστήματος έξυπνης όσφρησης (e-nose system). Το σύστημα δοκιμάστηκε σε ελεγχόμενο περιβάλλον, προκειμένου να εξεταστεί η ακρίβεια των αισθητήρων του και η αντίστοιχη ευαισθησία τους σε διαφορετικές οσμές (αέρια). Το συγκεκριμένο κινούμενο ρομπότ (Multiple Hazard Gas Detector - MHGD), μπορεί να λειτουργήσει είτε ως συμβατικός ανιχνευτής οικιακού αερίου, εντοπίζοντας τυχόν πιθανά επικίνδυνα αέρια, είτε ως ανιχνευτής μείγματος

επικίνδυνων αερίων αντικαθιστώντας διαφορετικούς συνδυασμούς αισθητήρων στην ειδικά σχεδιασμένη υποδοχή (socket), η οποία χρησιμοποιεί βιονικά στοιχεία (bionics) στο πάνω μέρος της συσκευής για να εστιάσει στην ανίχνευση και στην ταξινόμηση συγκεκριμένων αερίων. Το σύστημα περιορίζεται σε χωρητικότητα έως δώδεκα αισθητήρων. Με χρήση αλγορίθμου MM, το MHGD αποφασίζει το πότε θα αποστείλει ένα μήνυμα συναγερμού (alarm) στο χρήστη. Το παραπάνω πραγματοποιείται με την αποστολή κατάλληλου σήματος μέσω του πρωτοκόλλου Wi-Fi σε έναν βομβητή συναγερμού (buzzer alarm) προς ειδοποίηση του χρήστη. Τέλος, έχουν υλοποιηθεί mobile εφαρμογές, καθώς και μία για PC, ωστόσο παρέχουν μόνο ένα απλό περιβάλλον πρόσβασης και ελέγχου του συστήματος.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου συστήματος αποδείχθηκε πολύ υψηλή (τουλάχιστον 99%), ενώ σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε ανοιχτούς χώρους η ακρίβεια ήταν επαρκής (70%). Μελλοντικά, οι ερευνητές επιθυμούν να σχεδιάσουν μία διεπαφή πραγματικού χρόνου για την παρακολούθηση επικίνδυνων οικιακών αερίων, η οποία θα μπορεί να εγκατασταθεί σε συσκευές Android, iOS και PC.

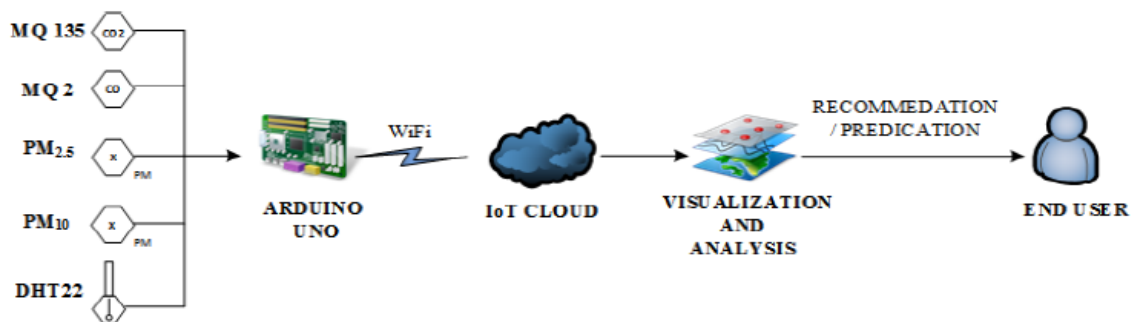


Σχήμα 5.11: Μοντέλο ανιχνευτή αερίου πολλαπλού κινδύνου (Multiple Hazard Gas Detector - MHGD) [1]

### ***Ένα σύστημα βασισμένο στο ΔτΠ για την αξιολόγηση εσωτερικών ατμοσφαιρικών ρύπων, χρησιμοποιώντας σχεσιακή ανάλυση GREY [91]***

Οι Rastogi, Lohani και Acharya προτείνουν ένα σύστημα ΔτΠ για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων σε εσωτερικούς χώρους, συνδυαστικά με τη χρήση σχεσιακής ανάλυσης Grey για την αξιολόγηση των μετρήσεων, προκειμένου να εντοπιστούν οι βασικοί αέριοι ρύποι που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα. Το σύστημα είναι εφοδιασμένο με αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας (DHT22), μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα (MQ-2 και MQ-135), καθώς και αιωρούμενων σωματιδίων (PPD42NS), συνδεδεμένων σε ένα Arduino Uno. Τα δεδομένα που παράγονται από τους παραπάνω αισθητήρες, αποστέλλονται μέσω Wi-Fi, με τη χρήση της μονάδας ESP8266, στο cloud. Αφού εντοπισθούν οι βασικοί αέριοι ρύποι του χώρου, δημιουργείται ένα ΤΝΔ βασισμένο στις τιμές τους, με σκοπό την πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα στο άμεσο μέλλον. Η αποθήκευση, η επεξεργασία, η ανάλυση και η απεικόνιση των δεδομένων γίνεται πραγματικότητα χάρη στην πλατφόρμα cloud computing Amazon Web Services (AWS), ενώ, τέλος, αποτελέσματα, πληροφορίες και στοιχεία πρόβλεψης, παρουσιάζονται στον τελικό χρήστη μέσω μίας εφαρμογής Android. Η μελέτη έχει διεξαχθεί σε αίθουσες και εργαστήρια πανεπιστημίου, υπό ειδικές συνθήκες, σε διάστημα δεκατεσσάρων μηνών.

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεών τους, οι ερευνητές ανακάλυψαν πως οι βασικοί αέριοι ρύποι του εσωτερικού χώρου που εξέτασαν, ήταν αυτοί των αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>. Τέλος, ο μηχανισμός πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα που χρησιμοποιήθηκε αποδείχθηκε ικανοποιητικός, με μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος ίσο με 4,57%.

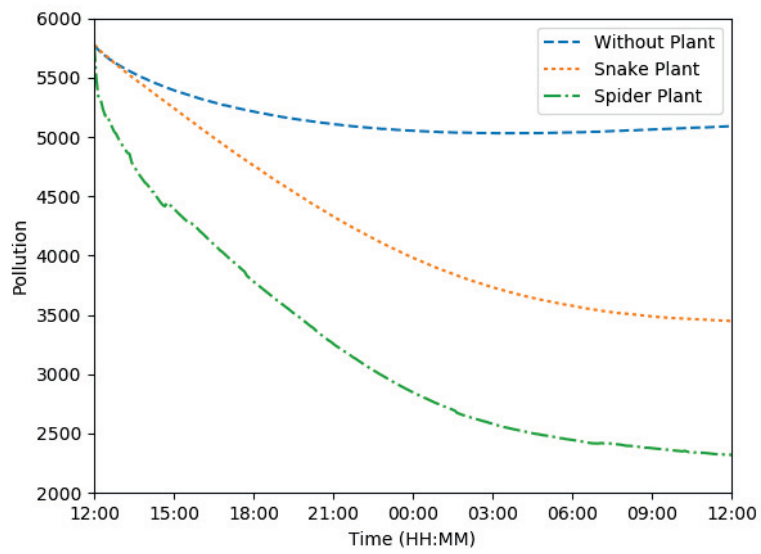


Σχήμα 5.12: Σύστημα αίσθησης (sensing) ΔτΠ [91]

**Σύστημα βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου, βασισμένο στο ΔτΠ και στη χρήση ειδικών φυτών [112]**

Οι Shitole, Nair, Pandey και Suhagiya, προτείνουν μία διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά την παρακολούθηση και βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα σε εσωτερικούς χώρους, δημιουργώντας ένα χαμηλού κόστους, απλής σχεδίασης και, ταυτοχρόνως, αποδοτικό σύστημα ΔτΠ. Με τη χρήση μόλις δύο αισθητήρων μέτρησης της ποιότητας του αέρα, μετρώντας τιμές καπνού, αμμωνίας, θείου, βενζολίου (MQ-135) και υγρασίας, θερμοκρασίας (DHT22) σε έναν εσωτερικό χώρο, συνδεδεμένων σε ένα Raspberry Pi 3, με ενσωματωμένες δυνατότητες Wi-Fi, Bluetooth και USB συνδεσιμότητας, συγκρίνουν την ποιότητα του αέρα στο χώρο τόσο κατά την παρουσία, όσο και κατά την απουσία των φυτών *Sansevieria Trifasciata* και *Chlorophytum Comosum*. Τα παραπάνω φυτά, απαιτούν ελάχιστη φροντίδα, όσον αφορά τις συνθήκες επιβίωσής τους, το πότισμα ή το λίπασμά τους, προσφέρουν παραγωγή οξυγόνου στο χώρο, αφαιρώντας διοξείδιο του άνθρακα από αυτόν κατά τις βραδινές ώρες. Πιο συγκεκριμένα, το φυτό *Sansevieria Trifasciata* συμβάλλει στην κάθαρση του αέρα, αποδεδειγμένα, έπειτα από έρευνα της NASA, αφαιρώντας φορμαλδεΐδη, βενζόλιο, τριχλωροαιθυλένιο και ξυλόλιο από τον μολυσμένο αέρα. Το φυτό *Chlorophytum Comosum* φαίνεται πως μειώνει, αντίστοιχα, τη συγκέντρωση φορμαλδεΐδης και ξυλολίου του εσωτερικού χώρου.

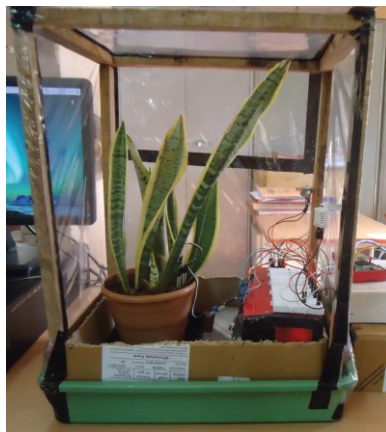
Ένας αριθμός πειραμάτων διεξήχθη, με σκοπό την δημιουργία ολοκληρωμένης εικόνας σχετικά με τις ευεργετικές ιδιότητες στην ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων, με την προσθήκη των συγκεκριμένων δύο φυτών στο χώρο, αφού πρώτα οι ερευνητές προχώρησαν σε υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, σκόπιμα, χρησιμοποιώντας καπνό θυμιάματος, προκειμένου να εκτελέσουν τα πειράματά τους σε επίπεδο προσομοίωσης. Τελικώς, αποδείχθηκε πως η συγκεκριμένη πρόταση χρήσης των δύο φυτών ως λύση στο ζήτημα, βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, είναι βιώσιμη, ενώ αποτελεί μία ικανοποιητική εναλλακτική λύση έναντι της χρήσης συσκευών καθαρισμού του αέρα (Air Purifiers). Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε πως υψηλότερη ρύπανση κυριαρχεί χωρίς την ύπαρξη κάποιου φυτού στο χώρο (μπλε γραμμή), πιο ποιοτικός αέρας παρατηρείται με τη χρήση του φυτού *Sansevieria Trifasciata* (πορτοκαλί γραμμή), ενώ η καλύτερη ποιότητα του αέρα παρατηρείται με τη χρήση του φυτού *Chlorophytum Comosum* (πράσινη γραμμή).



Σχήμα 5.13: Γράφημα μετρήσεων της ποιότητας του αέρα με την παρουσία και την απουσία των εν λόγω φυτών [112]



Σχήμα 5.14: Μοντέλο παρακολούθησης της ρύπανσης του αέρα με το φυτό *Chlorophytum Comosum* [112]



Σχήμα 5.15: Μοντέλο παρακολούθησης της ρύπανσης του αέρα με το φυτό *Sansevieria Trifasciata* [112]

## 5.3 Εφαρμογές εξωτερικού χώρου

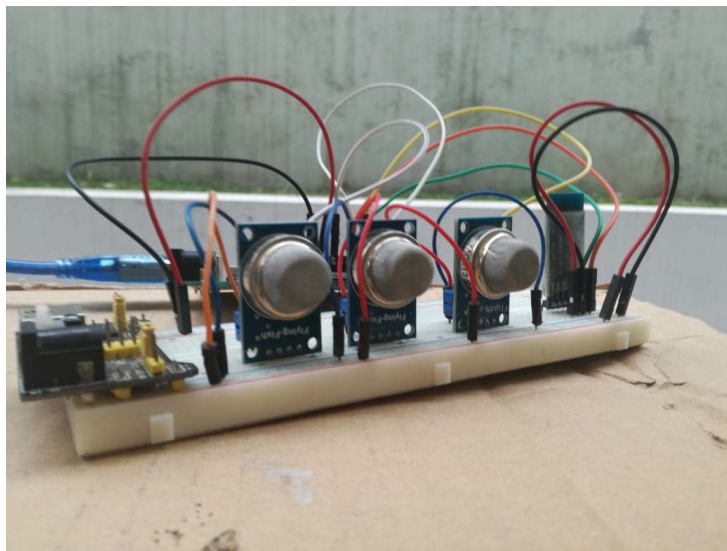
### 5.3.1 Πραγματικού χρόνου

#### 5.3.1.1 Στατικά εγκατεστημένα συστήματα

*Εφαρμογή ενός συστήματος αξιολόγησης για τη μέτρηση της ποιότητας του αέρα στις διαδρομές δημόσιων συγκοινωνιών, με χρήση του ΔτΠ [113]*

Οι Medina-De-La-Cruz, Mujáico-Mariano και Soto-Cordona, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα της πρωτεύουσας του Περού, Λίμα, εγκαθιστώντας σε σημεία-κλειδιά της πόλης, που σχετίζονται άμεσα με καθημερινές διαδρομές δημόσιας συγκοινωνίας και προσέλευσης πεζών, ένα απλό σύστημα ικανό να ανιχνεύει τη συγκέντρωση των αέριων ρύπων, διοξειδίου του άνθρακα (MQ-135), μονοξειδίου του άνθρακα (MQ-9) και μεθανίου (MQ-4), σε πραγματικό χρόνο. Όλοι οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες συνδέονται σε ένα Arduino και οι πληροφορίες μετρήσεων του μεταδίδονται, μέσω ενός NodeMCU ESP8266 και του πρωτοκόλλου Wi-Fi, σε ένα διακομιστή cloud προς επεξεργασία. Η τελική παρουσίαση της ωφέλιμης πληροφορίας, γίνεται μέσω μίας mobile εφαρμογής.

Κατόπιν σχετικών μετρήσεων, αποδεικνύεται πως οι τιμές των αέριων ρύπων που παρακολουθήθηκαν στην πόλη της Λίμα, βρίσκονται υψηλότερα από το υγιές επιτρεπτό όριο, γεγονός επιβλαβές για την υγεία των πολιτών. Μάλιστα, παρατηρήθηκε ότι κατά το πιο πρόσφατο διάστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα της Λίμα, οι σχετικές τιμές έχουν μία μικρή τάση αύξησης λόγω ύπαρξης γεννητριών, μεγάλων βιομηχανιών και πληθώρας οχημάτων μεγάλης παλαιότητας, που οξύνουν ιδιαίτερα το πρόβλημα της ρύπανσης του αέρα της πόλης, συνεχίζοντας κανονικά να κυκλοφορούν στους δρόμους της. Οι πεζοί επηρεάζονται περισσότερο από όλους, εξαιτίας της έκθεσής τους στην υψηλή συγκέντρωση ρυπογόνων αερίων, για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.



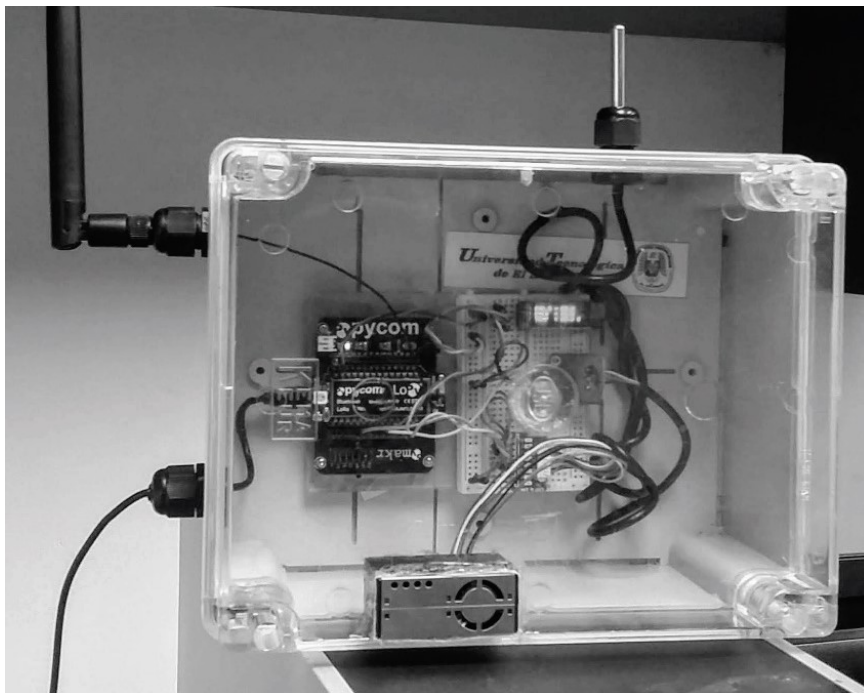
Σχήμα 5.16: Υλοποίηση υλικού μέρους του συστήματος [113]

*Σύστημα ΔτΠ, χαμηλού κόστους, για παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης στις αναπτυσσόμενες χώρες [114]*

Καθώς η χώρα του Ελ Σαλβαδόρ κατέχει μόλις τρεις, στατικά εγκατεστημένους, σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για την κάλυψη ολόκληρης της έκτασής του, οι Flores-Cortez, Adalberto Cortez και Rosa, σχεδίασαν ένα σύστημα, χαμηλού κόστους, παρακολούθησης της

ποιότητας του αέρα με χρήση τεχνολογιών του ΔτΠ. Το σύστημα φέρει αισθητήρες μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων τύπου PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub> (PMS5007), όπως και θερμοκρασίας (DS18B20), συνδεδεμένους σε έναν μικροελεγκτή LoPy ESP32, με ενσωματωμένη δυνατότητα συνδεσιμότητας Wi-Fi. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται περιοδικά, τα παραγόμενα δεδομένα επεξεργάζονται στον ίδιο τον κόμβο αισθητήρων, ενώ στη συνέχεια προωθούνται μέσω μίας σύνδεσης Wi-Fi, με μορφοποιημένο τρόπο, στη σουίτα της Google, η οποία λειτουργεί ως cloud πλατφόρμα ΔτΠ. Η απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω μίας ιστοσελίδας, από οποιαδήποτε συσκευή με πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Τα τελικά παραγόμενα δεδομένα χρησιμοποιούνται για σύγκριση με αυτά που προσφέρει ο EPA των Ηνωμένων Πολιτειών, αποδεικνύοντας τις δυνατότητες ενός απλού συστήματος ΔτΠ, με σκοπό τη ενσωμάτωση νέων και καινοτόμων τεχνολογιών στη δημιουργία αποδοτικών πρωτοτύπων χαμηλού κόστους.

Τα παραγόμενα δεδομένα μετρήσεων των αέριων ρύπων, που προήλθαν από τους απομακρυσμένους σταθμούς παρακολούθησης των ερευνητών, συγκρίθηκαν με αυτά των κοντινών σταθμών που ανήκουν στο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων του Ελ Σαλβαδόρ (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales - MARN), επαληθεύοντας την απόδοση του προτεινόμενου συστήματος με αρκετά παρόμοια αποτελέσματα. Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι το επίπεδο ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα, εξαιτίας των αιωρούμενων σωματιδίων, τείνει να αυξάνεται κατά τις ώρες υψηλής κυκλοφορίας οχημάτων, ενώ, αντίστοιχα, μειώνεται τη νύχτα όταν η κυκλοφορία είναι χαμηλή. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε πως η διακύμανση των επιπέδων ρύπανσης επηρεάζεται βάσει των κλιματικών συνθηκών, όπως από τις εποχές βροχής και ανέμου, καθώς οι μετρήσιμες τιμές της ρύπανσης του αέρα μειώνονται στα χαμηλότερα επίπεδά τους, έπειτα από βροχή ή ριπή ανέμου. Τέλος, φαίνεται πως τα σαββατοκύριακα τα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων είναι σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με την υπόλοιπη εβδομάδα, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η κυκλοφορία οχημάτων αποτελεί τη βασική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων της πόλης.

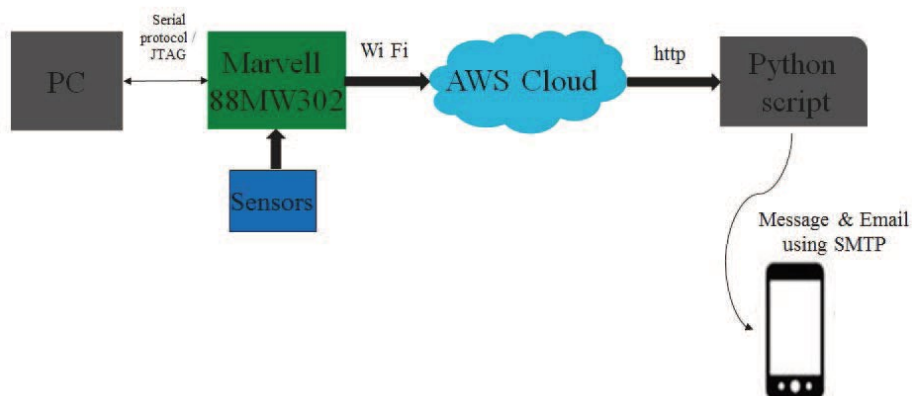


Σχήμα 5.17: Ολοκληρωμένο πρωτότυπο σταθμού ΔτΠ του συστήματος [114]

**Συσκευή ΔτΠ, παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα: Μία λύση έξυπνης υγείας (smart health), χαμηλού κόστους [115]**

Οι Tapashetti, Vegiraju και Ogunfunmi, προχώρησαν στην ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα βασισμένο στο ΔτΠ, με σκοπό να εξυπηρετήσουν σχετικές ανάγκες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα κοντά σε σχολεία και παιδικές χαρές, εργοστάσια, περιοχές υψηλής κυκλοφορίας οχημάτων και αναπτυσσόμενες χώρες, όπου το κόστος υλοποίησης και εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), φορμαλδεΐδης (HCHO), φωτός, αερίου και θερμοκρασίας, συνδεδεμένων σε έναν μικροελεγκτή, Marvell 88MW302, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετατροπή των μετρήσεων σε ψηφιακή μορφή, καθορίζεται χρονικά ο ρυθμός που θα λαμβάνονται οι αντίστοιχες μετρήσεις και στη συνέχεια αποστέλλονται τα παραγόμενα δεδομένα στο AWS Cloud, μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα, την ασφάλεια και τη διαθεσιμότητα αυτών, προσφέροντας πολλαπλές υπηρεσίες. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα ανά πάσα στιγμή, χωρίς περιορισμούς, από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου με τη χρήση ενός smartphone ή υπολογιστή, με πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Κάθε χρήστης, χρησιμοποιώντας το AWS διαθέτει ένα προσωπικό αναγνωριστικό λογαριασμού (account ID) και κωδικό πρόσβασης, ώστε να έχει πρόσβαση στα δεδομένα. Στη συνέχεια, το AWS βοηθά στη σύνδεση της πλακέτας μικροελεγκτή μέσω Wi-Fi στον συγκεκριμένο λογαριασμό, παρέχοντας πιστοποιητικά, δημόσια και ιδιωτικά κλειδιά κρυπτογράφησης. Βάσει των παραπάνω, ο χρήστης ειδοποιείται τη στιγμή που οι μετρήσιμες τιμές των αισθητήρων ξεπεράσουν το καθορισμένο κατώφλι που έχει οριστεί ως φυσιολογικό ή επιβλαβές για την υγεία, με τη μορφή μίας ειδοποίησης μέσω μηνύματος SMS και e-mail (πρωτόκολλο SMTP).

Το πρωτότυπο των ερευνητών δοκιμάστηκε για χρονικό διάστημα δύο ωρών στην πόλη της Σάντα Κλάρα στην Καλιφόρνια, σε ένα γεμάτο αμφιθέατρο, με τις τιμές των μετρήσεων να αυξάνονται όσο εισέρχονταν περισσότερα άτομα στο χώρο. Χαμηλά επίπεδα ρύπων παρατηρήθηκαν κατά τις πρωινές ώρες, ενώ καθώς έφτανε το απόγευμα οι τιμές των μετρήσεων συνέχιζαν να χειροτερεύουν. Οι αναγνώσεις των αισθητήρων ενημερώνονταν κάθε λεπτό.



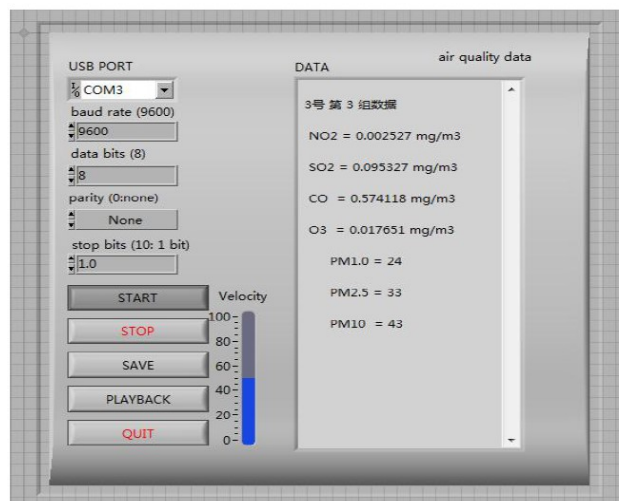
Σχήμα 5.18: Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα [115]

**Ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, χαμηλής ισχύος, που χρησιμοποιεί LPWAN με βάση το LoRa [116]**

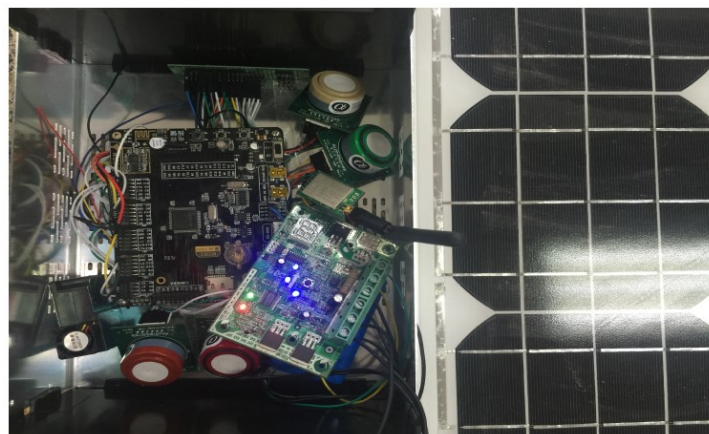
Οι Liu, Xia και Zhao, προτείνουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, χαμηλής ισχύος, σε πραγματικό χρόνο, το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί σε μεγάλο αριθμό, σε μία περιοχή ενδιαφέροντος, σχηματίζοντας ένα δίκτυο αισθητήρων. Το σύστημα διέπεται από θετικά

χαρακτηριστικά χαμηλού κόστους, μεγάλης εμβέλειας, υψηλής κάλυψης, ευκολίας στη χρήση, καθώς και μεγάλης ενεργειακής αυτονομίας, χρησιμοποιώντας μία ηλιακά επαναφορτιζόμενη μπαταρία (solar PV-battery). Όσον αφορά το κομμάτι της αίσθησης (sensing), είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες μονοξειδίου του άνθρακα (CO-B4), όζοντος (OX-B4), διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>-B4), διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>-B42F) και αιωρούμενων σωματιδίων (PLANTOWER PM3003) τύπων PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>. Ένας μικροελεγκτής STM32103FVET6, αποτελεί τη βάση της μονάδας αίσθησης και είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή των αναλογικών μετρήσεων των αισθητήρων σε ψηφιακές τιμές. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αποστέλλονται στους κόμβους LPWAN χρησιμοποιώντας το LoRa modem. Τα δεδομένα καταλήγουν στο βασικό σταθμό που έχει ενσωματωθεί σε έναν υπολογιστή. Το λογισμικό παρουσίασης και επεξεργασίας δεδομένων, υλοποιημένο με το εργαλείο LabVIEW σε μορφή γραφικού περιβάλλοντος, επιτρέπει στους τελικούς χρήστες να αποκτήσουν την ιστορική εξέλιξη της ποιότητας του αέρα στις περιοχές που παρακολουθούνται.

Η πειραματική δοκιμή του συστήματος, πραγματοποιήθηκε στην πανεπιστημιούπολη του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου του Πεκίνου (Beijing University of Technology), εξάγοντας τις τάσεις της ποιότητας του αέρα, ενώ μεγάλες διακυμάνσεις τιμών, στις σχετικές μετρήσεις που ολοκληρώθηκαν, παρατηρήθηκαν στη συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων. Τα πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύουν την ακρίβεια του συστήματος, όσον αφορά την παρακολούθηση και μέτρηση της συγκέντρωσης αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 5.19: Το γραφικό περιβάλλον χρήστη, υλοποιημένο με το εργαλείο LabVIEW [116]

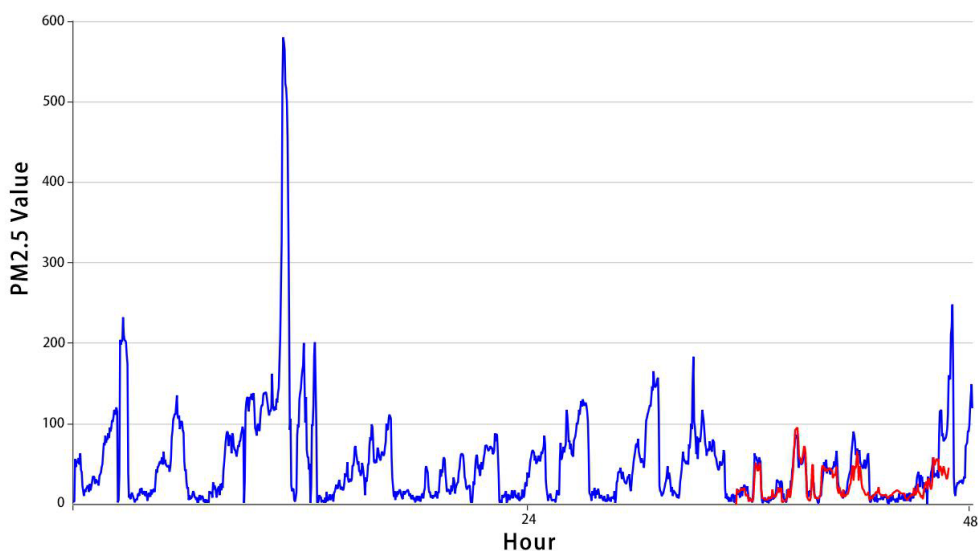


Σχήμα 5.20: Ενσωμάτωση της μονάδας μικροελεγκτή με αυτές των αισθητήρων και του LoRa [116]

### Σύστημα ανίχνευσης και πρόβλεψης επιπέδων συγκέντρωσης $PM_{2.5}$ με χρήση Long Short-Term Memory (LSTM) και LoRa [117]

Οι Song, Han, Xie, Gao και Song, προτείνουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με χρήση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου Long Short-Term Memory (LSTM) και του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου LoRa. Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα διακριτά μέρη: μία τερματική συσκευή αίσθησης, μία πύλη (gateway) LoRa, έναν διακομιστή cloud και μία εφαρμογή τελικού χρήστη. Η τερματική συσκευή αίσθησης χρησιμοποιεί έναν λέιζερ αισθητήρα σκόνης, για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  στην ατμόσφαιρα, έναν μικροελεγκτή Arduino Mega και μία συμβατή πλακέτα επέκτασης (shield) LoRa. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μετρήσεων, μαζί με πληροφορίες χρονικής στιγμής (timestamp) της κάθε μέτρησης, δημιουργούν πακέτα πληροφορίας που κρυπτογραφούνται προς μετάδοσή τους στην πύλη LoRa, μέσω του πρωτοκόλλου LoRa. Η πύλη LoRa αφού λάβει τα σύνολα δεδομένων (datasets), ελέγχει την ακεραιότητά τους και τα προωθεί, μέσω Wi-Fi ή οποιουδήποτε δημόσιου δικτύου, στον διακομιστή cloud προς αποθήκευσή τους. Τέλος, η εφαρμογή χρήστη «κατεβάζει» (downloads) τα δεδομένα από τον διακομιστή cloud, εκτελεί ανάλυση και πρόβλεψη χρησιμοποιώντας ΤΝΔ LSTM, εκπαιδευμένο σε σύνολα δεδομένων  $PM_{2.5}$  για να κάνει ακριβείς προβλέψεις, και παρουσιάζει τα αποτελέσματα.

Σε πειραματικό στάδιο, μία τερματική συσκευή αίσθησης εγκαταστάθηκε σε ένα ειδικά σχεδιασμένο κουτί και τοποθετήθηκε σε ένα στύλο, προκειμένου να συλλέγει δεδομένα  $PM_{2.5}$ , χωρίς να επηρεάζεται από εξωτερικούς καιρικούς παράγοντες, όπως από βροχή ή χιόνι. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν σε 50 ημέρες μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες: άριστα, καλά, ελαφρώς μολυσμένα, μέτρια μολυσμένα, βαριά μολυσμένα και σοβαρά μολυσμένα. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα με τη χρήση ενός γραφήματος, φαίνεται πως οι τιμές πρόβλεψης του LSTM ακολουθούν πολύ κοντά την τάση των πραγματικών δεδομένων μέτρησης.



Σχήμα 5.21: Μετρούμενες τιμές  $PM_{2.5}$  (μπλε) και τιμές πρόβλεψης (κόκκινο) [117]

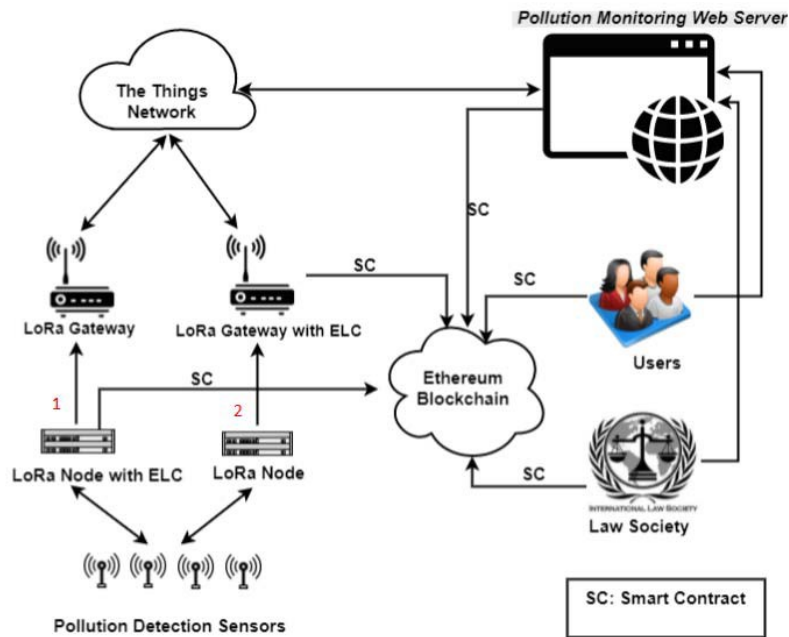


Σχήμα 5.22: Εφαρμογή του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες [117]

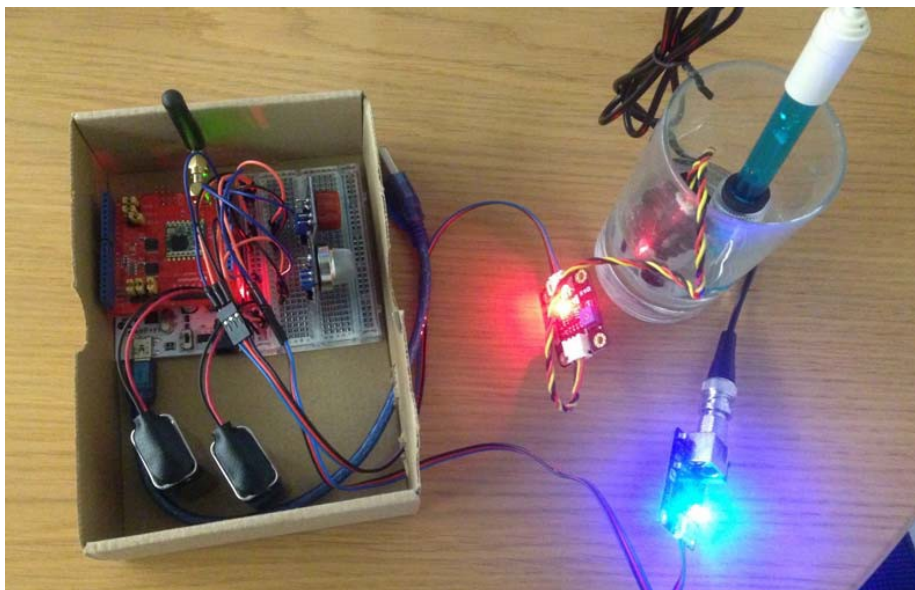
***Σχεδιασμός και υλοποίηση ενός αυτοματοποιημένου και αποκεντρωμένου συστήματος παρακολούθησης της ρύπανσης, με τεχνολογίες blockchain, smart contracts και LoRaWAN [118]***

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα κατακεντρωμένο σύστημα, βασισμένο σε τεχνολογίες blockchain και ΔτΠ, για την αυτόματη μέτρηση, αποθήκευση και παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και του αέρα, σε περιβάλλοντα όπως λίμνες, βουνά, αστικές περιοχές ή εργοστάσια. Από τη μία πλευρά, το σύστημα ενσωματώνει το πρωτόκολλο LoRa για την αντιμετώπιση της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και των προκλήσεων μετάδοσης μεγάλης εμβέλειας των πρωτοκόλλων ΔτΠ, ενώ από την άλλη πλευρά, είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε να είναι πλήρως αποκεντρωμένο, χρησιμοποιώντας το Ethereum Blockchain για να αποθηκεύει και να ανακτά τα δεδομένα που καταγράφονται από τους αισθητήρες ΔτΠ. Τέσσερις αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν, συνδεδεμένοι σε ένα Arduino Uno, για τη μέτρηση του δυναμικού υδρογόνου (Potential Hydrogen - PH), της θολότητας (Turbidity), του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Τα δεδομένα των αισθητήρων ΔτΠ προωθούνται σε έναν Web διακομιστή, μέσω του blockchain ή απευθείας μέσω του δικτύου LoRa, ώστε να διατηρούνται τα δεδομένα ασφαλή. Το πρωτόκολλο Wi-Fi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση των αισθητήρων στο Διαδίκτυο για πρόσβαση στο blockchain, από το επίπεδο αισθητήρων, καθώς και από το επίπεδο Web διακομιστή. Μόλις τα δεδομένα ανακτηθούν από το blockchain, αποθηκεύονται στην τοπική βάση δεδομένων για τη γρήγορη επεξεργασία τους, σε λειτουργία εκτός σύνδεσης (offline mode). Το πρωτόκολλο LoRa επιτρέπει την επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, ωστόσο οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων παραμένουν χαμηλοί. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής του συστήματος, αποτελεί η χρήση του Ethereum Light Client (ELC), όπου ο συγκεκριμένος τύπος κόμβου Ethereum, αποθηκεύει και συγχρονίζει τις τρέχουσες συναλλαγές και απαιτεί λιγότερο χώρο σε σχέση με τους πλήρεις κόμβους Ethereum. Με το ELC, τα δεδομένα μεταδίδονται απευθείας από τους αισθητήρες στην εφαρμογή μέσω blockchain. Το σύστημα παρακολούθησης της ρύπανσης παρέχει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την επιλογή επικοινωνιακών συστημάτων και blockchain πελάτη (client). Κατά την πρώτη προσέγγιση, οι αισθητήρες ΔτΠ συνδέονται σε πλακέτες LoRa που είναι συνδεδεμένες σε blockchain με ένα ELC που είναι εγκατεστημένο στις πλακέτες LoRa. Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, οι πλακέτες LoRa συνδέονται στο blockchain με ένα ELC εγκατεστημένο στην πύλη LoRa, ενώ, κατά την τρίτη προσέγγιση, οι αισθητήρες ΔτΠ συνδέονται σε πλήρεις κόμβους (full nodes) μέσω WLAN ή LoRa.

Σε επίπεδο αξιολόγησης του συστήματος, η δεύτερη προσέγγιση παρέχει αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία, όσον αφορά την ασφάλεια μετάδοσης των δεδομένων. Η αξιοπιστία της τρίτης προσέγγισης είναι επίσης υψηλή, καθώς όλα τα δεδομένα που λαμβάνονται από κόμβους αισθητήρων καταγράφονται (logging), προκειμένου να δοθεί ευρύτερη ανάλυση στον διακομιστή Web. Η επεκτασιμότητα του backend του συστήματος, που ισούται πρακτικά με την επεκτασιμότητα του blockchain, εξαρτάται από το δίκτυο Ethereum. Τέλος, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας του προτεινόμενου συστήματος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι αισθητήρες και η υπολογιστική πλακέτα, Arduino Uno, αποτελούν τους βασικούς παράγοντες ενεργειακής κατανάλωσης, βάσει του αριθμού τους και της απαιτούμενης ενεργειακής ισχύος του καθένα.



Σχήμα 5.23: Ροή δεδομένων με χρήση LoRa και ELC [118]

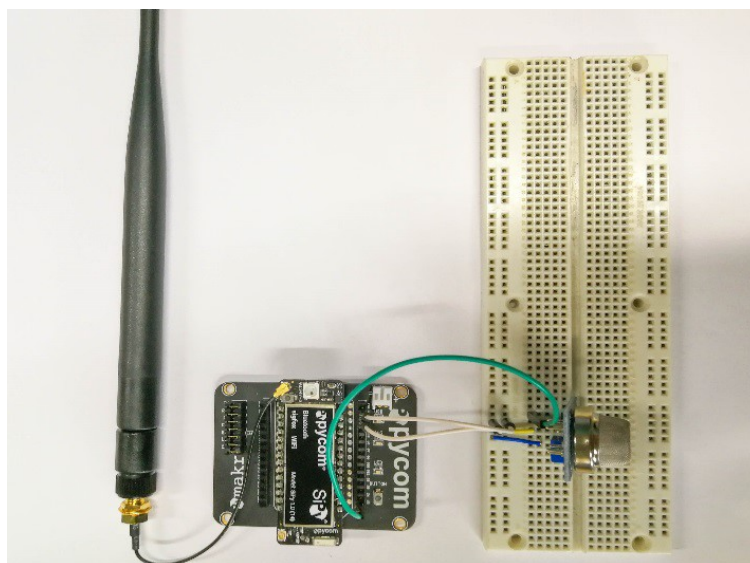


Σχήμα 5.24: Πρωτότυπη υλοποίηση ενός κόμβου αίσθησης LoRa που περιλαμβάνει τέσσερις αισθητήρες συνδεδεμένους σε αυτόν [118]

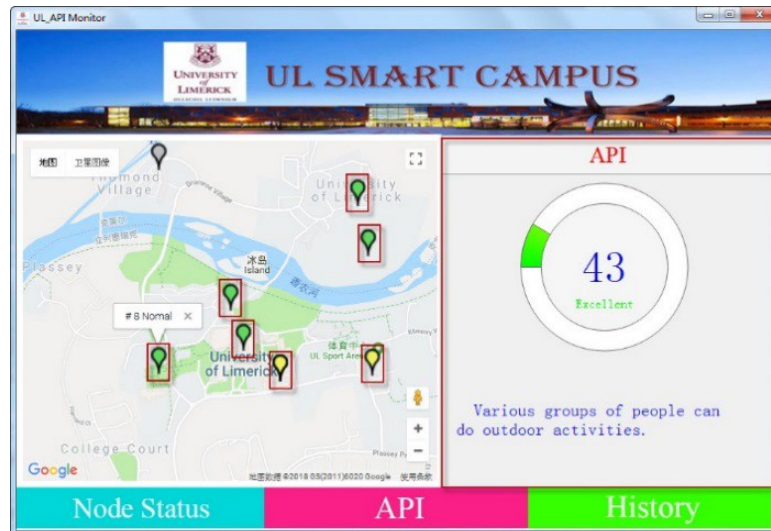
**Παρακολούθηση του AQI, βάσει της τεχνολογίας SigFox και του ΔτΠ [119]**

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα ΔτΠ παρακολούθησης του δείκτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SigFox. Το σύστημα είναι αξιόπιστο και συντηρείται εύκολα, ενώ η χρήση επικοινωνίας τύπου LPWAN (Low Power Wide Area Network) με το πρωτόκολλο SigFox, προσφέρει μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας και χαμηλό κόστος και, επίσης, είναι κατάλληλη για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ένα ευρύ φάσμα πολύπλοκων περιοχών εφαρμογής. Ένα πρωτότυπο του συστήματος εγκαταστάθηκε στην πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου του Limerick (University of Limerick). Κάθε κόμβος αίσθησης του συστήματος, είναι εξοπλισμένος με έναν μόνο αισθητήρα αερίων, MQ-135, ο οποίος είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε ατμούς αμμωνίας, σουλφιδίων και βενζολίου, μία πλακέτα επέκτασης Pycom και ένα SiPy. Το λογισμικό των συσκευών υλικού του συστήματος για την μέτρηση και την μετάδοση δεδομένων ρύπανσης του αέρα, είναι υλοποιημένο με τη γλώσσα προγραμματισμού Python. Τα παραγόμενα δεδομένα κάθε κόμβου αίσθησης, αποστέλλονται μέσω του πρωτοκόλλου Sigfox στο Sigfox cloud και στο Google Cloud, προς αποθήκευσή τους. Στη συνέχεια, δημιουργείται μία επανάκληση (callback) στο Sigfox backend προς την πλατφόρμα IBM Watson IoT. Τέλος, τα δεδομένα παρουσιάζονται στον τελικό χρήστη μέσω μία εφαρμογής πελάτη προσωπικού υπολογιστή, η οποία έχει υλοποιηθεί στην πλατφόρμα Qt Creator, που υποστηρίζει τη γλώσσα προγραμματισμού C++.

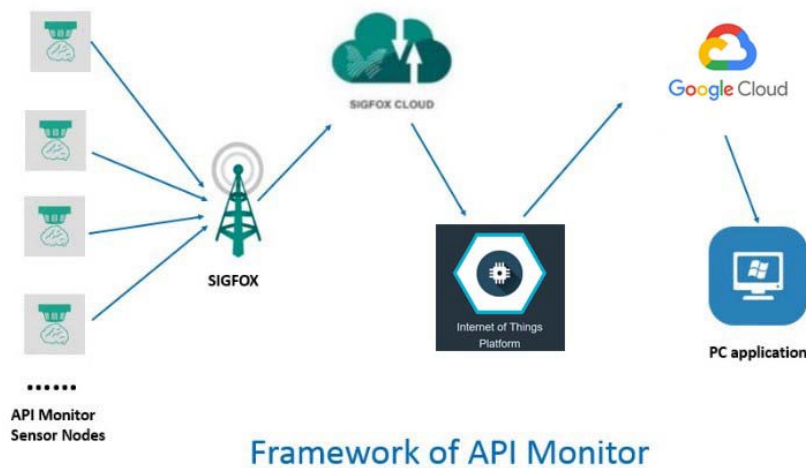
Κατά τη δοκιμή του συστήματος, όλοι οι δοκιμαστικοί κόμβοι αίσθησης μέτρησαν με επιτυχία τις τιμές του δείκτη ποιότητας του αέρα και τις προώθησαν στη βάση δεδομένων cloud. Η εφαρμογή τελικού χρήστη, επίσης, λειτούργησε επιτυχώς σε κάθε στάδιο λειτουργίας της, ενώ το πρωτόκολλο Sigfox, εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, επέτρεψε σε κάθε κόμβο να διατηρήσει την ενεργειακή του αυτονομία για την απαιτούμενη διάρκεια των δοκιμών, για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του ενός μήνα. Λόγω των καιρικών συνθηκών, παρουσιάζονται ορισμένες ανωμαλίες στις μετρήσεις των κόμβων, ωστόσο η εφαρμογή μπορεί να καταγράψει εγκαίρως τη γεωγραφική θέση των κόμβων που ευθύνονται και να πραγματοποιηθεί η σχετική συντήρηση από τεχνικούς. Τέλος, το σύστημα δεν είναι πολύ ακριβές λόγω της ύπαρξης μόνο ενός αισθητήρα (MQ-135), επομένως καθίσταται βιώσιμο μόνο για πειραματικούς δοκιμαστικούς σκοπούς, ενώ η απουσία αισθητήρα GPS αποτρέπει τον ανά πάσα στιγμή απομακρυσμένο έλεγχο της τρέχουσας γεωγραφικής θέσης κάθε κόμβου αίσθησης, σε περίπτωση μετακίνησής του.



Σχήμα 5.25: Πρωτότυπο κόμβου αίσθησης [119]



Σχήμα 5.26: Εφαρμογή πελάτη προσωπικού υπολογιστή (PC) [119]



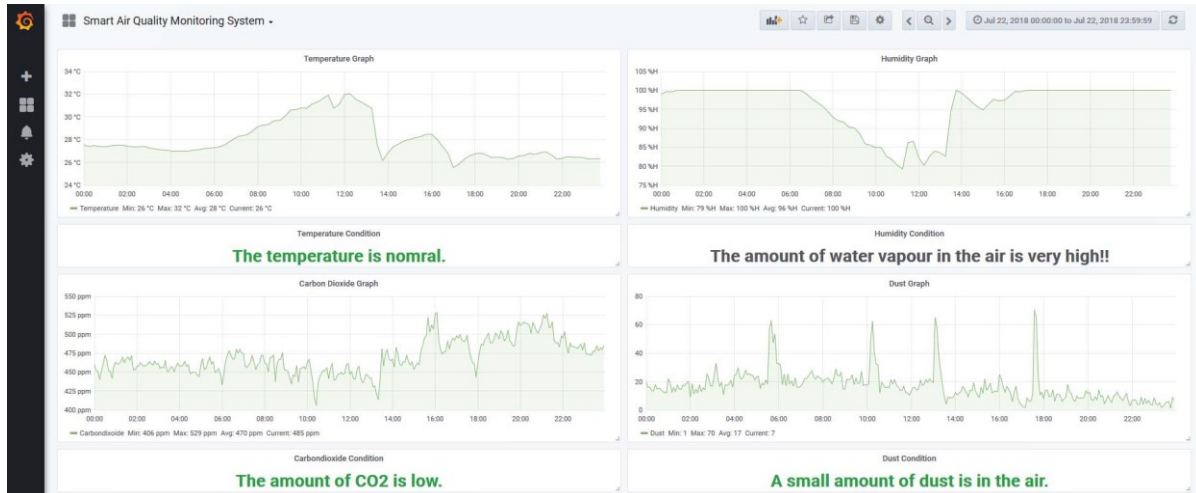
Σχήμα 5.27: Το πλαίσιο (framework) της παρακολούθησης του δείκτη ποιότητας του αέρα [119]

### ***Έξυπνο σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με χρήση του LoRaWAN [89]***

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα κλιμακούμενο (scalable) έξυπνο σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, κάνοντας χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους και του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου, μεγάλης εμβέλειας, LoRaWAN. Ως μονάδα αίσθησης (sensing), το Telaire Air Quality Evaluation Kit επιλέχθηκε, καθώς περιέχει αισθητήρες υψηλής ακρίβειας βιομηχανικής ποιότητας. Το κιτ περιλαμβάνει ένα AAS Arduino Uno, μία επέκταση (shield) αξιολόγησης αισθητήρα AAS, μία οθόνη OLED, έναν αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα, T6713, έναν αισθητήρα σκόνης, SM-PWM-01C, καθώς και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας, T9602. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν ως ελεγκτή (controller) του συστήματος, ένα The Things Uno της εταιρείας The Things Network, που παρέχει έναν συμβατό με Arduino μικροελεγκτή (Arduino Leonardo), και μία μονάδα ασύρματης επικοινωνίας LoRa. Τα παραγόμενα δεδομένα αποστέλλονται μέσω του LoRa στην πύλη (gateway) LoRaWAN και αυτή με τη σειρά της τα προωθεί στον διακομιστή της εταιρείας The Things Network. Χάρη στο πρωτόκολλο MQTT τα δεδομένα μεταδίδονται από τον τελευταίο στη βάση δεδομένων. Παράλληλα, προβλέπονται οι αναμενόμενες τιμές των παραμέτρων της ποιότητας του αέρα, βάσει των συνόλων δεδομένων που παράγονται από τις εν λόγω μετρήσεις, με τη χρήση μηχανικής

μάθησης, και πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Python και το μοντέλο ARIMA. Τέλος, η διαδικτυακή εφαρμογή ανοικτού κώδικα Grafana, χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των δεδομένων στους τελικούς χρήστες, μέσω μίας διεπαφής φιλικής προς τον χρήστη.

Η λειτουργικότητα του συστήματος επαληθεύεται κατόπιν πειραματικών δοκιμών, ενώ σημειώνεται πως η ακρίβεια πρόβλεψης των αναμενόμενων τιμών των παραμέτρων της ποιότητας του αέρα, μπορεί να βελτιωθεί, καθώς θα συλλέγονται περισσότερα δεδομένα μετρήσεων και θα τροφοδοτείται, αντίστοιχα, το μοντέλο μηχανικής μάθησης.



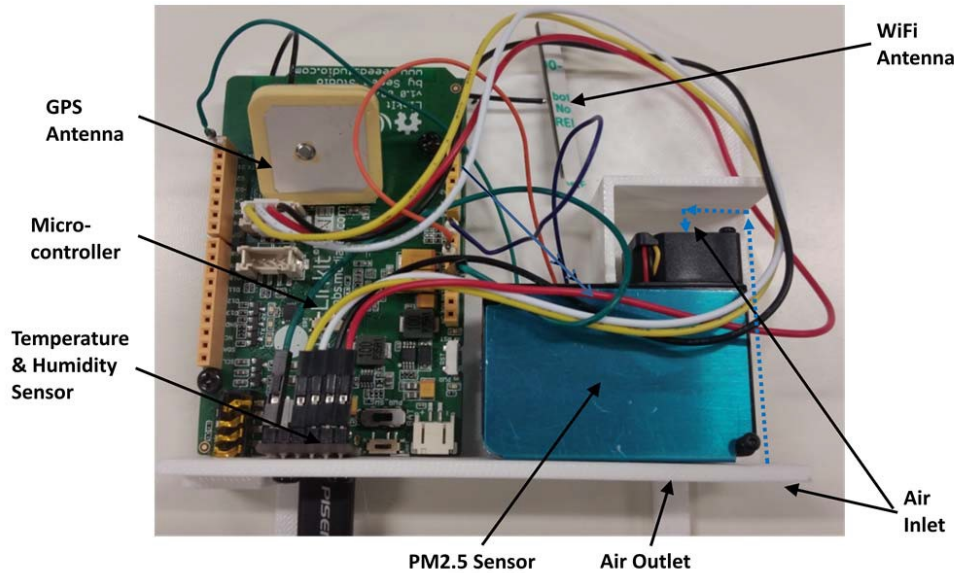
Σχήμα 5.28: Πίνακας ελέγχου εφαρμογής Grafana [89]

**AirQ: Μια έξυπνη πλατφόρμα ΔτΠ για παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, με τη χρήση ενός αριθμού ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας δεδομένων [120]**

Η πλατφόρμα AirQ αποτελεί μία έξυπνη και οικονομική λύση παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο. Φέρει αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας (BME280), συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (Plantower PMS3003), τύπου PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>, συνδεδεμένους σε μία πλακέτα Mediatek LinkIt ONE, ενώ είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμη, με πρόσθετους αισθητήρες αερίου, όπως αισθητήρες μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του αζώτου, όζοντος και πτητικών οργανικών ενώσεων. Ακόμη, το AirQ υποστηρίζει τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας δεδομένων, όπως Wi-Fi, 4G, Bluetooth και LoRa. Τα παραγόμενα δεδομένα μετρήσεων των αισθητήρων αποστέλλονται ασύρματα στο βασισμένο στο cloud backend, που έχει υλοποιηθεί με το framework Django. Το backend του συστήματος παρέχει ένα διαδικτυακό (web-based) πίνακα ελέγχου που προβάλλει τα δεδομένα των αισθητήρων από κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας γραφικά, σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, έχει υλοποιηθεί μία εφαρμογή για Android και iOS συσκευές, η οποία απεικονίζει τα δεδομένα πραγματικού χρόνου και τις ειδοποιήσεις ανάγκης, σε περίπτωση υπέρβασης του καθορισμένου ορίου κάποιας τιμής μέτρησης, στους τελικούς χρήστες. Τέλος, καθώς ο αισθητήρας μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων τύπου PM<sub>2.5</sub> του AirQ χρησιμοποιεί σκέδαση λέιζερ για να εκτιμήσει τη συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub>, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ακρίβεια της μέτρησης από την υγρασία του αέρα, οι ερευνητές προχώρησαν στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ανάλυσης δεδομένων για τη βαθμονόμηση των δεδομένων PM<sub>2.5</sub> που παράγονται από την πλατφόρμα.

Με την ολοκλήρωση του πρωτοτύπου του AirQ και της εφαρμογής του αλγορίθμου ανάλυσης δεδομένων για τη βαθμονόμηση των δεδομένων PM<sub>2.5</sub>, που παράγονται από την πλατφόρμα, οι ερευνητές κατάφεραν να πετύχουν αποτελέσματα ακρίβειας παρόμοια με αυτά του Εθνικού

Οργανισμού Περιβάλλοντος (National Environment Agency – NEA) της Σιγκαπούρης. Ωστόσο, απαιτείται πιο εκτεταμένη συλλογή δεδομένων και πιο εξελιγμένη μοντελοποίηση για τη βελτίωση της ακρίβειας της εξίσωσης βαθμονόμησης. Μελλοντικά, οι ερευνητές επιθυμούν να διορθώσουν τις όποιες αστοχίες του συστήματος, και να προσθέσουν δυνατότητα δημιουργίας ειδοποιήσεων και προβλέψεων της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο και για συγκεκριμένη τοποθεσία.



Σχήμα 5.29: Πρωτότυπο του συστήματος AirQ [120]



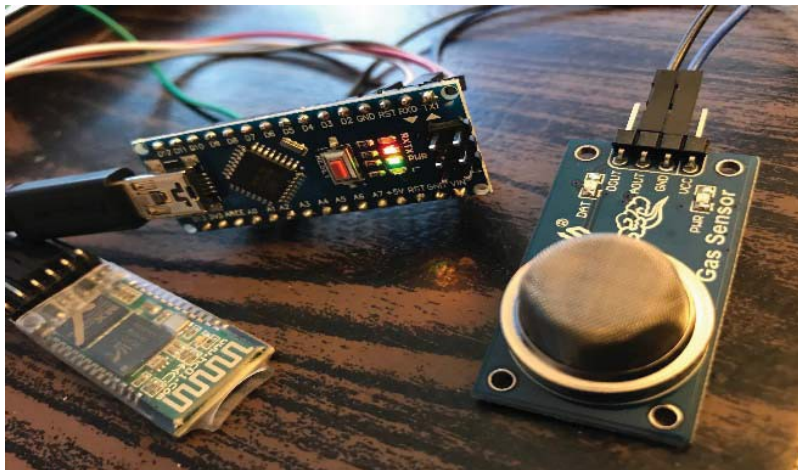
Σχήμα 5.30: Πίνακας ελέγχου AirQ και mobile εφαρμογή [120]

### ***Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, με χρήση του πρωτοκόλλου Bluetooth [121]***

Οι Enigella και Shahnasser, προκειμένου να συλλέξουν δεδομένα ποιότητας του αέρα, κατασκεύασαν ένα σύστημα παρακολούθησης γνωστό ως Real-time Air Sense (RAS). Χρησιμοποίησαν έναν αισθητήρα MQ135 για την συλλογή τιμών του δείκτη ποιότητας αέρα AQI, συνδεδεμένο σε έναν μικροελεγκτή Arduino Nano, καθώς και έναν αισθητήρα Bluetooth Arduino HC-05, ώστε να είναι εφικτή η αποστολή των τιμών σε μία mobile εφαρμογή ενός smartphone. Από εκεί και έπειτα, δεδομένα όπως οι συντεταγμένες GPS και άλλα δομικά στοιχεία, όπως η ημερομηνία, το αποκλειστικό device id

της συσκευής και ένα timestamp, προωθούνται στο cloud, και συγκεκριμένα στην πλατφόρμα Google Firebase, όπου συγχρονίζονται και ύστερα αποθηκεύονται. Τέλος, με τη χρήση της βιβλιοθήκης Leaflet της γλώσσας προγραμματισμού R, γίνεται δυνατή η απεικόνιση (visualization) των τιμών του AQI μέσω ενός διαδραστικού χάρτη, σε πραγματικό χρόνο (real-time map).

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος επαληθεύτηκε τόσο σε επίπεδο επικοινωνίας του Arduino με την εφαρμογή Android, και επικοινωνίας της εφαρμογής με το cloud, όσο και σε επίπεδο σύγκρισης των παραγόμενων τιμών του δείκτη ποιότητας του αέρα (Air Quality Index – AQI) με τις τιμές που παρέχει ο EPA των Ηνωμένων Πολιτειών. Το σύστημα παρά το χαμηλό κόστος κατασκευής του, καθώς και της φορητότητάς του λόγω μικρού μεγέθους, αποδείχθηκε λειτουργικό και ακριβές όσον αφορά τα παραγόμενα αποτελέσματά του.



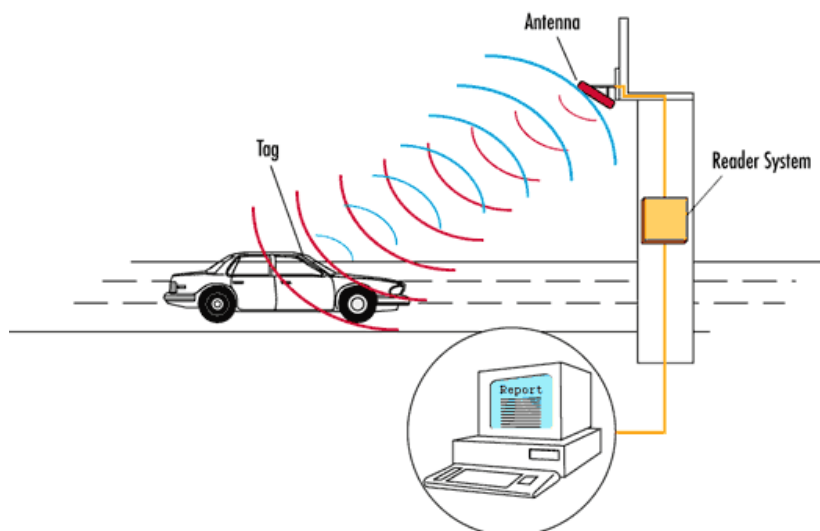
Σχήμα 5.31: Πρωτότυπο της συσκευής συλλογής του δείκτη ποιότητας του αέρα [121]

#### ***Ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης των ρύπων που παράγουν οχήματα, βασισμένο στο ΔτΠ και στην τεχνολογία RFID [122]***

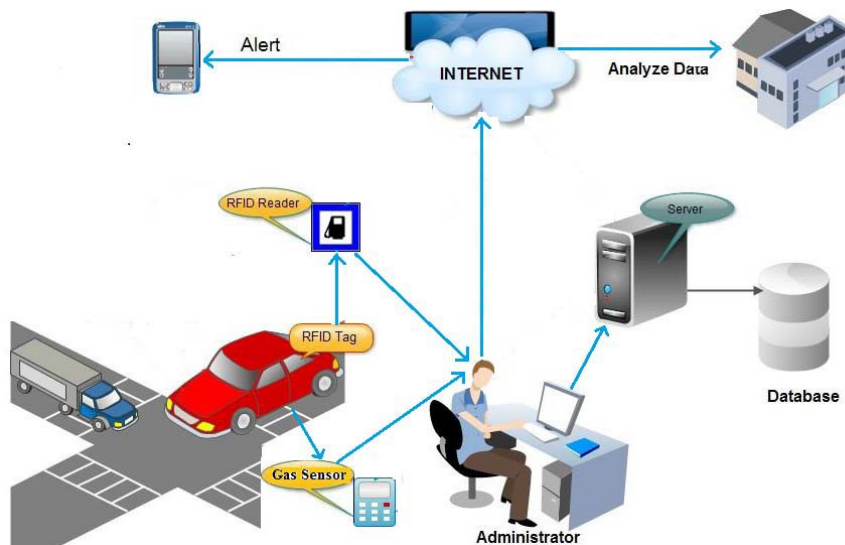
Οι Rushikesh και Sivappagari, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, βασισμένο στο ΔτΠ, προκειμένου να παρακολουθούν τα επίπεδα αέριων ρύπων που παράγονται από μηχανοκίνητα οχήματα, σε πραγματικό χρόνο. Σε κάθε όχημα εγκαθίσταται ένας αισθητήρας-ετικέτα RFID (RFID tag), ενώ σε επιλεγμένα σημεία του δρόμου, πραγματοποιείται η εγκατάσταση του συστήματος παρακολούθησης. Το σύστημα αποτελείται από έναν αισθητήρα-αναγνώστη RFID (EM-18 RFID reader), δύο αισθητήρες (MQ-2 και MQ-7) παρακολούθησης των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και οξειδίων του θείου ( $\text{SO}_x$ ), μία πλακέτα ανάπτυξης μικροελεγκτή Arduino και ένα μικροελεγκτή ATmega328. Κάθε φορά που κάποιο όχημα, εξοπλισμένο με RFID tag, περάσει μπροστά από τον κόμβο εγκατάστασης του συστήματος, ο RFID reader αναγνωρίζει τον αριθμό του οχήματος, ενώ οι αισθητήρες, ποιότητας των αέριων ρύπων που παράγει, πραγματοποιούν μία μέτρηση. Η σχετική μέτρηση αποστέλλεται στον μικροελεγκτή του συστήματος προς επαλήθευση του επιπέδου ρύπανσης. Αφού ολοκληρωθεί η σχετική διαδικασία επαλήθευσης, εάν τα επίπεδα των αέριων ρύπων υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, αποστέλλεται ένα προειδοποιητικό μήνυμα στον ιδιοκτήτη του οχήματος, που περιέχει το επίπεδο ρύπανσης που παράγει το όχημα και το ποσό του προστίμου που πρέπει ο ίδιος να καταβάλει, χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη mobile εφαρμογή. Οι πληροφορίες σχετικά με τα επίπεδα  $\text{CO}_2$  και  $\text{SO}_x$ , ο αριθμός οχήματος, η ταυτότητα RFID του οχήματος, καθώς και η χρονική στιγμή (timestamp) του συμβάντος, αποστέλλονται επίσης στον διακομιστή των

εξουσιοδοτημένων οργανισμών προστασίας του περιβάλλοντος. Οι παραπάνω πληροφορίες αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων του διακομιστή για μελλοντική ανάλυση.

Ένα πρωτότυπο του συστήματος αναπτύχθηκε για την ενσωμάτωση όλων των συσκευών-αισθητήρων, και στη συνέχεια δοκιμάστηκε στην πράξη. Το ανεπτυγμένο σύστημα είναι χαμηλού κόστους, απλό στη χρήση και τοποθετείται εύκολα σε κάθε τοποθεσία, με την επίδοσή του να επαληθεύεται επιτυχώς, για διάφορους τύπους οχημάτων.



Σχήμα 5.32: Προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης με χρήση RFID [122]



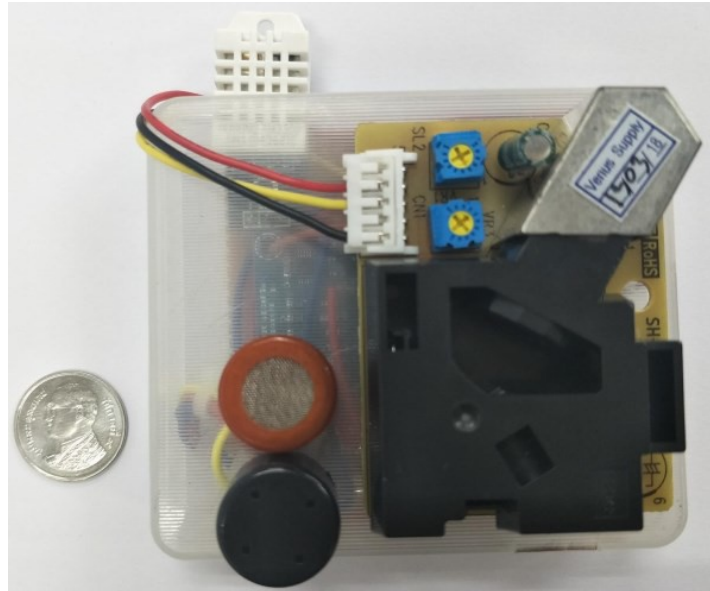
Σχήμα 5.33: Προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης της ρύπανσης με χρήση του ΔτΠ [122]

**Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα που βασίζεται στο πρωτόκολλο MQTT, χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα NodeMCU και το εργαλείο Node-RED [60]**

Οι Chanthakit και Rattanaroka, χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα NodeMCU και το μικροσίπ Wi-Fi ESP8266, όπου συνδέονται αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (MQ-7), όζοντος (MQ-131), θερμοκρασίας, υγρασίας (DHT22) και αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> (PPD42NJ), στέλνουν τα παραπάνω παραγόμενα δεδομένα σε έναν MQTT broker. Το εργαλείο Node-RED λειτουργεί ως συνδρομητής του MQTT Broker και λαμβάνει τα δεδομένα που διαθέτει ο

τελευταίος. Στη συνέχεια, κατόπιν σχετικής διαχείρισης του συνόλου δεδομένων (dataset) με το Node-RED, το dataset αποστέλλεται σε μία Web εφαρμογή, η οποία προβάλλει τα δεδομένα μορφοποιημένα, και μπορεί να ειδοποιεί τους χρήστες όταν ορισμένες τιμές υπερβούν τα επιτρεπτά, ασφαλή, όρια.

Το παραπάνω σύστημα προσφέρει μία οικονομική λύση παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με μία συσκευή μικρού μεγέθους. Η λειτουργικότητά της επαληθεύθηκε ελέγχοντας τόσο το μηχανισμό μέτρησης και απεικόνισης των δεδομένων στην εφαρμογή τελικού χρήστη, όσο και το σύστημα δημιουργίας ειδοποιήσεων, σε περιπτώσεις φυσιολογικών ή μη φυσιολογικών τιμών μετρήσεων.

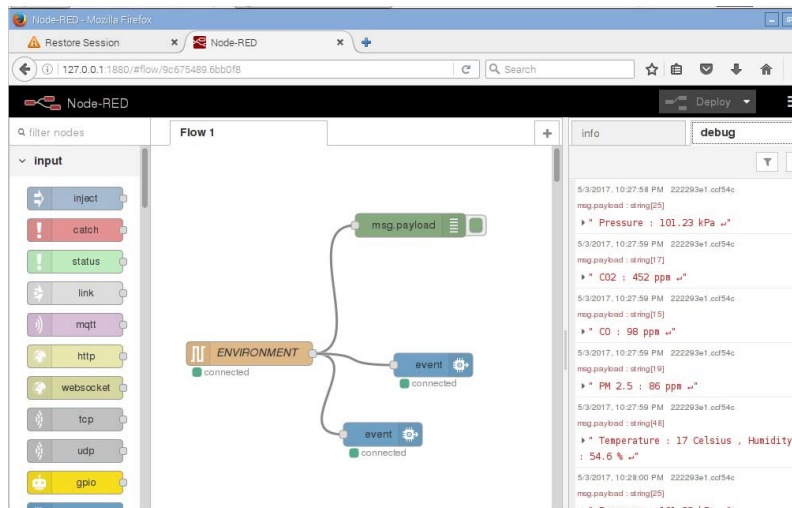


Σχήμα 5.34: Η ολοκληρωμένη συσκευή μέτρησης της ποιότητας του αέρα [60]

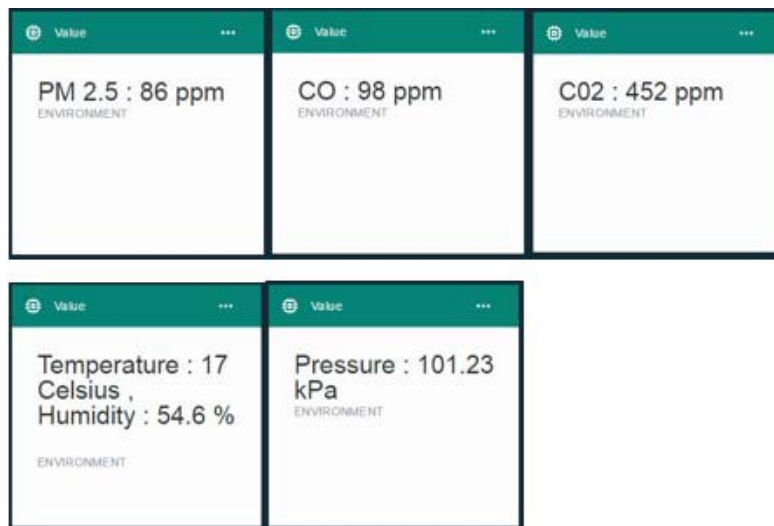
### ***Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, βασισμένο στο ΔτΠ, με τη χρήση Raspberry Pi και της πλατφόρμας Watson IoT [123]***

Οι Kumar και Jasuja, παρουσιάζουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, το οποίο με φθινό, αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά ακριβή τρόπο, υπολογίζει τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> (DSM501A), μονοξειδίου του άνθρακα (MQ-9), διοξειδίου του άνθρακα (MQ-135), τη θερμοκρασία, την υγρασία (DHT22) και την πίεση του αέρα (BMP180), μελετώντας την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα του Δελχί της Ινδίας, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με τα αντίστοιχα διαθέσιμα στοιχεία της τοπικής αρχής ελέγχου περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήσαν, συνδέθηκαν σε μία πλακέτα Arduino UNO, ενώ ο αισθητήρας μονοξειδίου του άνθρακα συνδέθηκε μέσω USB σε ένα Raspberry Pi, που με τη σειρά του συνδέεται στο διαδίκτυο μέσω του πρωτοκόλλου Wi-Fi. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποστέλλονται στην πλατφόρμα Watson IoT της IBM και είναι άμεσα προσβάσιμα από κάθε σημείο του πλανήτη, μέσω της πλατφόρμας IBM Bluemix IoT.

Το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και υψηλή ακρίβεια μετρήσεων για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος. Οι ερευνητές παρουσιάζουν τη ροή του οπτικού προγραμματιστικού του εργαλείου Node-RED, καθώς και την ανάλυση που πραγματοποιείται βάσει της συσκευής που υλοποιήθηκε (device centric analysis) στην πλατφόρμα Watson IoT της IBM. Οι παραγόμενες τιμές των αισθητήρων δεν παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τις αναμενόμενες.



Σχήμα 5.35: Η ροή του συστήματος στο εργαλείο Node-RED [123]



Σχήμα 5.36: Παρουσίαση τιμών μετρούμενων παραμέτρων μέσω του Watson IoT [123]

***IoT-Mobair: Σύστημα ΔτΠ παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με χρήση της πλατφόρμας ΔτΠ Ubidots [124]***

Οι Dhingra, Madda, Gandomi, Patan και Daneshmand, προτείνουν ένα δικό τους σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο. Αισθητήρες μέτρησης αέριων ρύπων (MQ-2, MQ-7 και MQ-135) συνδέονται σε ένα Arduino, το οποίο έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο χάρη στη μονάδα Wi-Fi ESP8266. Στην πλευρά του Arduino, δημιουργείτε ένας HTTP πελάτης (client) που καλεί μία υπηρεσία JSON, προκειμένου να περάσει τα παραγόμενα δεδομένα στο cloud. Τα δεδομένα παρουσιάζονται, αποθηκεύονται και επεξεργάζονται μέσω της πλατφόρμας ΔτΠ Ubidots. Στη συνέχεια, η Android εφαρμογή τους, «IoT-Mobair», παραλαμβάνει τα δεδομένα που έχουν αποσταλεί από το Arduino, χρησιμοποιώντας υπηρεσίες της πλατφόρμας Ubidots, και τα παρουσιάζει καταλλήλως μορφοποιημένα στο χρήστη. Η εφαρμογή «IoT-Mobair» χρησιμοποιεί δεδομένα τοποθεσίας χρήστη, μέσω GPS, τεχνολογίες του ΔτΠ, αισθητήρες και βασικές ιστοσελίδες, προκειμένου να παρέχει δεδομένα ποιότητας του αέρα. Κάθε φορά που ένας χρήστης κατευθύνεται προς έναν προορισμό, προβλέπεται το επίπεδο ρύπανσης ολόκληρης της διαδρομής και εμφανίζεται μία προειδοποίηση εάν το επίπεδο ρύπανσης είναι πολύ υψηλό, ώστε ο χρήστης να μπορεί να τροποποιήσει τη διαδρομή του.

Δεδομένα ιστορικού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό την πρόβλεψη των επιπέδων ρύπανσης των επόμενων ημερών.

Καθώς ολοκληρώνεται η συνολική ανάπτυξη του συστήματος, επαληθεύεται η λειτουργικότητά του, ενώ φαίνεται πως αντιμετωπίζει υπολογιστική πολυπλοκότητα, ειδικά σε περιπτώσεις ενασχόλησης με μεγάλα δεδομένα (big data) αισθητήρων. Καθώς, λειτουργεί με μικρές συσκευές, όπως αισθητήρες και πλακέτα Arduino, οι οποίες αποτελούν συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης της ρύπανσης, το σύστημα των ερευνητών, σύμφωνα με τα λεγόμενά τους, είναι πιο αποτελεσματικό και καταναλώνει λιγότερη ενέργεια.

### ***Σχεδιασμός και εφαρμογή συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα βάσει LPWAN [125]***

Οι Zheng, Zhao, Yang, Xiong και Xiang, ανέπτυξαν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, χρησιμοποιώντας φορητούς αισθητήρες που καταγράφουν τις τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (PMS5005) που συγκεντρώνονται σε αυτόν, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, και προωθούν τα παραπάνω δεδομένα μέσω ενός δικτύου LPWA στο cloud, όπου επεξεργάζονται και αναλύονται. Η αρχιτεκτονική της συγκεκριμένης εφαρμογής απαρτίζεται από τρία επίπεδα: Αίσθησης (Sensing), Δικτύου (Network) και Εφαρμογής (Application). Για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας, προστέθηκε ένας προσαρμοστικός κύκλος λειτουργίας στον κόμβο αίσθησης. Δεδομένου ότι η ποιότητα του αέρα συνήθως δεν παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις σε μικρό χρονικό διάστημα, ο κόμβος ενεργοποιείται για την μέτρηση της ποιότητας του αέρα, και την αντίστοιχη μετάδοσή της, κάθε δέκα λεπτά από προεπιλογή, ενώ τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια με τη χρήση ενός ηλιακού πάνελ. Εάν η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών σετ δεδομένων που παρήχθησαν είναι μεγαλύτερη από το δεδομένο κατώφλι (threshold), ο κύκλος λειτουργίας μειώνεται έτσι ώστε να παρακολουθείται η ποιότητα του αέρα συχνότερα. Διαφορετικά, η διάρκεια αδράνειας μπορεί να αυξηθεί στην προεπιλεγμένη τιμή. Στο δεύτερο επίπεδο, αυτό του δικτύου, το LPWA δίκτυο βασίζεται στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4k, προσφέροντας αμφίδρομη συνδεσιμότητα μεταξύ των αισθητήρων και του σημείου πρόσβασης (access point). Το πρωτόκολλο Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) χρησιμοποιείται στο φυσικό επίπεδο του σημείου πρόσβασης, ώστε να επιτευχθεί άριστη επίδοση στο κομμάτι της κάλυψης. Το επίπεδο εφαρμογής είναι απαραίτητο τόσο για την επεξεργασία των παραγόμενων δεδομένων, όσο και για την παροχή διαδραστικών υπηρεσιών στους χρήστες. Μέσω μία ιστοσελίδας ή μίας εφαρμογής Android, παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικές με την ποιότητα του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, όπως ο τρέχων δείκτης ποιότητας αέρα (AQI), η τάση του AQI της τρέχουσας ημέρας, καθώς και η τάση του AQI την περασμένη εβδομάδα ή τον περασμένο μήνα.

Οι ερευνητές αξιολόγησαν τα αποτελέσματα και την ακρίβεια του συστήματος σε δύο στάδια, ελέγχοντας πρώτα την απόδοση του LPWA δικτύου χρησιμοποιώντας την τιμή παρεμβολής φέροντος (carrier-to-interference - C/I) των ληφθέντων πακέτων πληροφορίας, ως μετρική εκτίμησης απόδοσης και, στη συνέχεια, ελέγχοντας την αξιοπιστία του επιπέδου αίσθησης (sensing), συγκρίνοντας τις παραγόμενες μετρήσεις του με μία γνωστή βάση δεδομένων ιστορικού PM<sub>2.5</sub>, συμπεραίνοντας πως οι τιμές των δικών τους μετρήσεων συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με τις τελευταίες, και ότι η μικρή απόκλιση που προκύπτει πιθανώς οφείλεται στις διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις όπου πραγματοποιήθηκε η κάθε μέτρηση. Το προτεινόμενο σύστημα είναι σε θέση να ικανοποιήσει τις απαραίτητες απαιτήσεις ακρίβειας και αξιοπιστίας.

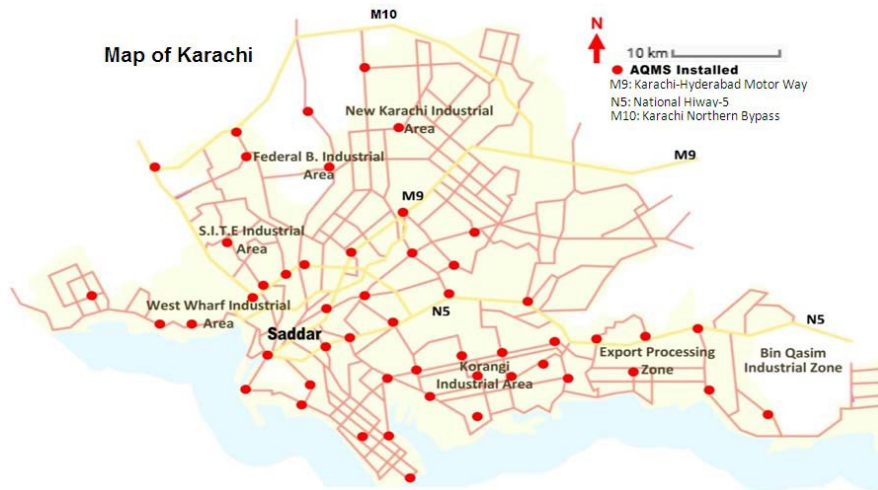


Σχήμα 5.37: Κόμβος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα [125]

***Σχεδιασμός ενεργειακά αποδοτικού συστήματος ΔτΠ, χαμηλού κόστους, για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, με δυνατότητες καταγραφής δεδομένων, στατιστικής ανάλυσης και τεχνητής νοημοσύνης βάσει cloud [84]***

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, σχεδίασαν ένα σύστημα ΔτΠ για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα της πόλης Καράτσι του Πακιστάν. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες οξυγόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του θείου, οξειδίων του αζώτου, υδρογονάνθρακα, θορύβου, φωτός (TSL2561), θερμοκρασίας και υγρασίας (AM2302), προωθούνται οι μετρήσεις τους σε έναν μικροελεγκτή AVR (Atmega32) μέσω ενός κυκλώματος προενισχυτή (pre-amplifier circuit). Το σύστημα είναι ενεργειακά αυτόνομο, για τουλάχιστον 24 ώρες, καθώς είναι εφοδιασμένο με ένα ηλιακό πάνελ με ελεγκτή φόρτισης και μία μπαταρία, αντίστοιχα. Ο μικροελεγκτής ελέγχει και ρυθμίζει την εσωτερική ροή αέρα, χάρη σε μία μικροσκοπική αντλία αναρρόφησης αέρα. Μόλις η ροή αέρα σταθεροποιηθεί, οι μετρήσεις των αισθητήρων διαβάζονται για ένα λεπτό, προκειμένου να κρατηθεί ο μέσος όρος τους και να αποσταλεί στο cloud μέσω ενός μόντεμ GSM, ενώ η ακεραιότητα των δεδομένων που αποστέλλονται διασφαλίζεται από τη σχετική προσθήκη, στο πλαίσιο δεδομένων, των πεδίων Start-code, End-Code και CRC (Cyclic Redundancy Check). Στην πλευρά του cloud αποφασίζονται τα προγράμματα δειγματοληψίας (sampling schedules) του κάθε σταθμού αίσθησης του συνολικού συστήματος, και αποστέλλονται μαζί με επιβεβαιώσεις (acknowledgements) ως απάντηση στους σταθμούς αίσθησης. Τυπικά, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κάθε μία ώρα (24 μετρήσεις ανά ημέρα), ωστόσο ανάλογα με την τάση των μεταβολών ποιότητας του αέρα ανά τοποθεσία, μπορούν να κυμαίνονται από 4 έως 48 ημερησίως. Τέλος, προτείνεται η εγκατάσταση περίπου 50 κόμβων αίσθησης στην πόλη του Καράτσι, σε διαφορετικές τοποθεσίες, υποδεικνύοντας τα κρίσιμότερα σημεία που επιδεινώνουν τη ρύπανση του αέρα της πόλης. Μέσω της συλλογής των παραπάνω δεδομένων, για ένα εύλογο χρονικό διάστημα της τάξης ενός μήνα ή ενός έτους, θα είναι δυνατή η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων και η χρήση τεχνητής νοημοσύνης, προκειμένου να λαμβάνονται στρατηγικές αποφάσεις και να εκτελούνται ελιγμοί ελέγχου, έτσι ώστε η ατμοσφαιρική ρύπανση της πόλης να μπορεί να ελεγχθεί ή να μετριασθεί.

Καθώς η παραπάνω υλοποίηση αποτελεί μία πρόταση των ερευνητών, δεν παρουσιάζεται κάποιο πείραμα ή αποτέλεσμα μετρήσεων στο σχετικό επιστημονικό άρθρο.

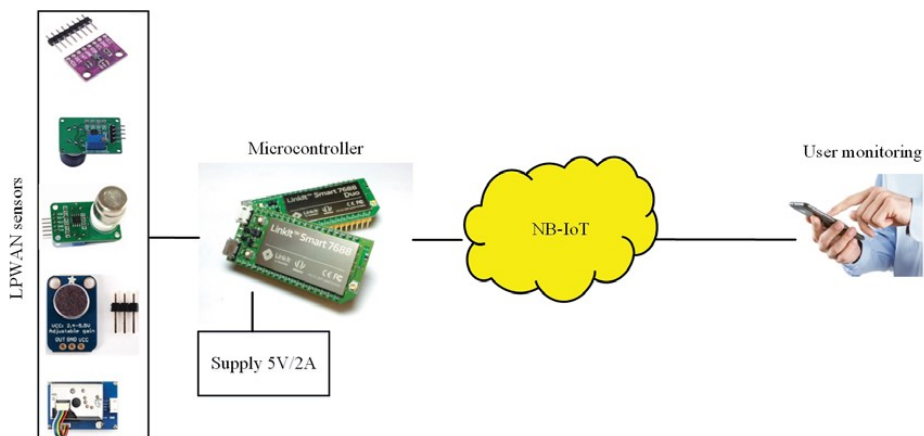


Σχήμα 5.38: Προτεινόμενα σημεία εγκατάστασης του συστήματος στην πόλη Καραάτσι [84]

**Μια μελέτη «έξυπνων» αισθητήρων ατμοσφαιρικής ρύπανσης LPWAN, μέσω του πρωτοκόλλου NB-IoT για το πρόγραμμα Thailand Smart Cities 4.0 [126]**

Οι Duangsuwan, Takarn, Nujankaew και Jamjareegulgarn, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της μόλυνσης του αέρα της Μπανγκόκ (Ταϊλάνδη), κάνοντας χρήση «έξυπνων» αισθητήρων αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> (GP2Y1010AU0F), μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα (CJM CU-811 και LM393), επιπέδου θορύβου, μετρούμενο σε dB, και όζοντος (MQ-131). Τα δεδομένα των σχετικών μετρήσεων αποστέλλονται μέσω της τεχνολογίας LTE σε ένα δίκτυο NB-IoT, που ανήκει στην οικογένεια LPWAN (Low Power Wide Area Network), με τελικό σκοπό την παρακολούθηση των δεδομένων από τους τελικούς χρήστες μέσω μίας ιστοσελίδας.

Δοκιμαστικές μετρήσεις τις μόλυνσης του αέρα της Μπανγκόκ έλαβαν χώρα σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες της πόλης, παρακολουθώντας τόσο τις τιμές των μετρήσεων των διάφορων αισθητήρων, όσο και του υπολογιζόμενου δείκτη ποιότητας του αέρα AQI για το διάστημα επτά ημερών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κυμαίνονταν σε υγιή επίπεδα, ενώ, πρέπει να σημειωθεί, πως οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο κατά τις απογευματινές ώρες κάθε ημέρας.



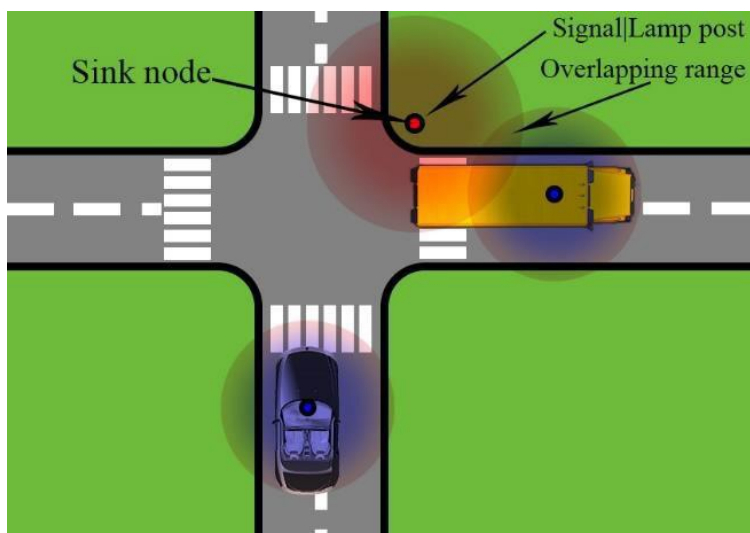
Σχήμα 5.39: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος LPWAN «έξυπνων» αισθητήρων ρύπανσης του αέρα μέσω του NB-IoT [126]

### 5.3.1.2 Συστήματα εγκατεστημένα σε οχήματα

#### *Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα βασισμένο στο ΔτΠ, υλοποιημένο σε υπηρεσίες δημόσιων λεωφορείων [127]*

Οι Saha, Shinde και Thadeshwar, προτείνουν ένα σύστημα ΔτΠ ανεπτυγμένο για εγκατάσταση σε δημόσια λεωφορεία, με σκοπό τη συνεχή παρακολούθηση της μόλυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα, σε πραγματικό χρόνο. Το προτεινόμενο μοντέλο είναι αρκετά απλό, αποτελεσματικό και μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα για τη μείωση και τον καλύτερο έλεγχο των αέριων ρύπων. Οι αισθητήρες μέτρησης αέριων ρύπων, όπως διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου και αιωρούμενων σωματιδίων, εγκαθίστανται στα δημόσια λεωφορεία και εκτελούν τις μετρήσεις τους καθώς τα λεωφορεία είναι εν κινήσει. Κατά αυτό τον τρόπο, δεδομένου ότι τα περισσότερα λεωφορεία ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές μέσα στην πόλη, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αυτής, συμβάλλοντας στην καλύτερη παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα που αναπνέουν οι πολίτες της. Μία μέτρηση σημειώνεται μόνο σε περίπτωση μεγάλης άνω ή κάτω απόκλισης σε σχέση με μία προκαθορισμένη τιμή. Σε στρατηγικά σημεία της πόλης, όπως σε διασταυρώσεις, τοποθετούνται σταθεροί κόμβοι όπου όταν ένα λεωφορείο θα περάσει από μπροστά τους, τα παραγόμενα δεδομένα των αισθητήρων θα μεταδοθούν στο στατικό κόμβο, όσο λεωφορείο και κόμβος βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος απόστασης. Ο κάθε κόμβος με τη σειρά του θα αποστείλει τα δεδομένα μετρήσεων στο cloud. Η επικοινωνία των δεδομένων πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα της μεθόδου ραδιοσημάτων μεγάλης εμβέλειας σε cloud (οι ζώνες στα 2400-2483 MHz και 902-928 MHz είναι δύο από τις ζώνες χωρίς άδεια που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο IEEE 802.15.4). Οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται στο cloud, μπορούν να ανακτηθούν οποιαδήποτε στιγμή, σε πραγματικό χρόνο, ενώ κάθε μέτρηση μπορεί να αναλυθεί με χρήση τεχνικών ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data). Τέλος, σε περίπτωση βλάβης κάποιου κόμβου δεν τίθεται κάποιο σοβαρό ζήτημα, καθώς το κάθε λεωφορείο περνά από περισσότερες από μία διασταυρώσεις, με αποτέλεσμα να καταφέρει τελικά να μεταδώσει τις μετρήσεις του στον αμέσως επόμενο διαθέσιμο και λειτουργικό κόμβο.

Καθώς η παραπάνω υλοποίηση αποτελεί μία πρόταση των ερευνητών, δεν παρουσιάζεται κάποιο πείραμα ή αποτέλεσμα μετρήσεων στο σχετικό επιστημονικό άρθρο.

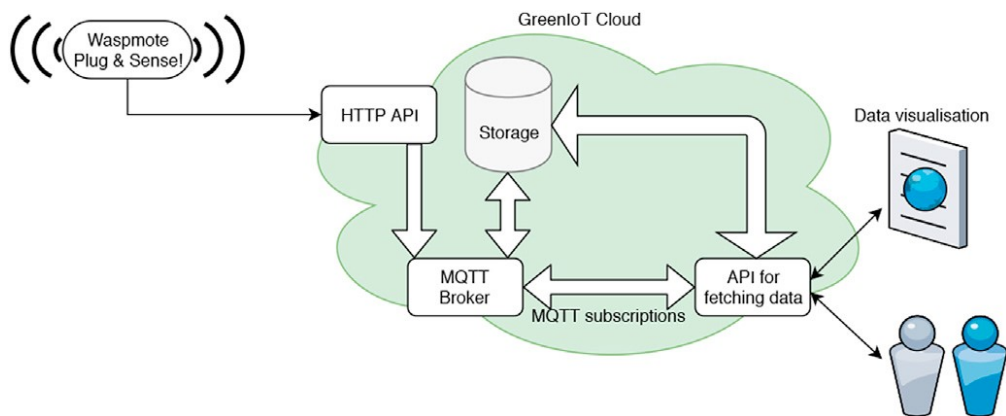


Σχήμα 5.40: Αισθητήρες μεταδίδουν δεδομένα στον κόμβο συλλογής (sink node) [127]

***Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σε πραγματικό χρόνο, με τη χρήση αισθητήρων σε αστικό λεωφορείο [128]***

Οι Kaivonen και Ngai, του πανεπιστημίου της Ουψάλας στη Σουηδία, παρουσιάζουν την πειραματική μελέτη τους πάνω στην παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, με χρήση λεωφορείων και τεχνολογίες του ΔτΠ. Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί μέρος του ερευνητικού έργου GreenIoT της Σουηδίας, όπου έχει αναπτυχθεί μία δοκιμαστική βάση (testbed) με σταθερά εγκατεστημένους και ασύρματους, κινητούς, αισθητήρες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με σκοπό την καλύτερη κάλυψη της πόλης της Ουψάλας. Τα στάδια της έρευνας των Kaivonen και Ngai, περιλαμβάνουν την εύρεση σετ διαδρομών λεωφορείων που μπορούν να παρέχουν επαρκή κάλυψη της πόλης, η οποία γίνεται πραγματικότητα με χρήση ανάλυσης εικόνας ενός χάρτη διαδρομών λεωφορείων, πρόσβαση στον οποίο έδωσε η τοπική εταιρεία λεωφορείων (Upplands Lokaltrafik), την εγκατάσταση ενός συστήματος αισθητήρων σε ένα δημόσιο λεωφορείο και την αντίστοιχη αξιολόγηση της ικανότητας ενός κινούμενου συστήματος συγκριτικά με ένα σταθερά εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων, καθώς και την αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων που παράγει το πρώτο. Το σύστημα-αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται Libelium Waspote Plug & Sense! ή Smart Environment PRO και περιλαμβάνει αφαιρούμενους αισθητήρες για τη μέτρηση διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), θερμοκρασίας και πίεσης. Είναι αυτόνομο, καθώς ενσωματώνει επαναφορτιζόμενη μπαταρία, η οποία φορτίζει μέσω ηλιακού πάνελ, ενώ υποστηρίζει επικοινωνία των παραγόμενων δεδομένων του μέσω του πρωτοκόλλου 4G (με χρήση μίας κάρτας SIM), και GPS παρακολούθηση της τοποθεσίας του. Το σύστημα εγκαθίσταται σε ένα υβριδικό λεωφορείο το οποίο χάρη στη μερικώς ηλεκτρική λειτουργία του και στις τεχνολογίες που ενσωματώνει, εξοικονομεί 10.000 λίτρα πετρελαίου και μειώνει έως και 26 τόνους διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ετησίως, ενισχύοντας τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα της πόλης. Τα δεδομένα του συστήματος συλλέγονται στο διακομιστή cloud του GreenIoT και η απεικόνισή τους γίνεται μέσω του Google Maps, πρώτον με την προβολή ενός χάρτη θερμότητας (heat map), και δεύτερον με την προβολή των 10 πιο πρόσφατων μετρήσεων σε έναν χάρτη που ανανεώνεται, σε πραγματικό χρόνο, βάσει της τοποθεσίας και της κίνησης του λεωφορείου.

Προκειμένου να προστατευτεί το σύστημα-αισθητήρας από τις κακές καιρικές συνθήκες, που πιθανώς θα συναντούσε κατά τη λειτουργία του, χρησιμοποιήθηκε ένα αδιάβροχο κουτί για την προστασία του μετατροπέα τάσεως, ενώ ένα ειδικό κάλυμμα σχεδιάστηκε σε συνεργασία με την εταιρεία Gamla Uppsala Bus AB, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζει υπερβολικά το σήμα 4G, ούτε να εμποδίζει τους αισθητήρες να λαμβάνουν μετρήσεις των αέριων ρύπων και τον περιβαλλοντικών συνθηκών, γενικότερα. Κατόπιν πειραμάτων, αποδείχθηκε πως ο αισθητήρας μονοξειδίου του άνθρακα (CO) λειτουργήσε αποδοτικά, όπως αυτό είχε εκτιμηθεί, ωστόσο ο αισθητήρας διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) είχε ποσοστό επιτυχίας μέτρησης μη μηδενικής συγκέντρωσης του αερίου ίσο με 1% μόνο, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στη χαμηλή του ευαισθησία. Η αποστολή των δεδομένων με χρήση του πρωτοκόλλου 4G αποδείχθηκε αρκετά επιτυχής, με ποσοστό επιτυχίας ίσο με 70% χωρίς επαναποστολή. Με χρήση δύο λειτουργιών, αποθήκευσης των μετρήσεων και επαναμετάδοσης, το ποσοστό επιτυχίας έφτασε το 100%.



Σχήμα 5.41: Δικτυακό διάγραμμα της διαδρομής που ακολουθούν τα δεδομένα από την πλευρά του αισθητήρα προς τους τελικούς χρήστες [128]

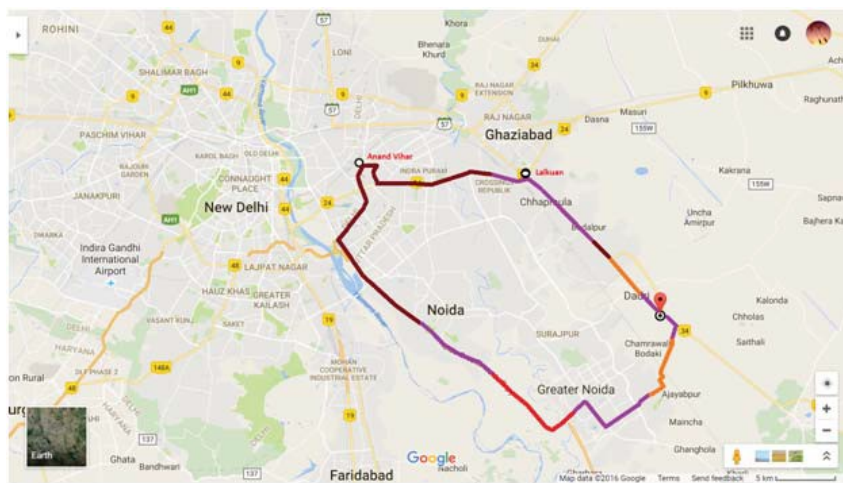
**Σύστημα ΔτΠ ανίχνευσης, ανάλυσης και πρόβλεψης της ποιότητας του αστικού αέρα με χρήση του Watson IoT [129]**

Οι Barthwal και Acharya, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης, συλλογής και ανάλυσης της παρουσίας διαφορετικών αέριων ρύπων και περιβαλλοντικών παραμέτρων, πραγματικού χρόνου, με τη μορφή ενός χάρτη διαδρομών, βάσει της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Με τη χρήση αισθητήρων όπως ο MQ-2, για μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα, και του DHT22, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας συνδεδεμένα σε ένα Arduino Uno R3, συλλέγονται τα αντίστοιχα ωφέλιμα δεδομένα τα οποία αποστέλλονται σε μία τρίτη συσκευή smartphone, χάρη στην μονάδα Bluetooth hc-05. Το σύστημα εγκαθίσταται σε οχήματα, προκειμένου να πραγματοποιείται η συλλογή των δεδομένων, από διαφορετικά γεωγραφικά σημεία. Στη συνέχεια, η Android εφαρμογή που λαμβάνει τα δεδομένα, είναι υπεύθυνη για την αποστολή τους στο cloud, πιο συγκεκριμένα, στην πλατφόρμα IBM Bluemix, με χρήση της πλατφόρμας Watson IoT. Ένας Apache διακομιστής δημιουργεί έναν χάρτη διαδρομών ρύπανσης (pollution route map), βάσει των παραπάνω δεδομένων, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο χρώμα, πάντα σύμφωνα με την τιμή του AQI, ενώ το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στους τελικούς χρήστες, είτε μέσω μίας Android εφαρμογής είτε μέσω μίας ιστοσελίδας. Όσον αφορά το ενδεχόμενο πρόβλεψης του δείκτη ποιότητας του αέρα AQI, οι τρεις συνηθέστερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν την κλιματολογία, στατιστικές τεχνικές, όπως πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, καθώς και τα τρισδιάστατα μοντέλα.

Δεδομένου ότι η υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί τον σημαντικότερο ρύπο της πόλης του Δελχί, θεωρείται πως καθορίζει συνολικά την ποιότητα του αέρα της. Μετά την ολοκλήρωση πειραματικών μετρήσεων, οι ερευνητές ανακάλυψαν πως σε πολλές διαδρομές της πόλης, οι πολίτες εκτίθενται σε υψηλές τιμές αιωρούμενων σωματιδίων, ακόμη και 20 φορές υψηλότερες, από το ασφαλές όριο των 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  που υποδεικνύει ο Π.Ο.Υ.



Σχήμα 5.42: Εγκατάσταση και χρήση του συστήματος σε αυτοκίνητο [129]

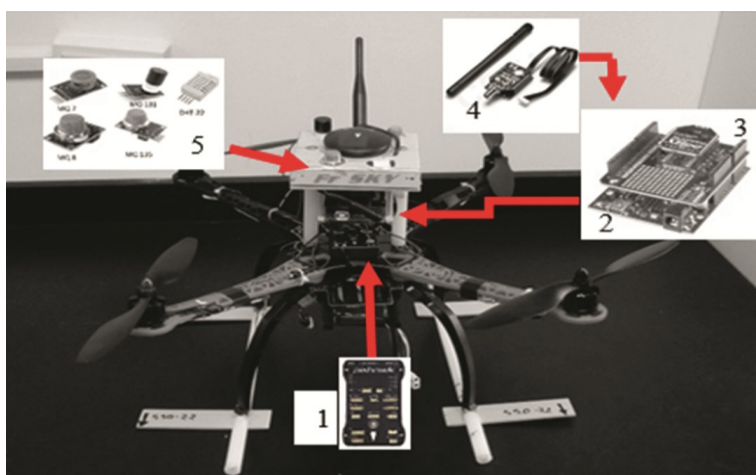


Σχήμα 5.43: Χάρτης διαδρομής ρύπανσης [129]

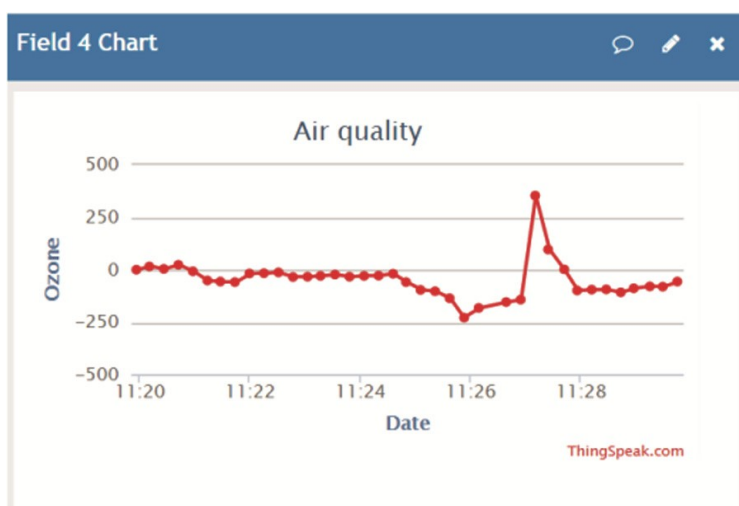
***Σύστημα ΔτΠ για την παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών ρύπων μία έξυπνης πόλης, με τη χρήση μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV) [130]***

Οι Hernández-Vega, Varela, Romero, Hernández-Santos, Cuevas και Gorham, προτείνουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, σχεδιασμένο και ενσωματωμένο σε ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV), με σκοπό την απόκτηση δεδομένων των αέριων ρύπων στον κάθετο άξονα. Το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα λειτουργεί χωρίς την επιβίβαση κάποιου πιλότου σε αυτό, χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα αυτόματου πιλότου ή μέσω απομακρυσμένου χειρισμού, ενώ είναι ικανό να μένει στον αέρα για περισσότερο χρονικό διάστημα με αεροδυναμικά μέσα. Το σύστημα μπορεί να μετρήσει τη συγκέντρωση μίας σειράς αερίων, όπως διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα (MQ-135 και MQ-7), όζον (MQ-131), υδρογόνο (MQ-8), αλλά και τη τρέχουσα θερμοκρασία και υγρασία του περιβάλλοντος (DHT22), χάρη στην ύπαρξη αισθητήρων που εγκαθίστανται πάνω στο UAV. Με χρήση ραδιοσυχνοτήτων τα παραγόμενα δεδομένα που συλλέγονται, αποστέλλονται σε ένα σταθμό εδάφους σε απόσταση 30 με 35 μέτρων από το UAV στον κάθετο άξονα, όπου ο τελευταίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία τους και την αποστολή τους σε έναν cloud διακομιστή. Τα δεδομένα είναι προσβάσιμα μέσω οποιασδήποτε συσκευής με πρόσβαση στο διαδίκτυο, σε πραγματικό χρόνο.

Το πρωτότυπο του συστήματος, που υλοποιήθηκε από τους ερευνητές, κατάφερε να διατηρήσει μία σταθερή σύνδεση, μεταξύ UAV και σταθμού εδάφους, γραμμικής απόστασης 203 μέτρων, χωρίς απώλειες ή παρεμβολές. Το συγκεκριμένο μοντέλο UAV με το αντίστοιχο εγκατεστημένο σύστημα στο κέντρο του πλαισίου του, βάρους 400 γραμμαρίων, μειώνει την αυτονομία της μπαταρίας του και κατ' επέκταση την ώρα πτήσης του από τα 15 στα 10 λεπτά. Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές μετρήσεων των αισθητήρων ήταν πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές για ένα χρονικό διάστημα, ενώ στη συνέχεια σταθεροποιήθηκαν, καθώς, πρώτον, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες απαιτούν χρόνο για τη σταθεροποίησή τους και, δεύτερον, λόγω των κορυφών τάσεως που παρατηρούνται κατά τη σύνδεση του ολοκληρωμένου συστήματος. Έτσι, οι ερευνητές σημειώνουν πως οι αισθητήρες MQ, που χρησιμοποιούνται στο σύστημα, είναι μεν ιδανικοί λόγω του μεγέθους και του βάρους τους για την παρούσα εφαρμογή, ωστόσο λόγω του χρόνου απόκρισης και της αστάθειας κατά την αλλαγή της υγρασίας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα, επομένως δεν συνιστάται η χρήση τους σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια. Η απεικόνιση των παραγόμενων δεδομένων των αισθητήρων, μεμονωμένα, πραγματοποιήθηκε στον web διακομιστή ThingSpeak υπό τη μορφή γραφημάτων.



Σχήμα 5.44: Μονάδα παρακολούθησης ατμοσφαιρικών ρύπων [130]



Σχήμα 5.45: Παράδειγμα γραφήματος μετρήσεων όζοντος βάσει χρόνου (οι αρνητικές τιμές οφείλονται στις λανθασμένες – μη έγκυρες μετρήσεις των αισθητήρων) [130]

***Σύστημα UAV παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για έξυπνες πόλεις, με χρήση τηλεμετρίας ραδιοσυχνότητας και του πρωτοκόλλου Wi-Fi [131]***

Οι Gu και Jia, προτείνουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με έναν αρθρωτό (modular) σχεδιασμό που επιτρέπει σε μία πλατφόρμα μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος καταναλωτή να μεταφέρει πολλαπλούς αισθητήρες και να είναι σε θέση να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο διάφορους αέριους ρύπους. Αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (OPC-N2) και διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>-B43F) έχουν εγκατασταθεί πάνω στο UAV, προσφέροντας τις μετρήσεις τους σε μία μονάδα συγχώνευσης δεδομένων (data fusion) που τις συγκεντρώνει σε ένα σημείο. Στη συνέχεια, τα παραγόμενα δεδομένα αποστέλλονται μαζικά μέσω της μονάδας επικοινωνίας του UAV στο σταθμό εδάφους, είτε μέσω του πρωτοκόλλου Wi-Fi για δεδομένα που απαιτούν υψηλή διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput), εφόσον η απόσταση επικοινωνίας το επιτρέπει, είτε μέσω τηλεμετρίας ραδιοσυχνότητας, η οποία είναι κατάλληλη για επικοινωνία δεδομένων χαμηλού ρυθμού, όμως παρέχει κάλυψη επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων. Καθώς τα δεδομένα αισθητήρων μεταδίδονται στο σταθμό εδάφους σε πραγματικό χρόνο, προστέθηκαν επίσης νέα συστατικά λογισμικού (software components) στο σταθμό εδάφους για λήψη, αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων. Παράλληλα, το UAV που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει ένα πλούσιο σετ αισθητήρων, όπως GPS, μαγνητικό αισθητήρα και βαρόμετρο, παρέχοντας δεδομένα γεωγραφικής θέσης και υψομέτρου, σε πραγματικό χρόνο, μέσω σειριακών θυρών στον ενσωματωμένο υπολογιστή του UAV, NanoPI Neo Air. Για σκοπούς πειραματικών δοκιμών, αναπτύχθηκαν δύο εφαρμογές: μία η οποία αποθηκεύει όλα τα δεδομένα σε αρχεία csv για ανάλυση δεδομένων εκτός σύνδεσης (offline), και μία εφαρμογή η οποία λειτουργεί ως διαδικτυακή υπηρεσία (web service) για την παροχή δεδομένων ατμοσφαιρικών ρύπων σε πραγματικό χρόνο και δεδομένων UAV, σε smartphones και υπολογιστές μέσω Wi-Fi.

Οι πιλοτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το πρωτότυπο σύστημα, δείχνουν πως οι ενσωματωμένες συσκευές δε επηρέασαν την κατανάλωση ισχύος της μπαταρίας του UAV ή το χρόνο πτήσης του, ενώ, αντίθετα, επηρέασαν τις ενδείξεις των μετρήσεων των αισθητήρων σε ένα βαθμό, λόγω των ηλεκτρονικών παρεμβολών που παράχθηκαν από το UAV.

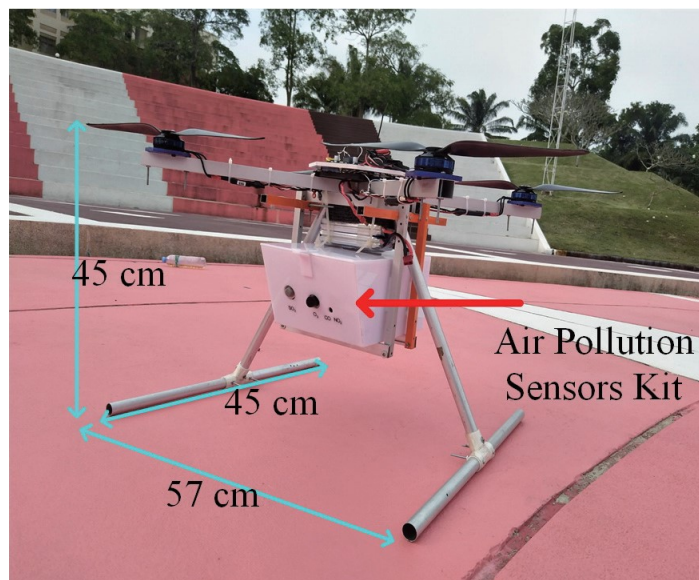


Σχήμα 5.46: Πρωτότυπο του UAV συστήματος παρακολούθησης ποιότητας του αέρα [131]

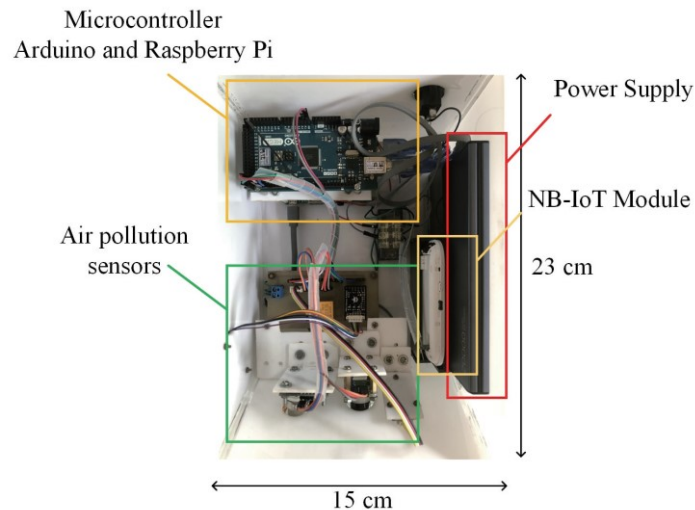
**Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με drone, σε πραγματικό χρόνο, για έξυπνη κινητή αίσθηση (mobile sensing) σε περιοχές με χαμηλή προσβασιμότητα [132]**

Οι Duangsuwan και Jamjareegulgarn, παρουσιάζουν ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV/Drone) για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, υπό το όνομα Dr-TAPM (Drone Real-time Air Pollution Monitoring), με σκοπό τη διεξαγωγή μετρήσεων της συγκέντρωσης αέριων ρύπων, περιοχών χαμηλής προσβασιμότητας. Το σύστημα, που εγκαθίσταται στο drone, είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες αέριων ρύπων, συμπεριλαμβανομένων ενός αισθητήρα όζοντος (MQ-131), ενός μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του αζώτου (MiCS-6814), ενός διοξειδίου του θείου (2SH12) και ενός αισθητήρα αιωρούμενων σωματιδίων (PMS3003). Όλοι οι αισθητήρες αποστέλλουν τα παραγόμενα δεδομένα τους στον μικροελεγκτή, Arduino MEGA2260, του συστήματος προς επεξεργασία, ενώ ένα Raspberry Pi 3 μεταδίδει όλα τα παραπάνω δεδομένα στην υλοποιημένη mobile εφαρμογή, σε πραγματικό χρόνο, μέσω του πρωτοκόλλου NB-IoT. Με αυτό τον τρόπο, τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εν λόγω μετρήσεις, παρουσιάζονται προς τον χρήστη, μέσω της mobile εφαρμογής, σε μορφή γραφημάτων ποσοτικών επιπέδων ρύπων και τιμών δείκτη ποιότητας του αέρα AQI. Σε περίπτωση χρήσης power bank (20.000 mAh), οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς άλλη παροχή ενέργειας για περισσότερο από πέντε ώρες.

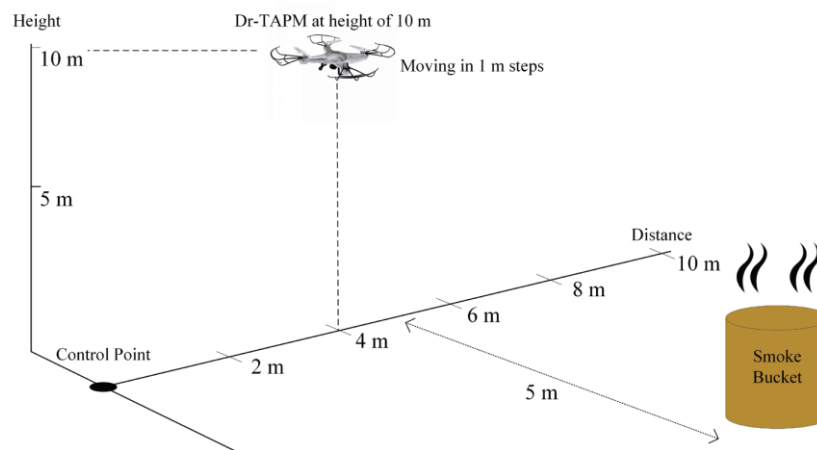
Ένα πείραμα με παρουσία καπνού διεξήχθη χρησιμοποιώντας το σύστημα Dr-TAPM. Η δοκιμαστική πτήση πραγματοποιήθηκε σε ύψη των πέντε και δέκα μέτρων, με μετατοπίσεις του ενός μέτρου για δέκα μέτρα, έως ότου το drone φτάσει στην εστία καπνού. Όσο το drone πλησίαζε στο σημείο εννέα προς δέκα μέτρων από όπου ξεκίνησε, και βρισκόταν σε ύψος πέντε μέτρων, η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$  βρισκόταν μέσα στα επιτρεπτά ασφαλή όρια, ωστόσο η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα τα ξεπερνούσε. Στη συνέχεια, όταν το drone ανυψώθηκε στα δέκα μέτρα, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές μετρήσεων των ρύπων μειώθηκαν ελάχιστα από το υψόμετρο των πέντε μέτρων. Οι ερευνητές επαληθεύουν την απόδοση ανίχνευσης αέριων ρύπων του συστήματος και την επιτυχή παρακολούθηση με το μοντέλο ρύπου περιοχής (pollutant area model).



Σχήμα 5.47: Πρωτότυπο του Dr-TAPM [132]



Σχήμα 5.48: Σύστημα αισθητήρων που χρησιμοποιείται στο πρωτότυπο του Dr-TAPM [132]



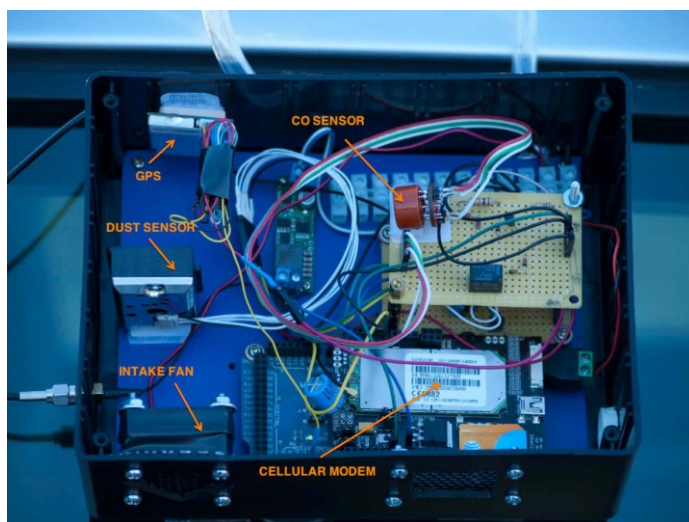
Σχήμα 5.49: Μοντέλο ρύπου περιοχής [132]

**Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο, με χρήση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων κινητής αίσθησης σε μητροπολιτικές περιοχές [133]**

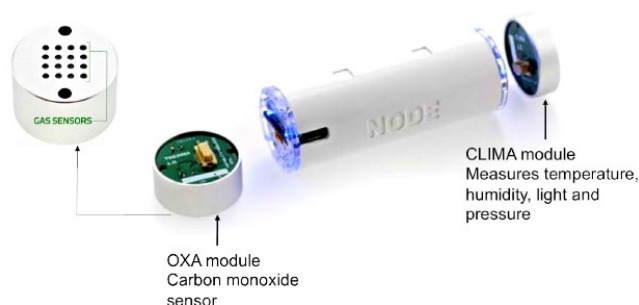
Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, υψηλής ακρίβειας και σε πραγματικό χρόνο, σχεδιασμένο για χρήση σε οχήματα εν κινήσει. Προτείνονται δύο οικονομικά μοντέλα συλλογής δεδομένων: ένα που μπορεί να εγκατασταθεί στις δημόσιες συγκοινωνίες και ένα μοντέλο αίσθησης για προσωπική χρήση σε Ι.Χ. Τα δεδομένα ρύπανσης του αέρα, μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων, συνδυάζονται με πληροφορίες ταχύτητας και γεωγραφικής θέσης GPS και αποστέλλονται μέσω σύνδεσης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας σε έναν διακομιστή cloud, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία τους και τη συγκέντρωσή τους, προκειμένου να δημιουργηθεί ένας χάρτης ρύπανσης προς απεικόνιση, της τρέχουσας κατάστασης της ποιότητας του αέρα, στον τελικό χρήστη. Το μοντέλο συλλογής δεδομένων που προτείνεται προς εγκατάσταση σε δημόσιες υποδομές συγκοινωνιών (Mobile Sensing Box – MSB) χρησιμοποιεί μία πλακέτα μικροελεγκτή, αισθητήρες μονοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων, δέκτη GPS και ένα μόντεμ κινητής τηλεφωνίας (cellular modem), προκειμένου να μπορεί να αποστέλλει τα παραγόμενα δεδομένα στον διακομιστή cloud, ενώ συνδέεται στην μπαταρία του εκάστοτε οχήματος, ώστε να παρέχεται η απαραίτητη ενέργεια λειτουργίας του. Το

δεύτερο μοντέλο αίσθησης για προσωπική χρήση (Personal Sensing Device – PSD) εγκαθίσταται στο εσωτερικό οχημάτων Ι.Χ. από τους ιδιοκτήτες των οχημάτων, και συγκεκριμένα στις γρίλιες του κλιματιστικού με σκοπό να παρακολουθεί την ποιότητα του εξωτερικού αέρα, συνδέεται μέσω Bluetooth στο smartphone του ιδιοκτήτη και προωθεί τις μετρήσεις του. Ο ιδιοκτήτης έχει την επιλογή να κρατήσει τα παραγόμενα δεδομένα για προσωπική του χρήση ή να εγγραφεί και να συμμετέχει σε ένα κοινωνικό πρόγραμμα αίσθησης (sensing), αποστέλλοντας τα δεδομένα αέρα και τοποθεσίας του σε έναν κεντρικό διακομιστή μέσω μίας σύνδεσης κινητής τηλεφωνίας. Η απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιείται χάρη στην υπηρεσία Google Fusion Tables.

Πιλοτικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τα δύο μοντέλα συλλογής δεδομένων σε αυτοκινητόδρομους του New Jersey και της Νέας Υόρκης. Στο πρώτο πείραμα, οι συσκευές MSB και PSD εγκαταστάθηκαν στο εξωτερικό ενός αυτοκινήτου, προς ταυτόχρονη μέτρηση της ρύπανσης του αέρα υπό τις ίδιες συνθήκες. Παρατηρήθηκαν παρόμοιες διακυμάνσεις μεταξύ των δεδομένων και από τις δύο πλατφόρμες και, επιπλέον, ο συντελεστής συσχέτισης spearman μεταξύ τους ήταν ίσος με 0,85, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα αντίστοιχα δεδομένα ρύπανσης και από τις δύο πλατφόρμες παρουσιάζουν ιδιαίτερη συσχέτιση. Ωστόσο, το παραπάνω πείραμα διεξήχθη σε αυτοκινητόδρομο και όχι σε ένα αστικό περιβάλλον, για το οποίο θα πρέπει να γίνει περαιτέρω μελέτη. Στο δεύτερο πείραμα, η συσκευή MSB εγκαταστάθηκε στο εξωτερικό του αυτοκινήτου, ενώ η PSD στο εσωτερικό του, με τις διακυμάνσεις μεταξύ των δεδομένων και από τις δύο πλατφόρμες να είναι και σε αυτή την περίπτωση παρόμοιες. Ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης spearman μεταξύ τους ήταν ίσος με 0,5931, ποσοστό χαμηλότερο από αυτό του πρώτου πειράματος.



Σχήμα 5.50: Μοντέλο συλλογής δεδομένων MSB [133]



Σχήμα 5.51: NODE (PSD) - Ασύρματη πλατφόρμα αισθητήρων της εταιρείας Variable Technologies [133]

### Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με τη χρήση οχημάτων και του πρωτοκόλλου LoRa [134]

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, υλοποίησαν ένα σύστημα οχημάτων, παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και των καιρικών συνθηκών αστικών περιοχών, βασισμένο σε τεχνολογίες του ΔτΠ. Αυτοκίνητα επιλέχθηκαν για την καλύτερη κάλυψη πληθώρας δρόμων, με τη χρήση σχετικών αισθητήρων, προς συλλογή δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας (SHT11), αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> (OneAir A4), διοξειδίου του αζώτου και μονοξειδίου του άνθρακα (MICS-4514), όζοντος (MQ-131), δεδομένων GPS και πληροφοριών δόνησης κατά την οδήγηση του αυτοκινήτου. Καθώς συλλέγονται τα παραπάνω δεδομένα, μεταδίδονται σε μία πύλη (gateway) LoRa μέσω μίας μονάδας μετάδοσης του πρωτοκόλλου LoRa. Πύλες LoRa έχουν εγκατασταθεί σε κάθε περιοχή της πόλης Ταϊπέι (Δημοκρατία της Κίνας) από την κυβέρνησή της. Στη συνέχεια, η πύλη LoRa θα ανεβάσει τα δεδομένα σε μία βάση δεδομένων back-end. Οι ωφέλιμες πληροφορίες, στο σύνολό τους, παρουσιάζονται σε μία πλατφόρμα υλοποιημένη με το IBM Bluemix, μέσω του πρωτοκόλλου MQTT.

Οι ερευνητές προχώρησαν σε ορισμένα πειράματα, προκειμένου να αξιολογήσουν την απόδοση του συστήματος. Η διαδικασία παρακολούθησης και καταγραφής μετρήσεων συγκέντρωσης όζοντος, χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, ενώ προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της μονάδας μετάδοσης του συστήματος, ένα αυτοκίνητο οδηγήθηκε γύρω από το γραφείο της περιοχής Da'an στην Ταϊπέι, δοκιμάζοντας το ρυθμό λήψης των πακέτων πληροφορίας. Σε απόσταση μικρότερη ή ίση των 200 μέτρων μεταξύ της πύλης LoRa και του κόμβου αίσθησης (sensing node), ο ρυθμός λήψης πακέτων πληροφορίας ήταν ίσος με 100%, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις μειώθηκε. Η αύξηση των πυλών LoRa στην Ταϊπέι θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της εμβέλειας κάλυψης της παρακολούθησης των εν λόγω δεδομένων.

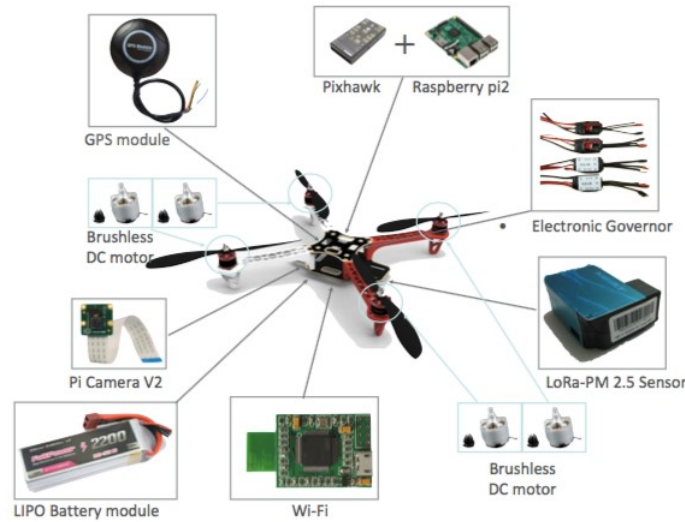


Σχήμα 5.52: Γραφική διεπαφή χρήστη (UI) της υλοποιημένης πλατφόρμας του συστήματος [134]

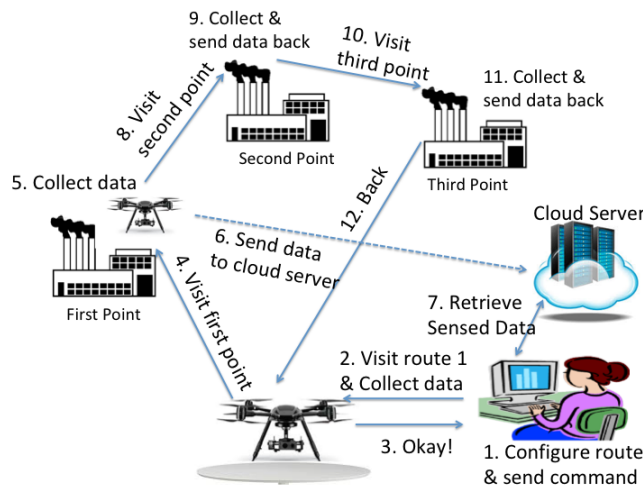
**Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με χρήση του LoRa, εγκατεστημένο σε UAV [62]**

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εγκατεστημένο σε ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα. Μέσω μίας διαδικτυακής διεπαφής χρήστη, ο τελευταίος μπορεί να ορίσει την διαδρομή που θα ακολουθήσει το UAV, προκειμένου να συλλέξει τις κατάλληλες μετρήσεις της ποιότητας του αέρα από τις περιοχές που επιθυμεί, και παράλληλα να μπορεί να ελέγξει, ανά πάσα στιγμή, τις τιμές αυτές. Το σύστημα είναι εφοδιασμένο με έναν αισθητήρα ικανό να παρακολουθεί τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>, καθώς και την τρέχουσα θερμοκρασία και υγρασία (PMS5003T G5T). Τα δεδομένα μετρήσεων αποστέλλονται μέσω του πρωτοκόλλου LoRa σε μία πλατφόρμα cloud, σε πραγματικό χρόνο, όπου αποθηκεύονται και επεξεργάζονται με σκοπό την τελική τους παρουσίαση μέσω της διαδικτυακής διεπαφής χρήστη.

Ένα πρωτότυπο του συστήματος δοκιμάστηκε στα πλαίσια ενός πειράματος, όπου το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα πραγματοποίησε διαδρομή 200 μέτρων, παραμένοντας για 10 δευτερόλεπτα σε κάθε ένα εκ των τριών σημείων προς παρακολούθηση. Συνολικά, μέσα σε 118 δευτερόλεπτα το UAV απογειώθηκε, επισκέφθηκε τρία σημεία ενδιαφέροντος και προσγειώθηκε. Η συλλογή των δεδομένων μετρήσεων ήταν επιτυχής.



Σχήμα 5.53: Μονάδα υλικού (hardware module) του UAV [62]



Σχήμα 5.54: Σενάριο εφαρμογής του συστήματος [62]

### ***Καινοτόμο σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με χρήση drone και τεχνολογιών του ΔτΠ [135]***

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα περιοχών χαμηλής προσβασιμότητας, λόγω ύπαρξης επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα, με τη χρήση ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους (drone). Το τελευταίο έχει εξοπλιστεί με αισθητήρες αιωρούμενων σωματιδίων (Sensirion SPS30), μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, αμμωνίας, διοξειδίου του αζώτου και οργανικών πτητικών ενώσεων (Seed Studio και Seed αισθητήρας αερίων πολλαπλών καναλιών), καθώς και με έναν αισθητήρα περιβαλλοντικών συνθηκών, για τη μέτρηση θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης (Adafruit BME280), συνδεδεμένους σε μία πλακέτα Nucleo STM32L073RZ. Τόσο οι παραπάνω αισθητήρες όσο και άλλα υλικά μέρη της υλοποίησης του συστήματος έχουν επιλεγεί και τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο πάνω στο drone, ώστε να επηρεάζουν όσο το δυνατόν λιγότερο, την ποιότητα πτήσης και την ενεργειακή του αυτονομία. Κάθε πέντε δευτερόλεπτα η γεωγραφική θέση GPS του drone αποστέλλεται μέσω του πρωτοκόλλου LoRa σε μία πύλη LoRa (LoRa Gateway), ενώ παράλληλα το ίδιο εκτελεί τις μετρήσεις του. Συγκεκριμένα, αφού ολοκληρωθεί ο εξαερισμός του θαλάμου μέτρησης και ξεκινήσει η διαδικασία μέτρησης των οργανικών πτητικών ενώσεων από τον αντίστοιχο αισθητήρα, 32 μετρήσεις της κάθε μίας μετρήσιμης μονάδας συλλέγονται, με σκοπό τον υπολογισμό του μέσου όρου και της ακρίβειας των δεδομένων και, στη συνέχεια, προωθούνται μέσω του πρωτοκόλλου LoRa στην αντίστοιχη πύλη. Με χρήση του εργαλείου Node-RED τα δεδομένα αναλύονται (parsed) σε μορφή JSON και αποστέλλονται στον κεντρικό σταθμό μέσω MQTT. Εάν οι τιμές μέτρησης υπερβαίνουν τα επιτρεπτά ασφαλή όρια που έχουν οριστεί, αποστέλλεται ένα μήνυμα προειδοποίησης σε ένα chat-bot μίας εφαρμογής άμεσων μηνυμάτων, προς ειδοποίηση του χρήστη. Ο κεντρικός σταθμός λογισμικού (ρόλος cloud server) διαθέτει μία διαδικτυακή εφαρμογή, φιλική προς τον χρήστη, για την παρακολούθηση των μετρούμενων τιμών.

Στο συγκεκριμένο επιστημονικό άρθρο, ως αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζονται ορισμένα στιγμιότυπα της διαδικτυακής εφαρμογής της υλοποίησης, ωστόσο η ανάλυσή των εν λόγω εικόνων είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα να μην είναι ευδιάκριτες οι σχετικές τιμές μετρήσεων. Οι δοκιμαστικές πτήσεις πραγματοποιήθηκαν με το DJI F550 kit.

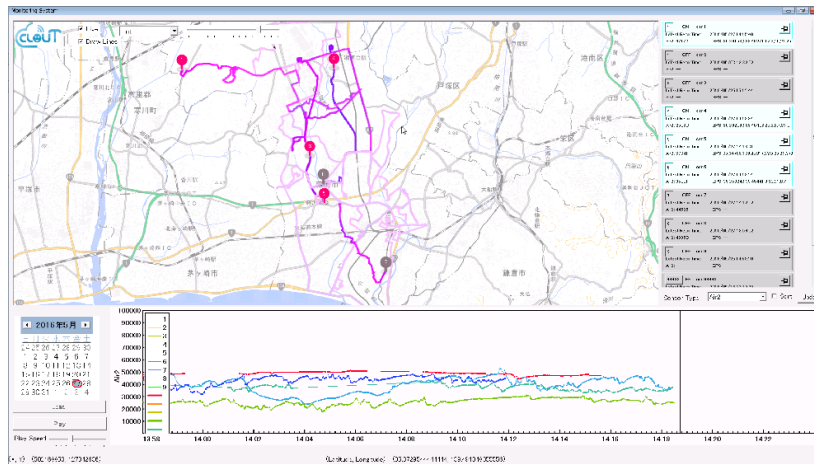


Σχήμα 5.55: Το drone με το φορτίο υλικού του κατά τις δοκιμαστικές πτήσεις [135]

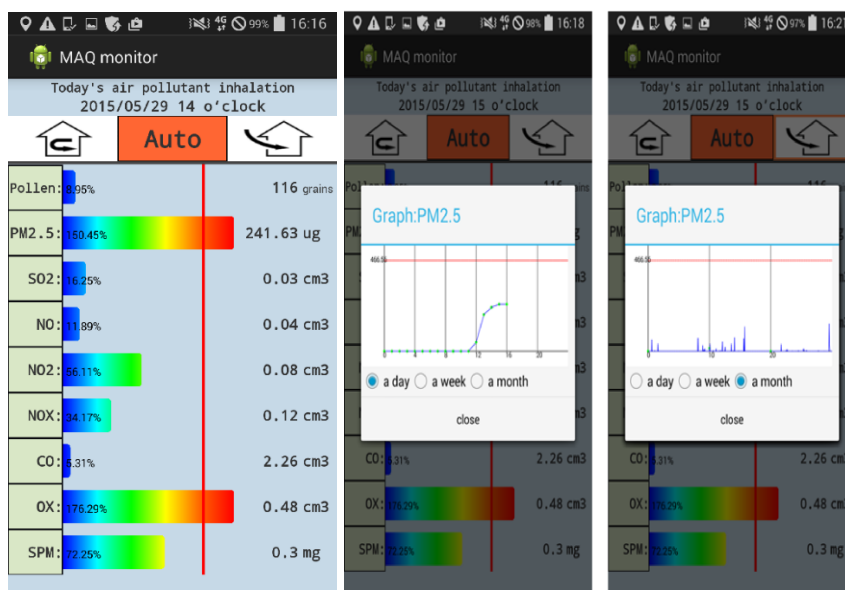
***Παρακολούθηση της ποιότητας του αστικού αέρα, κατ' απαίτηση (on-demand), χρησιμοποιώντας δημόσια οχήματα [136]***

Οι Shirai, Kishino, Naya και Yanagisawa, προτείνουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αστικού αέρα, χρησιμοποιώντας δημόσια οχήματα, ενώ οι σχετικοί μηχανισμοί ενσωματώθηκαν σε δημόσια οχήματα της πόλης Fujisawa (Ιαπωνία). Οι ερευνητές θεωρούν πως συγκριτικά με την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με χρήση σταθερών σταθμών αίσθησης, η παρακολούθηση με χρήση οχημάτων, δνητικά, μπορεί να συγκεντρώσει καλύτερα δεδομένα ποιότητας του αέρα, καλύπτοντας μεγαλύτερες γεωγραφικές εκτάσεις. Το εν λόγω σύστημα μπορεί να εφοδιαστεί με ένα εύρος αισθητήρων, όπως αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>), όζοντος (O<sub>3</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), σκόνης, αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>, γύρης, θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας και υπερϊόδους ακτινοβολίας, ενώ κάθε μέτρηση του εκάστοτε αισθητήρα συλλέγεται από μία πύλη (gateway), σε συνδυασμό με πληροφορίες γεωγραφικής θέσης που παράγονται χάρη σε δέκτες GPS, αποστέλλεται σε απομακρυσμένους διακομιστές μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Το σύστημα έχει εγκατασταθεί σε φορτηγά απορριμμάτων, ενώ το ίδιο εκκινεί τη λειτουργία του αυτόματα, καθώς και σταματά τη λειτουργία του βάσει του κινητήρα του φορτηγού, απελευθερώνοντας εντελώς τους οδηγούς από τυχόν συνειδητές ενέργειες που θα έπρεπε να εκτελέσουν, σχετικές με την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Σε κάθε κόμβο αίσθησης (sensor node) εγκαθίσταται μία εικονική μηχανή (virtual machine) που ονομάζεται CILIX (NTT R&D). Όλοι οι αισθητήρες, εκτός από αυτόν της γύρης, συνδέονται με κόμβους αίσθησης που είναι εγκατεστημένοι στο CILIX και οι ρυθμίσεις αίσθησης ελέγχονται από ένα πρόγραμμα στο CILIX. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών αίσθησης και η συντήρηση του συστήματος, γίνεται μέσω ενός εργαλείου λογισμικού, που αναπτύχθηκε από τους ερευνητές και ονομάζεται Κέντρο Ελέγχου (Control Center). Το τελευταίο αποτελείται από έναν χάρτη, γραφήματα και πληροφορίες κόμβων αίσθησης, που επιτρέπουν στους χρήστες να παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα τόσο βάσει πρόσφατων, όσο και βάσει ιστορικών δεδομένων, όποτε αυτοί το επιθυμούν. Τέλος, αναπτύχθηκε μία smartphone εφαρμογή για την οποία υιοθετήθηκε μία προσέγγιση βασισμένη στο cloud, προκειμένου να μπορεί να υπολογιστεί η εισπνεόμενη ποσότητα επικίνδυνων αερίων που αναπνέουν οι πολίτες, και παρουσιάζει τα παραγόμενα δεδομένα στους χρήστες. Πιο συγκεκριμένα, συνδυάζοντας τη τοποθεσία των χρηστών και τη σωματική μάζα που πληκτρολογεί ως είσοδο (input) ο κάθε χρήστης, η εφαρμογή είναι σε θέση να εκτιμήσει αν ο χρήστης βρίσκεται σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο, τον αναπνευστικό του όγκο (respiratory volume), ενώ παράλληλα, βάσει του τελευταίου, υπολογίζει την εισπνεόμενη ποσότητα επικίνδυνων αερίων που αναπνέουν οι χρήστες, προκειμένου να τους ενημερώσει εγκαίρως για επιβλαβείς συνθήκες που επικρατούν, ανά πάσα στιγμή.

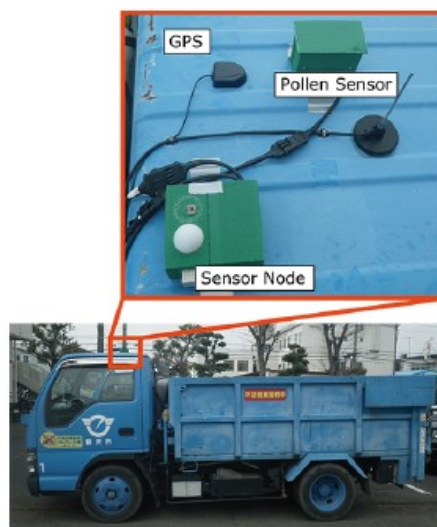
Η λειτουργικότητα και τα αποτελέσματα μετρήσεων της συγκεκριμένης υλοποίησης παρουσιάζονται μέσω των παρακάτω εικόνων-στιγμιότυπων.



Σχήμα 5.56: Κέντρο ελέγχου [136]



Σχήμα 5.57: Περιβάλλον υλοποιημένης εφαρμογής smartphone [136]



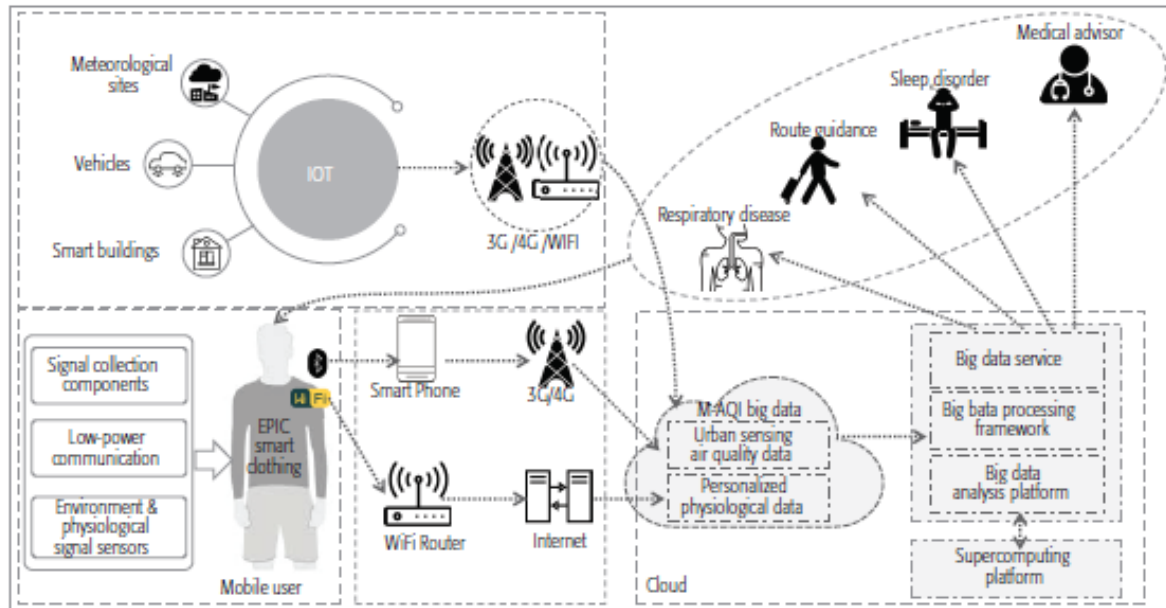
Σχήμα 5.58: Το σύστημα αισθητήρων εγκατεστημένο σε ένα φορτηγό απορριμμάτων [136]

### 5.3.1.3 Συνδυαστικά συστήματα

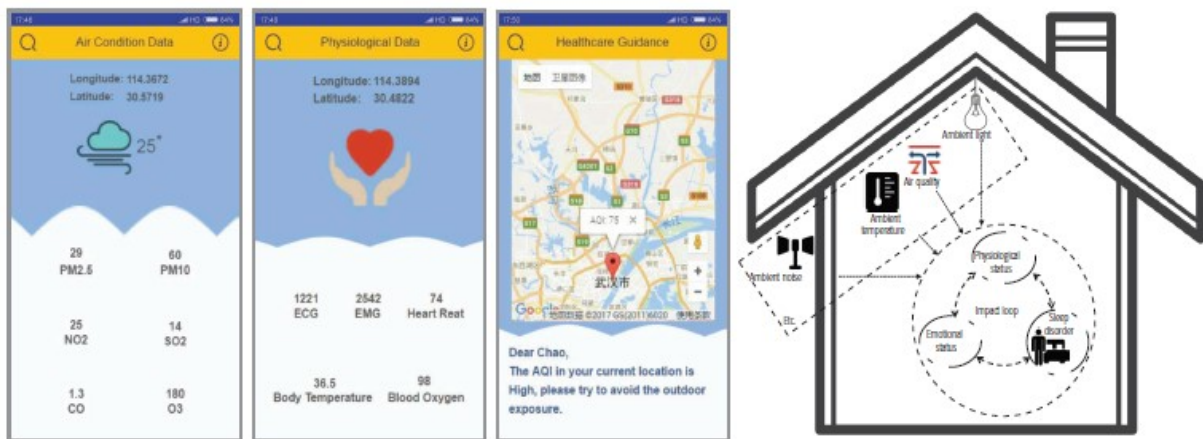
***Σύστημα Μεγάλων Δεδομένων (Big Data) αστικής υγείας βασισμένο σε στοιχεία ποιότητας του αέρα, προερχόμενα από το cloud και τον πληθοπορισμό (crowdsourcing) [137]***

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα Μεγάλων Δεδομένων (Big Data), γνωστό ως UH-BigDataSys. Αρχικά, προτείνουν μία πολυδιάστατη μέθοδο ένδειξης της ποιότητας του αέρα με την ενσωμάτωση Μεγάλων Δεδομένων, βασισμένη στην αίσθηση του δείκτη ποιότητας του αέρα AQI με τη χρήση δεδομένων πολιτών που συγκεντρώνονται μέσω τεχνικών πληθοπορισμού, δεδομένων παρακολούθησης IoT εγκαταστάσεων αίσθησης (sensing) και παρακολούθησης, όπως οχημάτων και «έξυπνων» κτηρίων, καθώς και με τη χρήση δεδομένων AQI που αποκτήθηκαν σε μετεωρολογικούς χώρους, ανεπτυγμένους από μία μετεωρολογική υπηρεσία, για την προετοιμασία δεδομένων «έξυπνων» αστικών υπηρεσιών βασισμένων στην τεχνητή νοημοσύνη. Για την συλλογή των δεδομένων AQI χρησιμοποιούνται συσκευές αίσθησης, που εγκαθίστανται ευρέως σε αστικά περιβάλλοντα, μετρώντας τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του αζώτου, όζοντος και διοξειδίου του θείου. Στη συνέχεια, βάσει ενός πίνακα συσχέτισης που δημιουργεί το σύστημα, χρησιμοποιώντας δεδομένα κινητικότητας (mobility data) πολιτών, όπως γεωγραφικές συντεταγμένες GPS, επιτάχυνση και ταχύτητα κίνησης, παράγεται ένα μοντέλο συμπεριφοράς τους, με τη χρήση του οποίου μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη επιλογή πολιτών που κρίνεται πως μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση του συστήματος. Για τη συλλογή Μεγάλων Δεδομένων ανθρώπινης φυσιολογίας (physiological), χρησιμοποιούνται έξυπνα ρούχα (smart clothing) με μία πληθώρα αισθητήρων, όπως ηλεκτροκαρδιογράφος (ECG), ηλεκτρομυογράφος (EMG), καθώς και αισθητήρες καρδιακού ρυθμού, κορεσμού οξυγόνου στο αίμα και θερμοκρασίας σώματος. Τα δεδομένα που παράγουν τα έξυπνα ρούχα επεξεργάζονται από τοπικές μονάδες επεξεργασίας που φέρουν τα ίδια και, στη συνέχεια, αποφασίζεται αν θα αποσταλούν σε κάποια τερματική συσκευή smartphone, προς περαιτέρω προώθησή τους στο cloud. Με βιώσιμη αίσθηση και ανάλυση δεδομένων φυσιολογίας των κατοίκων μίας πόλης, το UH-BigDataSys μπορεί να παρέχει καθοδήγηση βάσει της φυσιολογικής και ψυχικής κατάστασης του κάθε χρήστη.

Μία δοκιμαστική υλοποίηση (testbed) αναπτύχθηκε με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος, έχοντας ως υποδομή μία απλή cloud πλατφόρμα αποτελούμενη από έναν ελεγκτή, ένα δικτυωτή (networker) και δύο υπολογιστικούς κόμβους. Κάθε πιθανός πελάτης, έχει πρόσβαση μέσω RESTful APIs για τη λήψη όλων των υλοποιημένων υπηρεσιών. Κατόπιν σχετικής έρευνας, παρατηρήθηκε ότι η ψυχολογική και η φυσιολογική (physiological) κατάσταση ενός ατόμου, όπως και η ποιότητα του ύπνου του, ως μονάδες, επηρεάζουν η μία την άλλη.



Σχήμα 5.59: Αρχιτεκτονική του συστήματος UH-BigDataSys [137]



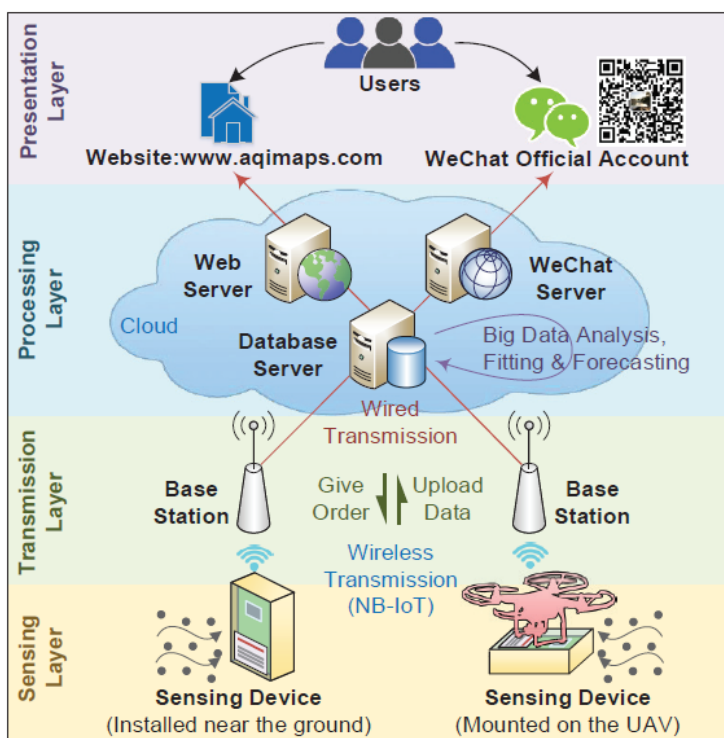
Σχήμα 5.60: Δεδομένα ποιότητας του αέρα, δεδομένα ανθρώπινης φυσιολογίας, υπηρεσία καθοδήγησης με γνώμονα την υγεία και παράγοντες διαταραχής του ύπνου [137]

**Συνδυαστικό σύστημα ΔτΠ μετρήσεων εδάφους και αέρα, με τη χρήση UAV, για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε μία «έξυπνη πόλη» [138]**

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα συνδυαστικό σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, υλοποιώντας τόσο επίγειους κόμβους αίσθησης όσο και έναν εναέριο κόμβο αίσθησης εγκαταστημένο σε ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV), παράγοντας δεδομένα της τρέχουσας ποιότητας του αέρα, σε πραγματικό χρόνο και παρέχοντας λεπτομερή δημιουργία προφίλ τριών διαστάσεων (3D fine-grained profiling). Κυρίως έμφαση δίνεται στη μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>, με έναν βαθμονομημένο αισθητήρα A3-IG, ενώ ένας μικροελεγκτής ATmega128A χρησιμοποιείται για να ελέγχει τη λογική εργασιών (task logic) του συστήματος. Μία μονάδα SIM7000C χρησιμοποιείται για την αποστολή των δεδομένων σε έναν διακομιστή cloud μέσω του πρωτοκόλλου NB-IoT. Η επίγεια παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα μπορεί να πραγματοποιείται αδιάκοπα, σε αντίθεση με την εναέρια, όπου λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος μπαταρίας και της απαιτούμενης ανθρώπινης απασχόλησης, κάτι τέτοιο δεν είναι

εφικτό. Ωστόσο, συνδυάζοντας αυτά τα δύο είδη συστημάτων αίσθησης, μπορεί να συλλεχθεί ένα καλύτερο σύνολο δεδομένων. Ο διακομιστής cloud, στο επίπεδο επεξεργασίας, είναι σε θέση να εκτελεί χωρική προσαρμογή (spatial fitting) με τη χρήση δεδομένων που συλλέχθηκαν από διάφορες τοποθεσίες, ώστε να παρέχει την καλύτερη δυνατή εκτίμηση της ποιότητας του αέρα τοποθεσιών που δεν έχουν παρακολουθηθεί, ακόμη. Επιπρόσθετα, παρέχει βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα και άλλες καιρικές συνθήκες, για την εξαγωγή της τρισδιάστατης κατανομής ποιότητας του αέρα στο άμεσο μέλλον. Τέλος, μέσω ενός επίσημου λογαριασμού στην πλατφόρμα WeChat ή μέσω της επίσημης ιστοσελίδας της υλοποίησης, οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στις, συνυφασμένες με την ποιότητα του αέρα, πληροφορίες μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να ελέγξουν την τρέχουσα κατανομή της ποιότητας του αέρα, να παρατηρήσουν τα ιστορικά δεδομένα ορισμένων τοποθεσιών και να ελέγξουν τις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις. Ακόμη, κόμβοι αίσθησης τοποθετούνται και σε εσωτερικούς χώρους των πανεπιστημίων Peking και Xidian, ωστόσο τα δεδομένα των εσωτερικών χώρων συνήθως δεν είναι προβλέψιμα, λόγω της πολυπλοκότητας και των ανεξέλεγκτων καταστάσεων που μπορεί να προκύψουν σε τέτοιους χώρους. Για τα αποτελέσματα αίσθησης των εξωτερικών κόμβων, παρέχεται ειδικός χάρτης ετικετών (label map) και χάρτης έγχρωμων κουκίδων (colored-dot map) για την απεικόνιση της ποιότητας του αέρα.

Το σύστημα δοκιμάστηκε στα Πανεπιστήμια Peking και Xidian (Κίνα) με 60 συσκευές αίσθησης εξωτερικού χώρου και περίπου 100 συσκευές αίσθησης εσωτερικού χώρου. Συνολικά, συλλέχθηκαν σχεδόν 100.000 αποτελεσματικά δείγματα, από τον Φεβρουάριο μέχρι τον Οκτώβριο του 2018.



Σχήμα 5.61: Αρχιτεκτονική του συστήματος [138]



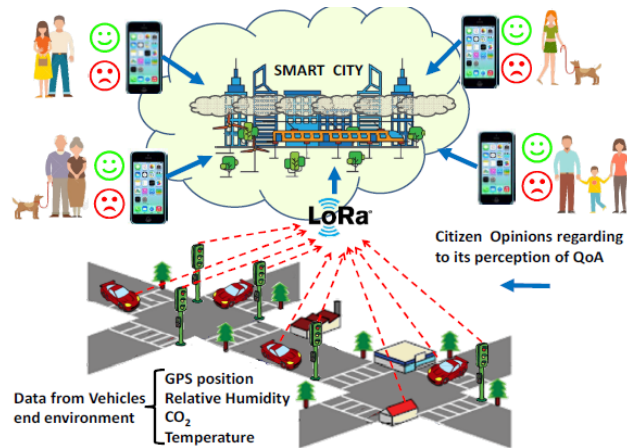
Σχήμα 5.62: Απεικόνιση της εφαρμογής: α) υλικό μέρος και ανάπτυξη, β) διεπαφές χρήστη [138]

### **Συνεργατικό δίκτυο αισθητήρων, βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa, για παρακολούθηση της ρύπανσης σε «έξυπνες πόλεις» [139]**

Οι Sendra, Garcia-Navas, Romero-Diaz και Lloret, προτείνουν ένα σύστημα βασισμένο σε γεωγραφικούς κόμβους, με σκοπό τη παρακολούθηση της ρύπανσης του αέρα, μετρώντας τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, χάρη στον αισθητήρα DHT11, και τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα σε αστικά περιβάλλοντα με τον αισθητήρα MQ-135. Ένας κόμβος TTGO T-Beam, που ενσωματώνει τις τεχνολογίες GPS και Lora, χρησιμοποιείται επίσης στην υλοποίηση του συστήματος, ενώ χρησιμοποιεί το τσιπ ESP32. Δύο είδη κόμβων αίσθησης εγκαθίστανται στην πόλη, τόσο κινητοί (εγκατεστημένοι σε οχήματα) όσο και σταθεροί (τοποθετημένοι σε φωτεινούς σηματοδότες και πάνελ), ικανοί να συλλέγουν περιβαλλοντικά δεδομένα συνεχώς, τα οποία μεταδίδονται μέσω του πρωτοκόλλου LoRa. Έτσι, μπορεί να παρακολουθείται η εξέλιξη των μετρούμενων παραμέτρων στα καθορισμένα σημεία αίσθησης και να δημιουργηθούν, χάρη σε αυτά, χάρτες εξέλιξης των συγκεκριμένων παραμέτρων, σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, το δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χαρακτηριστεί ως συνεργατικό, καθώς η υποκειμενική γνώμη των πολιτών συνυπολογίζεται μέσω της ανάδρασης (feedback) τους με τη χρήση μίας mobile εφαρμογής. Με το συνδυασμό όλων των παραπάνω πληροφοριών, το σύστημα μπορεί να παράγει έξυπνες αποφάσεις αυτόνομα, οι οποίες θα αποστέλλονται σε φωτεινά πάνελ και σήματα κυκλοφορίας, προκειμένου να ελέγχεται η κυκλοφορία και να εφαρμόζονται περιορισμοί, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Ακόμη, το σύστημα μπορεί να παράγει προειδοποιητικά μηνύματα σε χρήστες της mobile εφαρμογής, παροτρύνοντάς τους να ακολουθήσουν εναλλακτικές διαδρομές.

Χρησιμοποιώντας έναν κόμβο αίσθησης, σχεδιασμένο με τον τρόπο που συζητήθηκε παραπάνω, οι ερευνητές προχώρησαν σε πειράματα δύο κατηγοριών. Αρχικά, πραγματοποίησαν ορισμένες μετρήσεις του δικτύου του συστήματος, προκειμένου να αξιολογήσουν την ποιότητά του. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η απόσταση από τον κόμβο αίσθησης ως την πύλη που θεωρείται σημείο αναφοράς, αποδεικνύοντας ότι είναι δυνατή η συλλογή δεδομένων σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από την πύλη. Η μέση τιμή του SNR (Signal-to-Noise Ratio) ισούται περίπου με 3,42 dB, υποδηλώνοντας ότι το επίπεδο σήματος είναι υψηλότερο από το λαμβανόμενο θόρυβο. Έτσι, μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι η ανθεκτική διαμόρφωση του πρωτοκόλλου LoRa, επιτρέπει στην πύλη να λαμβάνει τα πακέτα ορθά σε

αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός χιλιομέτρου. Σημειώνεται ότι η παρουσία κτηρίων μειώνει σημαντικά το SNR και το επίπεδο του RSSI (Received Signal Strength Indicator) σε σύγκριση με το μοντέλο ελεύθερης διάδοσης. Τέλος, σε δεύτερο επίπεδο, μελετήθηκαν οι μετρήσεις του κόμβου αίσθησης. Παρατηρήθηκε ότι όσο υψηλότερη ήταν η θερμοκρασία μίας περιοχής, αντίστοιχα μειωμένη ήταν η υγρασία της, ενώ η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ήταν υψηλότερη σε έναν κεντρικό δρόμο προς το Πανεπιστήμιο της Γρανάδας (Ισπανία) κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου επικρατούσε μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση, ενώ η ύπαρξη κτηρίων εκατέρωθεν του δρόμου, μπορεί να αποτέλεσε εμπόδιο εξάπλωσης του διοξειδίου του άνθρακα.



Σχήμα 5.63: Συνεργατικό δίκτυο αισθητήρων βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa για παρακολούθηση της ρύπανσης σε «έξυπνες πόλεις» [139]



Σχήμα 5.64: Πρωτότυπο κόμβου LoRa κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων [139]

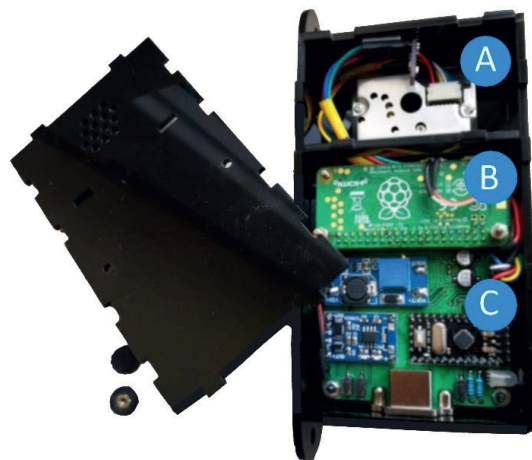


Σχήμα 5.65: Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, κατά το δοκιμαστικό πείραμα, μετρούμενη σε μέρη στο εκατομμύριο (parts per million - ppm) [139]

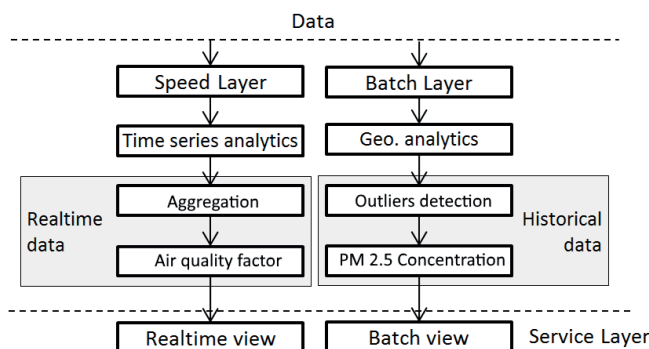
***Παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος με χρήση συστήματος ΔτΠ, που συνδυάζει δύο μεθόδους ανάλυσης δεδομένων για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων [87]***

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα ΔτΠ, που συνδυάζει δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης δεδομένων, προκειμένου να αυξήσει την ποιότητα των συμπερασμάτων του. Αισθητήρες χαμηλού κόστους χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση του συστήματος, μετρώντας περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως υγρασία και θερμοκρασία, ενώ ένας οπτικός αισθητήρας σκόνης GP2Y10, είναι υπεύθυνος για τη μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Ένα Raspberry Pi Zero αναλαμβάνει το κομμάτι ελέγχου και επικοινωνίας του κόμβου αίσθησης. Κατά σειρά, ο κόμβος αίσθησης προωθεί τα παραγόμενα δεδομένα του μέσω Wi-Fi και το πρωτόκολλο MQTT λειτουργεί ως πρωτόκολλο επικοινωνίας. Τα δεδομένα που λαμβάνονται αποστέλλονται μέσω του διαύλου δεδομένων (στην περίπτωσή μας χρησιμοποιείται ο Apache Kafka) στη βάση δεδομένων. Οι τρεις πιθανοί τρόποι μετάδοσης των συλλεγόμενων δεδομένων του συστήματος είναι μέσω της χρήσης Rest API, πρωτοκόλλων υποδοχής δικτύου (Web Socket) και MQTT. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων απαρτίζουν μία αποθήκη ιστορικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για batch analysis (ανάλυση παρτίδας-ομάδας). Το σύστημα συνδυάζει την παραπάνω μέθοδο ανάλυσης με αυτήν της stream analysis (ανάλυσης ροής), που αποτελείται από εισερχόμενα δεδομένα που λαμβάνονται από κόμβους αίσθησης σε πραγματικό χρόνο, διαμορφώνοντας μία Lambda αρχιτεκτονική. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, επιτρέπει τη χρήση μοντέλων που έχουν δημιουργηθεί από ιστορικά δεδομένα για την επεξήγηση φαινομένων που συμβαίνουν σε πραγματικό χρόνο, αυξάνοντας έτσι, στην περίπτωσή μας, την ποιότητα των ληφθέντων δεδομένων, διατηρώντας ταυτόχρονα αισθητήρες χαμηλού κόστους. Από τεχνικής άποψης, η πλατφόρμα είναι επεκτάσιμη και βασίζεται σε μικρο-υπηρεσίες (microservices) που εφαρμόζονται σε πλατφόρμες Docker ή Kubernetes, με κύριο σκοπό την εύκολη μετάβαση σε κάποια επιθυμητή πλατφόρμα cloud.

Κατά τη σχετική έρευνα του συστήματος, η μέθοδος LoOP εφαρμόστηκε για να φιλτράρει τα ιστορικά δεδομένα αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Οι υψηλότερες τιμές των ακραίων τιμών των μετρήσεων, καταγράφηκαν από την αρχή του έτους έως περίπου την εκατοστή ημέρα του και από, περίπου, την ημέρα 250 έως το τέλος του έτους, περίοδοι που αντιστοιχούν στις περιόδους ανόδου της θερμοκρασίας της Πολωνίας (χώρας διεξαγωγής της έρευνας).



Σχήμα 5.66: Εσωτερική δομή κόμβου αίσθησης [87]



Σχήμα 5.67: Ανάλυση δεδομένων με χρήση των μεθόδων batch και stream analysis [87]

## 5.3.2 Μη πραγματικού χρόνου

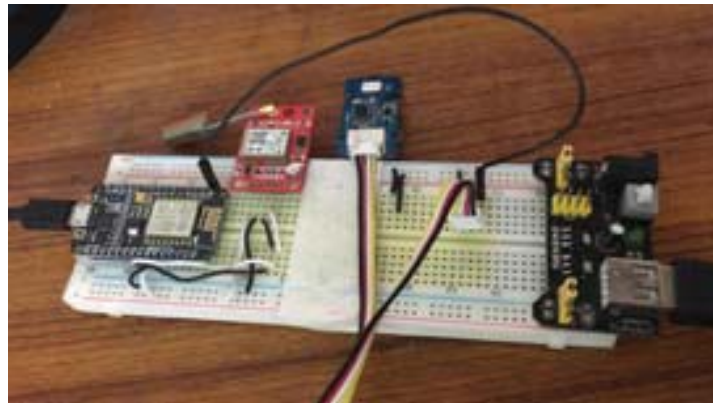
### 5.3.2.1 Στατικά εγκατεστημένα συστήματα

**Σύστημα ΔτΠ παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με χρήση του πρωτοκόλλου Wi-Fi, χαμηλού κόστους και ανοιχτής πρόσβασης [140]**

Οι Aamer, Mumtaz, Anwar και Poslad, παρουσιάζουν ένα απλό και οικονομικό σύστημα βασισμένο στο ΔτΠ, για την παρακολούθηση και την ανάλυση της ποιότητας του αέρα, όπως και για την εκπαίδευση των καταναλωτών αναφορικά με το ζήτημα της μόλυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Το σύστημα είναι μικρό και φορητό, επιτρέποντας την εγκατάστασή του σε οποιοδήποτε σημείο απαιτεί ο χρήστης, φέροντας πολλαπλούς αισθητήρες ανίχνευσης, μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>), θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και έναν αισθητήρα GPS που είναι σε θέση να εντοπίζει τη γεωγραφική θέση στην οποία έχει εγκατασταθεί η μονάδα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Τα παραγόμενα δεδομένα λαμβάνονται από έναν μικροελεγκτή NodeMCU που ενσωματώνει ένα τσιπ ESP8266, προσφέροντας δυνατότητα συνδεσιμότητας μέσω του πρωτοκόλλου Wi-Fi, προωθώντας με τη σειρά του τα δεδομένα στο διαδίκτυο ανά μία ώρα. Στην πλευρά του διακομιστή, τα δεδομένα αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται προς τον υπολογισμό του δείκτη ποιότητας του αέρα AQI, βάσει μίας έγκυρης μαθηματικής φόρμουλας. Τέλος, η απεικόνιση των χρήσιμων τελικών δεδομένων, ολοκληρώνεται με την παρουσίασή τους στον τελικό χρήστη, μέσω μίας Android εφαρμογής. Προκειμένου τα δεδομένα να είναι ερμηνεύσιμα από τον χρήστη, τα δεδομένα AQI χαρτογραφούνται σε ένα χάρτη κάνοντας χρήση των τιμών γεωγραφικού πλάτους και μήκους που έχουν ληφθεί από το GPS. Κάθε κουκίδα, βάσει τοποθεσίας μέτρησης, χρωματίζεται με το ανάλογο χρώμα πάνω στον χάρτη, με τα πιο σκοτεινά χρώματα να σηματοδοτούν πιο επιβλαβή ατμόσφαιρα. Όταν ο χρήστης επιλέξει κάποια από αυτές τις κουκίδες, του παρουσιάζονται εκτενώς περισσότερες πληροφορίες για τον AQI, τόσο εγκυκλοπαιδικές όσο και μετρικές. Επιπλέον, παρέχονται καθημερινές μετρήσεις AQI υπό τη μορφή ιστογράμματος και μία ψευδο-βάση δεδομένων για τους χρήστες που επιθυμούν να έχουν πρόσβαση σε ακατέργαστα (raw) και μη επεξεργασμένα δεδομένα, για ερευνητικούς σκοπούς.

Οι ερευνητές κατάφεραν να συλλέξουν ένα σύνολο δεδομένων (dataset) περίπου 25.000 δειγμάτων, κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου του συστήματος, για ένα οδικό τμήμα του Rawalpindi που οδηγεί στο Islamabad (Πακιστάν). Κατόπιν ανάλυσης, προκύπτει ότι η υγρασία και η θερμοκρασία συσχετίζονται αρνητικά με το NO<sub>2</sub> και επηρεάζουν τη συγκέντρωσή του στον αέρα. Καθώς το NO<sub>2</sub> αποτελεί ένα υδατοδιαλυτό αέριο, η συγκέντρωσή του μειώνεται κατά την ύπαρξη υψηλής υγρασίας ή

βροχής, όπως και κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της απορρόφησής του από τα φύλλα φυτών. Η λειτουργικότητα του συστήματος επαληθεύεται επιτυχώς.

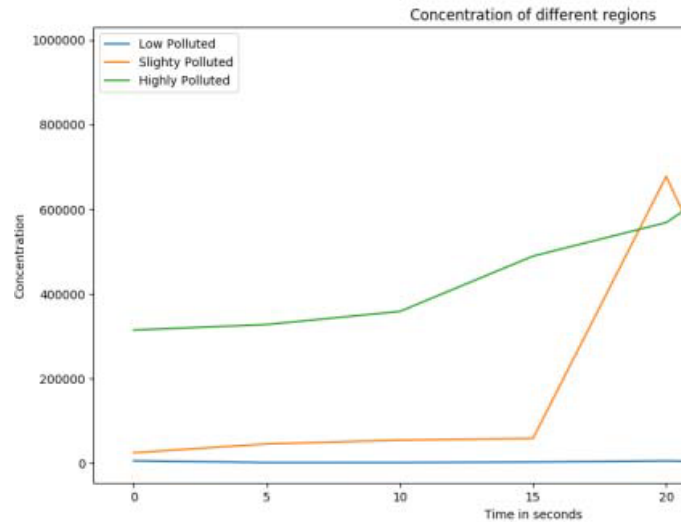


Σχήμα 5.68: Πρωτότυπο συστήματος [140]

***Χαμηλού κόστους παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με χρήση των πρωτοκόλλων Wi-Fi και MQTT, βασισμένη στο ΔτΠ [141]***

Οι Jermin Jeunitea, Sarasvathi και Saritha, σχεδίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, κάνοντας χρήση ενός αισθητήρα σκόνης (DSM501A), ικανού να παρακολουθεί τη συγκέντρωση σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια, τη γύρη, την οικιακή σκόνη ή τον καπνό τσιγάρου, και στη συνέχεια να ταξινομεί την εκάστοτε γεωγραφική περιοχή παρακολούθησης, βάσει της συγκέντρωσης σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρά της, σε πολύ μολυσμένη, ελαφρώς μολυσμένη ή καθόλου μολυσμένη. Ο αισθητήρας σκόνης συνδέεται σε ένα μικροτσίπ ESP8266, το οποίο, με τη σειρά του, δημοσιεύει τα δεδομένα των μετρήσεων στον MQTT broker μέσω Wi-Fi, τα οποία την ίδια στιγμή αποστέλλονται προς αποθήκευση στον διακομιστή cloud, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση και υπολογισμούς. Μία ή περισσότερες smartphone συσκευές Android δρουν ως συνδρομητές (subscribers) MQTT στο συγκεκριμένο θέμα (topic) επιπέδου συγκέντρωσης σκόνης, με αποτέλεσμα το πρωτόκολλο MQTT να δημοσιεύει (publish) τα δεδομένα ενδιαφέροντος στην εκάστοτε συσκευή smartphone. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στο χρήστη πάνω σε ένα χάρτη, με τις αντίστοιχες τοποθεσίες ενδιαφέροντος χρωματισμένες βάσει της ταξινόμησης που σημειώθηκε παραπάνω.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας, παρουσιάζονται ορισμένες εικόνες του υλικού μέρους του υλοποιημένου συστήματος, ένα γράφημα της συγκέντρωσης σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα τριών διαφορετικών περιοχών σε συνάρτηση με το χρόνο, καθώς και ένα στιγμιότυπο οθόνης της Android εφαρμογής.

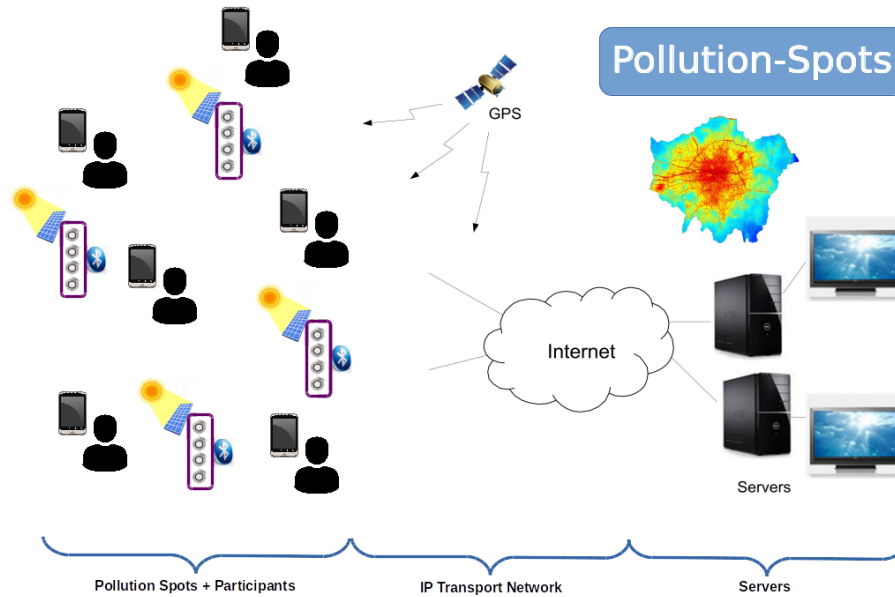


Σχήμα 5.69: Γράφημα της συγκέντρωσης σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα τριών διαφορετικών περιοχών, σε συνάρτηση με το χρόνο. Βάσει των παραπάνω, χωρίζονται σε περιοχές καθόλου ή ελάχιστα μολυσμένες (μπλε), ελαφρώς μολυσμένες (πορτοκαλί) και πολύ μολυσμένες (πράσινο) [141]

***Pollution-Spots: Ασύρματες τεχνολογίες παρακολούθησης της ρύπανσης σε μεγάλες πόλεις και αγροτικές περιοχές [142]***

Οι Mendez, Diaz και Kraemer, παρουσιάζουν το «Pollution-Spots», ένα υβριδικό σύστημα παρακολούθησης της ρύπανσης του αέρα μεγάλων πόλεων, που συνδυάζει μία βασική δομή κόμβων αίσθησης (sensing nodes – γνωστά ως Spots στη συγκεκριμένη υλοποίηση), χαμηλού κόστους, και τη συμμετοχή πρόθυμων χρηστών που επιθυμούν να μοιραστούν την προσωπική τους σύνδεση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, προκειμένου να αποστείλουν τα παραγόμενα δεδομένα μετρήσεων, των διάφορων αέριων ρύπων, σε έναν κεντρικό διακομιστή. Το κάθε Spot, περιοδικά, αποκτά και αποθηκεύει τοπικά δεδομένα ρύπανσης, χρησιμοποιώντας αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν το μονοξείδιο του άνθρακα (Membrapor CO/SF-200), το όζον (Membrapor O3/S-5), τα αιωρούμενα σωματίδια (Sharp GP2Y1010AU0), τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία (Sensirion SHT15). Ακόμη, κάθε Spot φέρει ένα ηλιακό πάνελ και έναν ελεγκτή μπαταρίας, έτσι ώστε να καθίσταται ενεργειακά αυτόνομο. Με σκοπό τη μείωση του προϋπολογισμού που απαιτείται για τη συντήρηση ολόκληρου του συστήματος, δεν έχει ενσωματωθεί κάποια μονάδα επικοινωνίας. Αντιθέτως, κάθε άτομο που επιθυμεί να συνεισφέρει στη λειτουργία του συστήματος, πρέπει να έρθει κοντά σε ένα Spot και να κατεβάσει τα διαθέσιμα δεδομένα στη smartphone συσκευή του, μέσω Bluetooth. Στη συνέχεια, θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τη προσωπική του σύνδεση στο διαδίκτυο, για παράδειγμα Wi-Fi ή 4G, για να μεταδώσει τα εν λόγω δεδομένα σε έναν κεντρικό διακομιστή. Τέλος, αν και τα Spots είναι στατικά εγκατεστημένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κινητοί κόμβοι αίσθησης, αν αυτό κριθεί απαραίτητο, με την εγκατάστασή τους σε κάποιο όχημα.

Στο σχετικό επιστημονικό άρθρο, δεν παρουσιάζεται κάποιο αποτέλεσμα έρευνας του συστήματος, ωστόσο σημειώνεται πως οι υπάρχουσες διαθέσιμες τεχνικές WSNs, δεν αρκούν για την υλοποίηση ενός μακροπρόθεσμα βιώσιμου συστήματος, που να είναι σε θέση να ανιχνεύει τόσο σύγχρονα όσο και ασύγχρονα συμβάντα. Για το συγκεκριμένο λόγο, οι ερευνητές επικεντρώνονται στην εξέλιξη και εφαρμογή των παραπάνω τεχνικών σε πραγματικούς κόμβους, και όχι σε προσομοιώσεις, και στην ενσωμάτωση ενός τέτοιου πολυτροπικού (multi-modal) WSN. Οι ίδιοι ασχολούνται ήδη, σε πειραματικό στάδιο, με το κομμάτι της έρευνας πολυτροπικών WSNs για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού σε γεωργικές εφαρμογές.



Σχήμα 5.70: Γενική αρχιτεκτονική του συστήματος Pollution-Spots [142]



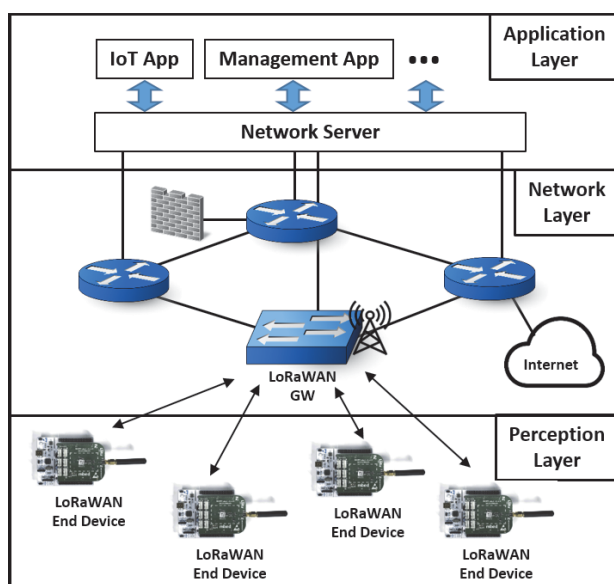
Σχήμα 5.71: Εμπρός και πίσω όψη του κάθε Spot [142]

**Υψηλής ακρίβειας και χαμηλού κόστους σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με χρήση του LoRaWAN [143]**

Οι Park, Oh, Byun και Kim, σχεδίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, χαμηλού κόστους και υψηλής ακρίβειας, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο LoRaWAN. Κόμβοι αίσθησης (sensing nodes), πυκνά εγκατεστημένοι, είναι σε θέση να εντοπίσουν περιεκτικά την κατάσταση της ποιότητας του αέρα, συμπεριλαμβανομένων όχι μόνο της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (Plantower PMS5003T), αλλά και της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Ακόμη, διεξήχθη ένα πιλοτικό πείραμα με προσομοιώσεις υπολογιστών, για να ελεγχθεί η σκοπιμότητα χρήσης του LoRaWAN, ως ασύρματο πρωτόκολλο συστημάτων μέτρησης και, τελικά, επαληθεύτηκε η απόδοση

και η εγκυρότητα χρήσης του, σε συστήματα παρακολούθησης πραγματικού χρόνου. Οι πύλες (gateways) συλλέγουν τις μετρήσεις των αισθητήρων μέσω επικοινωνιών LoRaWAN και στη συνέχεια τις δρομολογούν και τις προωθούν στον διακομιστή δικτύου μέσω του διαδικτύου, όπου αποθηκεύονται και επεξεργάζονται, με σκοπό την παροχή κατάλληλων υπηρεσιών για κάθε εφαρμογή που υφίσταται. Συγκεκριμένα, έχει υλοποιηθεί μία εφαρμογή μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>, θερμοκρασίας και υγρασίας, μία εφαρμογή διαχείρισης συστήματος ΔτΠ, καθώς και μία διαδικτυακή εφαρμογή για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων μέτρησης. Ο διακομιστής δικτύου αναλύει τα δεδομένα και ενημερώνει τις τιμές PM<sub>2.5</sub> κάθε σημείου εγκατάστασης κόμβου αίσθησης, στον χάρτη της πανεπιστημιούπολης (Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σεούλ, Κορέα) κάθε 15 λεπτά.

Δέκα τερματικές συσκευές μονάδων αίσθησης τοποθετήθηκαν γύρω από βασικές εγκαταστάσεις, όπως γύρω από τους κοιτώνες και την καφετέρια της πανεπιστημιούπολης του Εθνικού Πανεπιστημίου της Σεούλ, σε ανοιχτούς χώρους, για τη λήψη ρεαλιστικών τιμών PM<sub>2.5</sub> με σκοπό την πρακτική αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος. Το τεστ αναλογίας παράδοσης πακέτων πληροφορίας έδειξε πως η σταθερότητα του πρωτοκόλλου LoRaWAN κυρίως εξαρτάται από τα σημεία εγκατάστασης των κόμβων αίσθησης. Τέλος, συγκρίθηκαν οι μετρήσεις συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων από τρία διαφορετικά σημεία εγκατάστασης κόμβων αίσθησης με τα σχετικά δεδομένα μετρήσεων αναφοράς, που προσφέρει η Μετεωρολογική Διοίκηση της Κορέας, και προέκυψε ότι τα ίχνη (traces) αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να ποικίλουν ακόμη και σε κοντινά σημεία εγκατάστασης κόμβων αίσθησης. Για τον παραπάνω λόγο, τονίστηκε η αναγκαιότητα λεπτομερούς παρακολούθησης του φαινομένου.



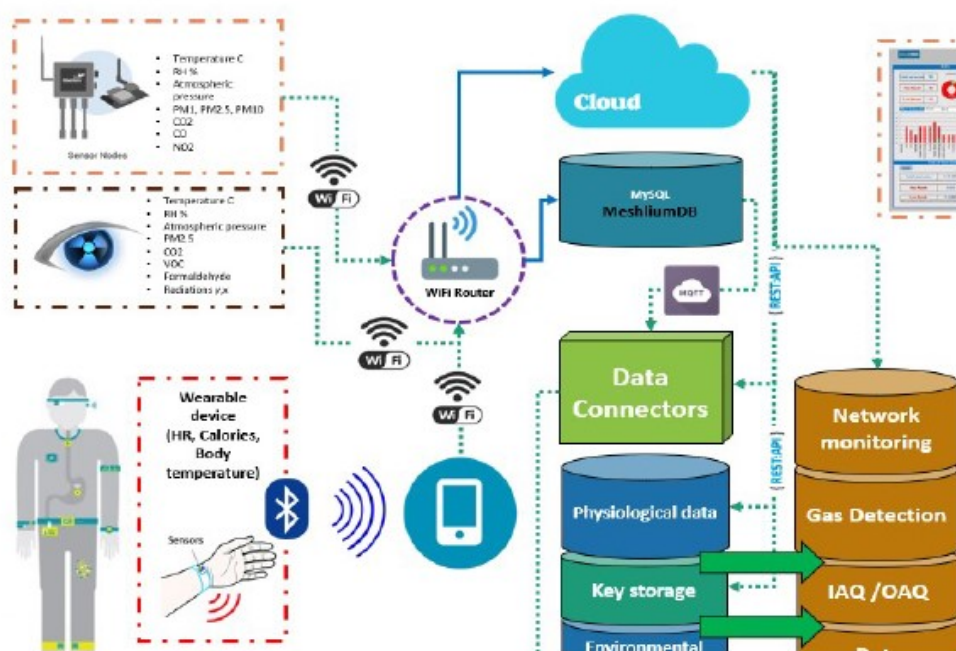
Σχήμα 5.72: Η αρχιτεκτονική του συστήματος [143]

### Σύστημα ΔτΠ για την αξιολόγηση ατμοσφαιρικών ρύπων σε υπόγειες υποδομές [144]

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου, παρουσιάζουν ένα σύστημα ΔτΠ για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε επικίνδυνα περιβάλλοντα εργασίας, ενώ, πιο συγκεκριμένα, η μελέτη περίπτωσης (case study) του επιστημονικού άρθρου, αφορά τα συστήματα υπόγειων μεταφορών (μετρό). Βασικοί ρύποι που συναντώνται σε υπόγειες περιοχές, αποτελούν οι αέριοι ρύποι, όπως το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, οι οργανικές πτητικές ενώσεις και το διοξείδιο του αζώτου, καθώς και οι διάφοροι τύποι, βάσει διαμέτρου, αιωρούμενων σωματιδίων. Οι συγκεντρώσεις τους ποικίλουν ανάλογα με το βαθμό εξαερισμού των εσωτερικών χώρων, καθώς και των επιπέδων

θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούν. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση του εξοπλισμού παρακολούθησης στη βέλτιστη τοποθεσία, διεξήχθη ανάλυση κινδύνου των κατηγοριών των ατόμων που εργάζονται στους εν λόγω υπόγειους χώρους και των ατόμων που μετακινούνται στην πόλη του Βουκουρεστίου, χρησιμοποιώντας το μετρό ως μέσο μεταφοράς. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε μία αρχιτεκτονική για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, ξεκινώντας στο χαμηλότερο επίπεδο της, με αισθητήρες και ενεργοποιητές (actuators), υπεύθυνους για τη μέτρηση και τη συλλογή δεδομένων του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα router LANCOM 1780EW 4G+, ένας σταθμός παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα uRADMonitor Industrial, δύο σταθμοί παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα Libelium Plug και Sense SCP, μία πλακέτα απόκτησης δεδομένων Libelium Gas Board με αισθητήρες παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και ένα έξυπνο βραχιόλι Fitbit Charge. Έπειτα, μέσω μίας ασύρματης σύνδεσης, τα παραγόμενα δεδομένα προωθούνται σε μία βασική πύλη (gateway), η οποία επιβλέπει το συντονισμό όλων των αισθητήρων και με τη σειρά της θα αποστέλλει τα δεδομένα στο επόμενο επίπεδο, απόκτησης δεδομένων (Data Acquisition level). Το επίπεδο επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων (Data processing/data analytics level) θα αναλάβει την προ-επεξεργασία και την επεξεργασία των δεδομένων, παρακολουθώντας το δίκτυο. Ενώ, τέλος, το τελικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για την παρουσίαση των δεδομένων στους τελικούς χρήστες, μέσω μίας διεπαφής (interface), με άμεση δυνατότητα πυροδότησης συναγερμών σε περίπτωση ανάγκης ή εξαγωγής συμπερασμάτων άλλων συμβάντων, βάσει των μετρήσεων που λαμβάνονται.

Το μοτίβο των τιμών ωριαίας συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  δύο σημείων μέτρησης, που εγκαταστάθηκαν σε δύο αίθουσες εργασίας του Κέντρου Επικοινωνίας (Communication Centre) κοντά σε υπαίθρια σημεία εισόδου αέρα, παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα, ενώ υπάρχει ισχυρή ένδειξη ότι κύρια πηγή εκπομπών αυτών των ρύπων αποτελεί η αστική οδική κυκλοφορία. Τέλος, το μοντέλο πρόβλεψης των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  ανά ώρα, που εφαρμόστηκε στην κεντρική αίθουσα της μελέτης περίπτωσης, αποδείχθηκε αποδοτικό, καθώς φαίνεται πως οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν προβλέπουν με καλή ακρίβεια τις πραγματικές συγκεντρώσεις.



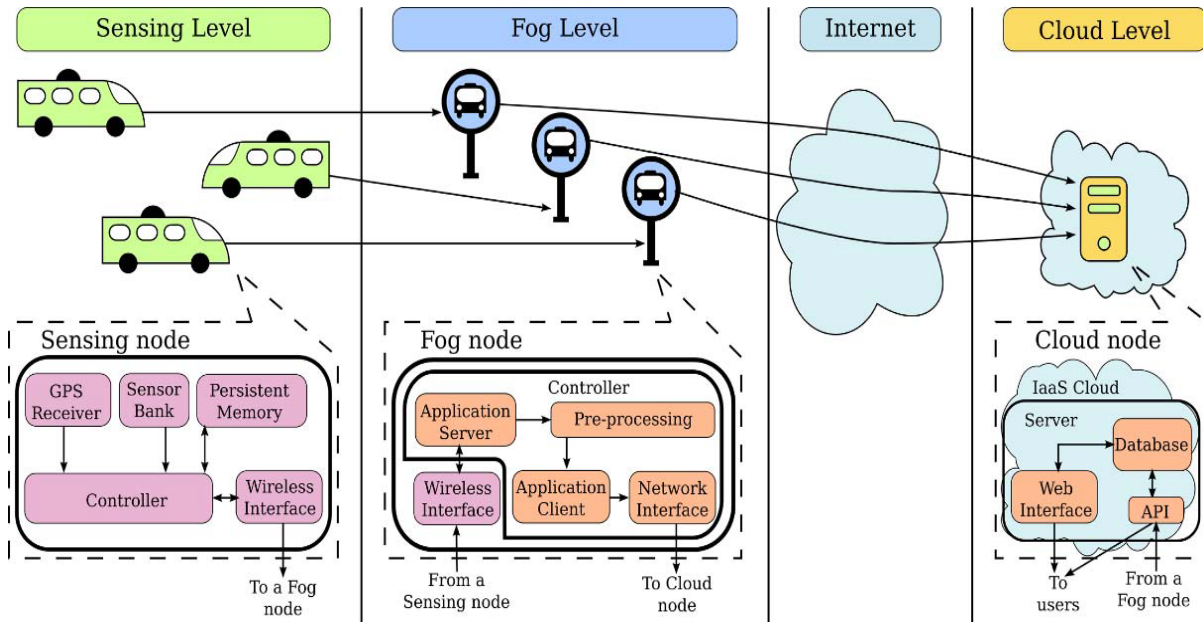
Σχήμα 5.73: Η αρχιτεκτονική του συστήματος [144]

### 5.3.2.2 Συστήματα εγκατεστημένα σε οχήματα

#### *SensingBus: Χρησιμοποιώντας γραμμές λεωφορείων και fog computing για την έξυπνη αίσθηση μίας πόλης [145]*

Στο συγκεκριμένο επιστημονικό άρθρο, οι ερευνητές παρουσιάζουν το SensingBus, ένα σύστημα συλλογής δεδομένων γενικού σκοπού με χαμηλό κόστος, χρησιμοποιώντας αισθητήρες, εγκατεστημένους σε αστικά λεωφορεία μίας πόλης. Η αρχιτεκτονική του συστήματος χωρίζεται σε τρία επίπεδα, αίσθησης (sensing), fog και cloud. Το επίπεδο αίσθησης αποτελείται από κόμβους αισθητήρων που βρίσκονται εγκατεστημένοι στα λεωφορεία και συλλέγουν δεδομένα κατά τη διαδρομή τους, με αποτέλεσμα να καλύπτουν με τις μετρήσεις τους μεγάλο κομμάτι της πόλης. Μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου, ένας κόμβος αίσθησης, συνδέεται με έναν κόμβο fog ο οποίος λειτουργεί ως ενδιάμεσος, και συνήθως είναι εγκατεστημένος σε κάποια στρατηγική θέση της πόλης, όπως σε μία στάση λεωφορείου, προκειμένου να του αποστείλει δεδομένα μετρήσεων και άλλες πληροφορίες, όπως γεωγραφικές συντεταγμένες και χρονική στιγμή της κάθε μέτρησης. Το επίπεδο ομίχλης, με τη σειρά του, είναι υπεύθυνο για την προ-επεξεργασία των δεδομένων, βελτιώνοντας τους τομείς απόδοσης και ασφάλειας χρησιμοποιώντας λειτουργίες συμπίεσης και κρυπτογράφησης, καθώς και για την αποστολή των παραπάνω στο τρίτο επίπεδο, νέφους, μέσω του διαδικτύου. Τέλος, το επίπεδο νέφους εκτελείται σε μία υπηρεσία νέφους, όπου λαμβάνει, αποθηκεύει και επεξεργάζεται τα δεδομένα. Το συγκεκριμένο επίπεδο δίνει επίσης στους χρήστες πρόσβαση στα δεδομένα.

Ένα πρωτότυπο του συστήματος κατασκευάστηκε, προκειμένου να αποδειχθεί η σκοπιμότητα του συστήματος SensingBus, μέσω των αποτελεσμάτων ακρίβειας και απόδοσής του. Μέσω ορισμένων πειραμάτων, αναλύθηκε η επεκτασιμότητα του συστήματος και αποδείχθηκε ότι οι κόμβοι ομίχλης έχουν την ικανότητα να εξυπηρετούν τουλάχιστον 20 κόμβους αίσθησης, ταυτοχρόνως, που αποτελούν το μέγιστο αριθμό που απαιτείται, προκειμένου να καλυφθεί το 88% των στάσεων λεωφορείων του Ρίο Ντε Τζανέιρο.

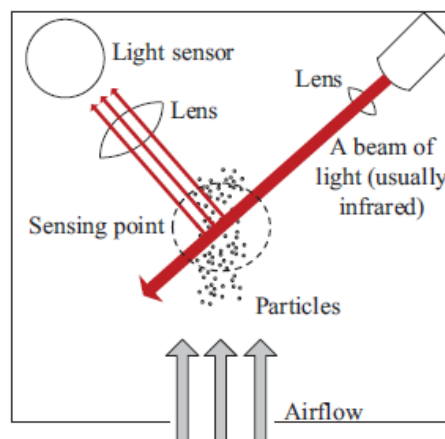


Σχήμα 5.74: Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων του SensingBus [145]

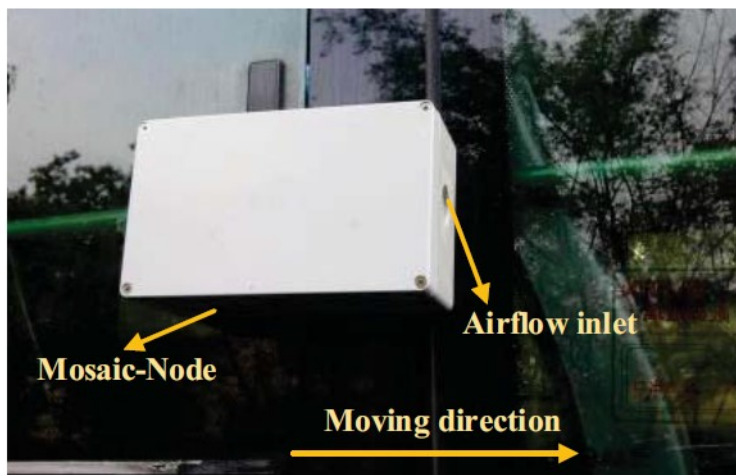
**Mosaic: Κινητό σύστημα ΔΤΠ παρακολούθησης της ποιότητας του αστικού αέρα, χαμηλού κόστους, που συνδυάζει δύο είδη κόμβων αίσθησης για τις μετρήσεις του [146]**

Στο συγκεκριμένο επιστημονικό άρθρο, οι ερευνητές παρουσιάζουν το Mosaic, ένα κινητό σύστημα ανίχνευσης χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας του αστικού αέρα. Το σύστημα απαρτίζεται από δύο είδη κόμβων αίσθησης (sensing nodes), το Dylos και τους κόμβους-Mosaic (Mosaic-Nodes) που έχουν αναπτυχθεί από τους ερευνητές. Ο πρώτος, αποτελεί φορητό αισθητήρα ποιότητας του αέρα με δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{2.5}$ , ενώ ένας κόμβος-Mosaic ενσωματώνει μία σειρά αισθητήρων, όπως τροποποιημένο αισθητήρα  $PM_{2.5}$ , GPS, αισθητήρα υγρασίας και θερμοκρασίας. Καθώς ο αισθητήρας  $PM_{2.5}$ , που βασίζεται στην σκέδαση φωτός, κινείται λόγω της εγκατάστασής του σε λεωφορείο, η σχετική ροή αέρα που δέχεται προκαλεί σημαντικά σφάλματα όσον αφορά την ακρίβεια των μετρήσεών του. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται μία Κατασκευαστική μέθοδος Ροής Αέρα-Διατάραξης (Constructive Airflow-Disturbance method) που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια μετρήσεων των κόμβων σε κινούμενα οχήματα. Τα δεδομένα που παράγουν οι αισθητήρες (raw data) φιλτράρονται βάσει των τιμών ταχύτητας και επιτάχυνσης που παρέχει το GPS. Στη συνέχεια, το σύστημα Mosaic χρησιμοποιεί μία υπάρχουσα μέθοδο τετραγωνικής εξομάλυνσης και ένα μοντέλο τεχνικού νευρωνικού δικτύου τριών επιπέδων, προς περαιτέρω βαθμονόμηση των φιλτραρισμένων δεδομένων. Η εκπαίδευση του μοντέλου τεχνικού νευρωνικού δικτύου τριών επιπέδων, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, και τα δεδομένα ποιότητας αέρα από τον αισθητήρα Dylos. Τέλος, οι ερευνητές προτείνουν έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο επιλογής λεωφορείων προσανατολισμένο βάσει σημείου ενδιαφέροντος (POI - point-of-interest oriented), με σκοπό την καλύτερη συνολική κάλυψη μίας πόλης, συνδυάζοντας χαμηλή υπολογιστική επιβάρυνση.

Έπειτα από μία σειρά περαμάτων, οι ερευνητές ανέλυσαν την απόδοση του συστήματος Mosaic βάσει τριών κριτηρίων αξιολόγησης, της Κατασκευαστικής μεθόδου Ροής Αέρα-Διατάραξης (Constructive Airflow-Disturbance method), του προσανατολισμένου βάσει σημείου ενδιαφέροντος (POI - point-of-interest oriented) αλγορίθμου επιλογής λεωφορείων και της ακρίβειας αποτελεσμάτων. Και τα τρία αυτά κριτήρια αξιολόγησης, έδειξαν πως ο τρόπος υλοποίησης και σχεδίασης του συστήματος, σε σύγκριση με άλλες παρεμφερείς τεχνολογίες και αλγορίθμους, υπερέχει στο κομμάτι της απόδοσης και του συνολικού οικονομικού κόστους υλοποίησης, θέτοντάς το ικανό να καλύψει μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις μίας πόλης, παρακολουθώντας την ποιότητα του αέρα της, και, ταυτοχρόνως, επιτρέποντας πιθανές μελλοντικές εγκαταστάσεις του συστήματος σε ευρεία κλίμακα.



Σχήμα 5.75: Μέθοδος σκέδασης φωτός για τη μέτρηση της συγκέντρωσης σωματιδίων [146]



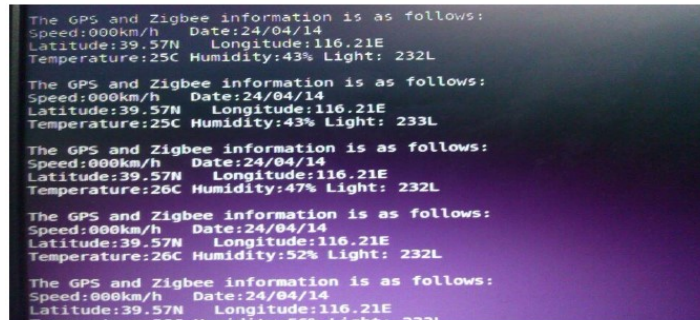
Σχήμα 5.76: Κόμβος-Mosaic εγκατεστημένος σε λεωφορείο (η είσοδος ροής αέρα έχει φορά προς την κατεύθυνση κίνησης του λεωφορείου) [146]

***Ένα λεωφορείο δημόσιας συγκοινωνίας ως μία ενέλικτη κινητή πλατφόρμα ευφυούς αίσθησης του περιβάλλοντος για το ΔτΠ [147]***

Στο συγκεκριμένο επιστημονικό άρθρο, οι ερευνητές υλοποιούν μία συνδυαστική ολοκληρωμένη κινητή πλατφόρμα παρακολούθησης της ποιότητας του περιβάλλοντος και των συνθηκών που επικρατούν σε ένα δρόμο, χρησιμοποιώντας λεωφορεία δημόσιας συγκοινωνίας ως μία κινητή υπηρεσία αισθητήρων λεωφορείων (Mobile Enterprise Sensor Bus – M-ESB). Ο παραπάνω τρόπος σχεδιασμού της πλατφόρμας αποτελεί μία νέα προσέγγιση, αφού συνδυάζει την παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα με την παρακολούθηση της κατάστασης ενός οδικού δικτύου και χρησιμοποιεί μία διεπαφή ανταλλαγής δεδομένων για την τροφοδοσία ενός υπολογιστικού συστήματος δεδομένων cloud. Οι πάροχοι υπηρεσιών των περιβαλλοντικών δεδομένων, για παράδειγμα μία εταιρεία λεωφορείων, θα πληρώνει για την εγκατάσταση και τη συντήρηση των αισθητήρων, λαμβάνοντας ως αντάλλαγμα οικονομικό όφελος, μέσω της πώλησης δεδομένων, με τη χρήση μίας διεπαφής ανταλλαγής δεδομένων σε όποιο επιθυμεί να τα αγοράσει προς περαιτέρω ανάλυσή τους (Δεδομένα ως Υπηρεσία – Data as a Service ή DaaS). Οι πάροχοι μπορούν επίσης να παρέχουν λογισμικό με τη μορφή υπηρεσίας (Software as a Service ή SaaS), ώστε να επιτρέπουν στους τελικούς χρήστες των δεδομένων να χρησιμοποιούν υπηρεσίες επεξεργασίας δεδομένων, οι οποίες μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν από τους ίδιους. επιχειρηματικό μοντέλο των ερευνητών λειτουργεί ως εξής. Η παραπάνω περιγραφή αποτελεί το επιχειρηματικό μοντέλο των ερευνητών. Τα δεδομένα που παράγονται στο δίκτυο συλλογής δεδομένων αποτελούν ένα συνδυασμό δεδομένων χαμηλού ρυθμού bit, όπως δεδομένων θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτός, και GPS, και δεδομένων υψηλού ρυθμού bit, όπως βίντεο εντός και εκτός του λεωφορείου που καταγράφονται με τη χρήση κάμερας. Τα πρώτα μεταδίδονται μέσω του πρωτοκόλλου ZigBee, ενώ τα δεύτερα μεταδίδονται μέσω μίας ασύρματης σύνδεσης, σε κάποιο σημείο πρόσβασης (access point), για παράδειγμα μέσω Wi-Fi. Όταν μία τέτοια σύνδεση δεν είναι εφικτή, τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω ενός δικτύου δεδομένων κινητής τηλεφωνίας (3G/4G) με το αντίστοιχο οικονομικό κόστος. Διαφορετικοί τύποι κόμβων αίσθησης μπορούν να σχηματίσουν ένα δίκτυο Διαδικτύου των Οχημάτων (Internet of Vehicles) με κατανεμημένους υπολογιστικούς και επικοινωνιακούς πόρους για την ανταλλαγή, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων αισθητήρων μέσω μίας πύλης (gateway), καθώς οι πόροι ενός μόνο κόμβου αίσθησης είναι περιορισμένοι. Έτσι η ωφέλιμη πληροφορία που συλλέγεται από διάφορα λεωφορεία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ένα

απομακρυσμένο διακομιστή cloud για χρήση σε πολλαπλές υπηρεσίες εφαρμογών. Στο κέντρο δεδομένων (datacenter) σχεδιάστηκε ένα DBMS. Οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα αισθητήρων του DBMS μέσω μιας διεπαφής κοινής χρήσης δεδομένων, που σχεδιάστηκε βάσει του μοτίβου σχεδιασμού MVC (Model-View-Controller).

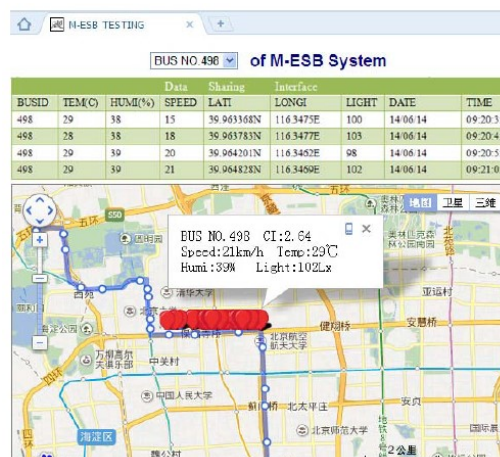
Ορισμένα πειράματα αξιολόγησης εκτελέστηκαν τόσο για τη λειτουργικότητα του υλικού μέρους του δικτύου συλλογής δεδομένων, που βρίσκεται εγκατεστημένο στο κάθε λεωφορείο, όσο και της διεπαφής κοινής χρήσης δεδομένων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα τρία επόμενα σχήματα.



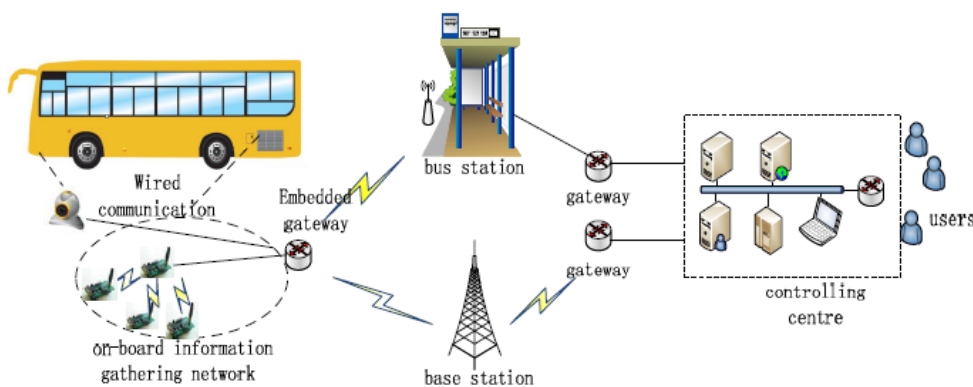
Σχήμα 5.77: Τα μη επεξεργασμένα (raw) δεδομένα στη σειριακή διεπαφή της ενσωματωμένης πύλης [147]



Σχήμα 5.78: Η διαδικτυακή εφαρμογή για την κάμερα [147]



Σχήμα 5.79: Η διεπαφή κοινής χρήσης δεδομένων για τη πιλοτική δοκιμή του συστήματος [147]



Σχήμα 5.80: Συνολική εικόνα του M-ESB [147]



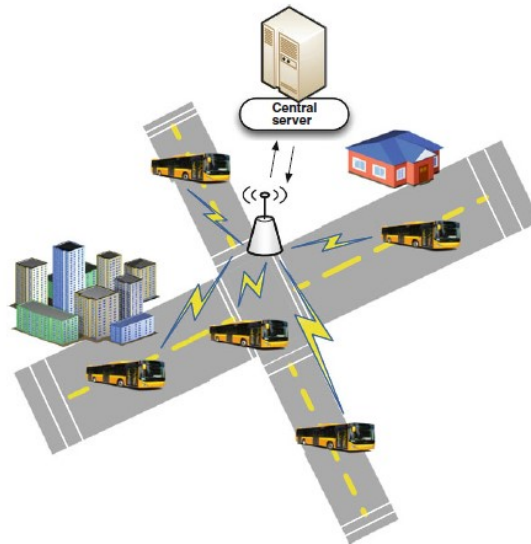
Σχήμα 5.81: Μονάδα ZigBee CC2530 (αριστερά), μονάδα GPS (μέση) και κάμερα (δεξιά) [147]

#### **Παρακολούθηση της ποιότητας του αστικού αέρα με τη χρήση δικτύων αισθητήρων οχημάτων [148]**

Οι Lo Re, Peri και Vassallo, σχεδίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αστικού αέρα, το οποίο κάνει χρήση ενός οικονομικά αποδοτικού και βιώσιμου δικτύου αισθητήρων οχημάτων (Vehicular Sensor Network - VSN). Ένα VSN μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη χωρική κάλυψη και υψηλότερο βαθμό λεπτομέρειας των ανιχνευόμενων χαρακτηριστικών. Σε αντίθεση με την εγκατάσταση στατικών αισθητήρων, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να εγκατασταθούν σε αυτοκίνητα ή οχήματα δημόσιων συγκοινωνιών. Το σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη, τα οποία περιλαμβάνουν τους εγκατεστημένους κόμβους οχημάτων, όπου εμπεριέχονται ένας μικροελεγκτής Arduino Mega 2560, συσκευές επικοινωνίας και αισθητήρες, πύλες (gateways) με σκοπό τη λήψη δεδομένων από κάθε κόμβο, καθώς και την προώθησή τους στον κεντρικό διακομιστή και, τέλος, ένας κεντρικός διακομιστής, στον οποίο πραγματοποιείται η αποθήκευση των συλλεγόμενων δεδομένων, πάντα με γνώμονα τη διασφάλιση της ακεραιότητας, της ασφάλειας και της διαθεσιμότητάς τους. Οι πύλες, που ονομάστηκαν οδικές πλευρικές μονάδες (Road Side Units – RSU), πρακτικά επεκτείνουν το δίκτυο, προωθώντας δεδομένα που προέρχονται από οχήματα, σε κεντρικούς διακομιστές, που μπορεί να εφαρμοστούν σε έναν υπολογιστή χαμηλής κατανάλωσης όπως είναι ένα Raspberry Pi, ή προωθώντας δεδομένα σε άλλα επερχόμενα οχήματα, χρησιμοποιώντας το επικοινωνιακό πρωτόκολλο ZigBee. Το σύστημα αναφέρεται πως είναι ανεκτικό σε καθυστέρηση και βασίζεται στο χρόνο, χωρίς να φέρει καμία περιοριστική υποχρέωση για την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς κάθε όχημα υπακούει σε μία πολιτική διάθεσης και προώθησης, συλλέγοντας δεδομένα αισθητήρων, περιοδικά, σε τακτά χρονικά διαστήματα, εκτελώντας τοπική επεξεργασία, προτού τα αποστείλει στον κεντρικό διακομιστή, χρησιμοποιώντας τις οδικές πλευρικές μονάδες. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος δικτύου διατηρεί δεδομένα στη προσωπική του μνήμη. Η παρακολούθηση

της ποιότητας του αέρα πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, διοξειδίου του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) και όζοντος.

Σε πρωταρχικό επίπεδο, προγραμματίστηκε η ανάπτυξη του VSN, σε ένα όχημα-μέλος του στόλου λεωφορείων δημόσιας συγκοινωνίας του Παλέρμο, και μερικών σημείων πρόσβασης (access points). Η προσέγγιση των ερευνητών προσφέρει τα βασικά πλεονεκτήματα της οικονομίας και της απλότητας υλοποίησης του συστήματος, καθώς οι ίδιοι σημειώνουν πως χρησιμοποιώντας μόνο λίγα οχήματα που ανήκουν σε ένα στόλο δημόσιας συγκοινωνίας, μπορεί να αναπτυχθεί ένα λεπτομερές σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, ικανό να καλύψει όλες τις περιοχές της πόλης του Παλέρμο.



Σχήμα 5.82: Αρχιτεκτονική VSN για την παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα [148]

**Σύστημα αισθητήρων ποδηλάτου για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κοντά σε αυτοκινητόδρομους [149]**

Οι Liu, Li, Jiang, Qi, Xiang και Xu, παρουσιάζουν ένα σύστημα αισθητήρων που εγκαθίσταται σε δημόσια ποδήλατα με σκοπό την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα κοντά σε αυτοκινητόδρομους. Το σύστημα διαθέτει αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (PPD42NS) και καυσαερίων (TGS 2201), όπως μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$  και  $\text{CO}_2$ ), άζωτο ( $\text{N}_2$ ) και οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), καθώς και έναν δέκτη GPS, προκειμένου να αποθηκεύονται πληροφορίες γεωγραφικής θέσης και χρονικής στιγμής κάθε μέτρησης. Τα δεδομένα, στο σύνολό τους, αποθηκεύονται σε μία κάρτα μνήμης τύπου microSD και, στη συνέχεια, μεταφορτώνονται σε ένα σταθμό σύνδεσης, μετά την επιστροφή του ποδηλάτου από τον εκάστοτε χρήστη, μέσω του πρωτοκόλλου Bluetooth.

Οι ερευνητές προχώρησαν σε δύο πειράματα του συστήματος, δοκιμάζοντάς το τόσο σε κλειστό χώρο όσο και κοντά στην απόληξη εξάτμισης ενός αυτοκινήτου στο ρελαντί. Ήταν σαφές ότι η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων ήταν πολύ υψηλότερη κοντά στην απόληξη εξάτμισης από ότι στον εσωτερικό χώρο. Ακόμη, το σύστημα εγκαταστάθηκε σε ένα ποδήλατο για τη δειγματοληψία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του αυτοκινητόδρομου του κέντρου της πόλης Changzhou (Κίνα). Η απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χάρη στη χρήση ενός χάρτη θερμότητας (heat map) της εταιρείας Baidu, ενώ εύλογα αποδείχθηκε πως η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε αυτοκινητόδρομους με έντονη κυκλοφοριακή ροή, ήταν πολύ υψηλότερη από αυτή των αυτοκινητοδρόμων με λιγότερη ροή κυκλοφορίας.



Σχήμα 5.83: Το ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης που χρησιμοποιείται σε κάθε ποδήλατο [149]

***Κόμβος αίσθησης ποδηλάτου για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου NB-IoT [150]***

Οι Shen, Lv, Xu και Liu, παρουσιάζουν μία συσκευή παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία φέρει αισθητήρες αιωρούμενων σωματιδίων, θερμοκρασίας και υγρασίας, κάρτα μνήμης τύπου micro-SD για την αποθήκευση των παραγόμενων δεδομένων μετρήσεων, καθώς και έναν δέκτη GPS για την απόκτηση δεδομένων γεωγραφικής θέσης. Η συσκευή μπορεί να εγκατασταθεί, ως κόμβος αίσθησης (sensor node), σε ένα κοινόχρηστο ποδήλατο που ανήκει σε ένα κινητό δίκτυο αισθητήρων, με σκοπό την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα μίας πόλης της Κίνας. Τα παραπάνω υλικά μέρη, συνδέονται σε έναν μικροελεγκτή Arduino, ενώ μέσω μίας επικοινωνιακής μονάδας NB-IoT, τα δεδομένα τους αποστέλλονται σε έναν διακομιστή cloud προς αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία.

Δεδομένα θερμοκρασίας, υγρασίας και αιωρούμενων σωματιδίων PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>, πέντε γεωγραφικών τοποθεσιών, συλλέγονται κάθε μισή ώρα και παρουσιάζονται σε ένα ξεχωριστό κεφάλαιο του συγκεκριμένου επιστημονικού άρθρου. Παρατηρούμε ότι, σε γενικές γραμμές, οι μετρήσεις ανά μισή ώρα για την κάθε τοποθεσία δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση, πέραν ορισμένων εξαιρέσεων.

## **5.4 Επίλογος**

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, κατόπιν εκτεταμένης έρευνας και σχετικής μελέτης, παρουσιάστηκε μία πληθώρα επιστημονικών ερευνών, υλοποιήσεων και πειραμάτων, παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με χρήση τεχνολογιών ΔτΠ. Το κεφάλαιο χωρίστηκε σε δύο βασικές κατηγορίες εφαρμογών εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, με σκοπό να δοθεί έμφαση στις ομοιότητες και τις σημαντικές διαφορές αρχιτεκτονικών ΔτΠ, σε αυτές τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Εφαρμογές πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου μελετήθηκαν αντιστοίχως, καθώς διαφορετικές ανάγκες και σχεδιασμοί συστημάτων ΔτΠ, απαιτούν πάντα ξεχωριστή αντιμετώπιση και λήψη αποφάσεων. Στις δε εφαρμογές εξωτερικού χώρου, έπειτα από σχετικό διαχωρισμό σε επιμέρους υποκατηγορίες, παρουσιάστηκαν εφαρμογές στατικά εγκατεστημένων συστημάτων, συστημάτων εγκατεστημένων σε οχήματα και μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα, καθώς και συνδυαστικά συστήματα χρήσης πολλαπλών τεχνολογιών και μεθόδων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.

## Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, πραγματοποιήθηκε σχετική μελέτη του φαινομένου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιπτώσεων που αυτή επιφέρει στην υγεία και την ευημερία όλων των έμβιων οργανισμών. Πλήθος χωρών παγκοσμίως, έχοντας αντιληφθεί τη σοβαρότητα της κατάστασης και την ανάγκη έγκαιρης εφαρμογής ουσιαστικών λύσεων, ακολουθεί άλλοτε πιο ελαστικές και άλλοτε αυστηρότερες πολιτικές ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της ρύπανσής του.

Από τον μεγάλο αριθμό εφαρμογών διαδικτύου και εφαρμογών για smartphones που έχουν υλοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για την παρακολούθηση της ποιότητας των ατμοσφαιρικών συνθηκών, συμπεραίνουμε ότι όλο και περισσότεροι άνθρωποι, σε κάθε άκρη του πλανήτη, ευαισθητοποιούνται, επιθυμούν να εκπαιδευτούν και, ταυτόχρονα, να προστατευτούν από τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές στοχεύουν τόσο στην αφύπνιση των πολιτών και στην εκπαίδευσή τους σχετικά με το εν λόγω ζήτημα, όσο και στην έγκαιρη και έγκυρη ενημέρωσή τους. Τα παραπάνω γίνονται πραγματικότητα χάρη στις εύχρηστες δυνατότητες λογισμικού που παρέχονται, ενώ ορισμένες εταιρείες συνδυάζουν τις λύσεις λογισμικού τους με προϊόντα υλικού που επεκτείνουν την ακρίβεια παρακολούθησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, σε επίπεδο εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, μέσω συσκευών παρακολούθησης οικιακής χρήσης και φορητών συσκευών που μπορεί ένας χρήστης να έχει μαζί του ανά πάσα στιγμή. Ορισμένες εφαρμογές ωστόσο, όπως η AirVisual της IQAir [94], προσφέρουν τη δυνατότητα εκτίμησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων χωρίς την απαραίτητη χρήση ειδικής συσκευής, χρησιμοποιώντας επίσημα δεδομένα της εξωτερικής ποιότητας του αέρα που παρέχονται από διεθνείς φορείς, προσπαθώντας να εξομαλύνουν το γεγονός απουσίας μίας εξειδικευμένης συσκευής για τον συγκεκριμένο σκοπό.

Πολύ θετικό είναι το γεγονός ότι στη χώρα μας εταιρείες τεχνολογίας που ασχολούνται με το περιβάλλον, όπως η DRAXIS [97], έχουν προχωρήσει στο σχεδιασμό και την υλοποίηση αξιόπιστων εφαρμογών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε παγκόσμια κλίμακα, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο θέσεις εργασίας και διεθνές όνομα στον χώρο τεχνολογικών λύσεων περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή ENVI4ALL της DRAXIS, προσφέρει υπηρεσίες παρακολούθησης και πρόβλεψης της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας το συνδυασμό δεδομένων 9.000 σταθμών και αισθητήρων, καθώς και δεδομένων ανάδρασης (feedback) χρηστών, παρέχοντας προσωποποιημένες πληροφορίες και συστάσεις για ειδικές ομάδες του πληθυσμού.

Έπειτα από τη σχετική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι οι επιστημονικές υλοποιήσεις ΔτΠ που παρουσιάστηκαν στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, στοχεύουν κατά κύριο λόγο στην έγκαιρη και ακριβή ενημέρωση πολιτών, φορέων και ερευνητών σχετικά με την τρέχουσα ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, λαμβάνοντας πολλές φορές υπόψιν άλλες συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως τη σχετική υγρασία και την θερμοκρασία του. Μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης και τεχνητής νοημοσύνης, χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με τη χρήση ιστορικών δεδομένων μετρήσεων, προκειμένου να καθίσταται εφικτή η πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα για ένα εύλογο χρονικό διάστημα μερικών ημερών.

Κυρίως σε υλοποιήσεις συστημάτων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, διακρίνουμε την ανάγκη παρακολούθησης και αυτοματοποιημένης λήψης αποφάσεων σε πραγματικό

χρόνο, καθώς, στατιστικά, οι άνθρωποι δαπανούμε περίπου το 90% του χρόνου μας σε εσωτερικούς χώρους [109]. Έτσι, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης και πιθανής βελτίωσης της ποιότητας του αέρα με τη χρήση συσκευών καθαρισμού του (air purifiers), εφόσον αυτό χρειαστεί, με άμεσο σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας ζωής μας. Μία εναλλακτική λύση στον τομέα εξαγνισμού του αέρα εσωτερικών χώρων αποτελεί η χρήση ειδικών φυτών, όπως των *Sansevieria Trifasciata* και *Chlorophytum Comosum* [112]. Τα τελευταία, απαιτούν ελάχιστη φροντίδα όσον αφορά τις συνθήκες επιβίωσής τους, το πότισμα ή το λίπασμά τους, προσφέρουν παραγωγή οξυγόνου στο χώρο και μειώνουν ταυτόχρονα τις συγκεντρώσεις επικίνδυνων αέριων ρύπων του περιβάλλοντος.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια, ο μεγάλος όγκος δημιουργίας συστημάτων ΔτΠ για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ποιότητας του αέρα, λειτούργησε ως βασικός παράγοντας μείωσης του κόστους πληθώρας εμπορικών αισθητήρων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Έτσι πολλά συστήματα έχουν καταφέρει με μικρό κόστος μερικών εκατοντάδων ευρώ, να συναγωνίζονται βιομηχανικά συστήματα χιλιάδων ευρώ, σε επίπεδο ακρίβειας των παραγόμενων δεδομένων τους. Με αυτό τον τρόπο, όλο και περισσότεροι άνθρωποι ασχολούνται με το ζωτικής σημασίας πρόβλημα της ποιότητας των ατμοσφαιρικών συνθηκών που αντιμετωπίζουμε παγκοσμίως, προσφέροντας έξυπνες και φθηνές λύσεις εξομάλυνσής του με τη χρήση συστημάτων ΔτΠ.

Ακόμη, όσον αφορά τα τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στη σχετική ερευνητική βιβλιογραφία, τα πρωτόκολλα της οικογένειας LPWAN, όπως τα NB-IoT, LoRa και Sigfox, χρησιμοποιούνται κατά κόρον για εφαρμογές παρακολούθησης της ποιότητας ατμοσφαιρικών συνθηκών εξωτερικών χώρων. Αποτελούν ιδανική λύση για εγκαταστάσεις συστημάτων ΔτΠ σε περιοχές χαμηλής προσβασιμότητας [132], καθώς συνδυάζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλη εμβέλεια εκπομπής σήματος. Καθώς οι πληροφορίες μετρήσεων των σχετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων που παράγονται είναι μικρού μεγέθους, τα παραπάνω πρωτόκολλα δεν παρουσιάζουν κάποιο ζήτημα σχετικά με το ρυθμό αποστολής τους στο cloud. Παραδοσιακά πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi, μπορούν να αντικατασταθούν για παράδειγμα από το πρωτόκολλο ZigBee [111], καθώς το τελευταίο προσφέρει σταθερότητα, εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και αυξημένη ασφάλεια στις εφαρμογές ΔτΠ όπου χρησιμοποιείται.

Η χρήση διαφορετικών εργαλείων λογισμικού ΔτΠ, όπως οι πλατφόρμες ΔτΠ IBM Watson IoT, ThingSpeak και Ubidots, παρέχει χρήσιμα εργαλεία διαχείρισης και επεξεργασίας των παραγόμενων δεδομένων των συστημάτων ΔτΠ στο cloud. Αποτελούν βασικό συστατικό μίας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής συστήματος ΔτΠ και συνεισφέρουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων και ωφέλιμων πληροφοριών πρόβλεψης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα.

Κλάδοι της τεχνητής νοημοσύνης, όπως η MM και τα ΤΝΔ, χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε συστήματα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εξωτερικών και εσωτερικών χώρων, τόσο για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσο και για την βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόβλεψη των διάφορων παραμέτρων ατμοσφαιρικών συνθηκών του περιβάλλοντος. Απροσδόκητες αλλαγές της θερμοκρασίας ή των βροχοπτώσεων, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης, ενώ προτείνεται η περαιτέρω προσεκτική εξέταση και μελέτη των συγκεκριμένων συμβάντων, με σκοπό τη σημαντική βελτίωση των συστημάτων βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της συγκέντρωσης αέριων ρύπων. Τα συμπεράσματα που παράγονται χάρη στα σχετικά μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή δυσάρεστων γεγονότων, όπως πυρκαγιών, με την έγκαιρη ειδοποίηση των αρμόδιων αρχών.

Παρόλο που τόσο τα στατικά εγκατεστημένα συστήματα, όσο και τα συστήματα σε κίνηση παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες μέτρησης και παρακολούθησης των ατμοσφαιρικών συνθηκών, κατά την άποψή

μου τα συστήματα ΔτΠ που συνδυάζουν περισσότερο σύνθετες προσεγγίσεις, τείνουν να είναι πιο αποδοτικά και να διατηρούν την ακρίβεια των μετρούμενων δεδομένων τους. Τα συγκεκριμένα συστήματα συλλέγουν δεδομένα ποιότητας των ατμοσφαιρικών συνθηκών με ποικίλους τρόπους ταυτόχρονα. Είναι περισσότερο αποδοτικά, αφού χάρη σε αυτά μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετική ανάλυση μεγαλύτερου όγκου και ποικιλίας δεδομένων, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, όπου είναι επιθυμητή η πρόβλεψη δεδομένων, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, η κατοχή Μεγάλων Δεδομένων (Big Data) σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα μίας περιοχής, μπορεί να φανεί εξαιρετικά χρήσιμη και απαραίτητη. Φυσικά, η χρήση συνδυαστικών συστημάτων παρακολούθησης, απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, δαπανηρή συντήρηση και συχνές αναβαθμίσεις, έτσι ώστε να διαχειρίζεται το ζήτημα της πολυπλοκότητας που προκύπτει, και να παγώνεται η ασφάλεια και η εγκυρότητα των συλλεγόμενων δεδομένων. Στοιχεία πληθοπορισμού (crowdsourcing) και ανάδρασης (feedback) πολιτών, δεδομένα μετεωρολογικών χώρων, μετρήσεις επίγειων αισθητήρων, συμβατικών οχημάτων και drones, αποτελούν τις βασικές πηγές δεδομένων των συγκεκριμένων συστημάτων.

Τέλος, στην περίπτωση όπου δεν ενδιαφερόμαστε για την απόκτηση δεδομένων ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, αξίζει να αναφερθούμε στην ιδέα μετάδοσης των εν λόγω δεδομένων στο cloud, εξ ολοκλήρου χάρη στη συνεισφορά των πολιτών. Στατικά εγκατεστημένοι κόμβοι αίσθησης (sensing nodes) αποκτούν, περιοδικά, μετρήσεις διάφορων ρύπων με τη χρήση αισθητήρων και τις αποθηκεύουν τοπικά. Οι χρήστες κατεβάζουν τα δεδομένα στα smartphones τους μέσω του πρωτοκόλλου Bluetooth και στη συνέχεια τα προωθούν στον κεντρικό διακομιστή του συστήματος, χρησιμοποιώντας την προσωπική τους σύνδεση στο διαδίκτυο [142]. Η παραπάνω ιδέα, θα μπορούσε να λειτουργήσει με τη χρήση παιχνιδιοποίησης (gamification) και τη χρήση μίας σχετικής mobile εφαρμογής, προκειμένου ο χρήστης να έχει κάποιο έναυσμα συμμετοχής. Με έμπρακτο, λοιπόν, τρόπο ο χρήστης θα νιώθει ότι συνεισφέρει στη διαφύλαξη της ποιότητας του περιβάλλοντος, θα ενημερώνεται και θα ευαισθητοποιείται σχετικά με αυτό. Η χρήση gamification συνδυαστικά με μία μορφή επιβράβευσης, μπορεί να διασφαλίσει την μακροπρόθεσμη παραμονή του χρήστη στο εθελοντικό πρόγραμμα του συστήματος.

### 6.2 Μελλοντικές προτάσεις

Μελλοντικά, θα μπορούσε να υλοποιηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, που θα συνδυάζει τη στατική εγκατάσταση κόμβων αίσθησης χαμηλού κόστους με τη χρήση drone για την εναέρια μέτρηση συγκέντρωσης των αέριων ρύπων στον κάθετο άξονα. Το σύστημα θα παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματά του στους τελικούς χρήστες, μέσω μίας εφαρμογής smartphone ή μίας διαδικτυακής εφαρμογής. Η δημιουργία των παραπάνω εφαρμογών, μπορεί να υλοποιηθεί με το εργαλείο ανάπτυξης λογισμικού διεπαφής χρήστη Flutter της Google και τη γλώσσα προγραμματισμού Dart, προσφέροντας άμεση ενσωμάτωσή τους σε διαπλατφορμικό (cross-platform) επίπεδο, μειώνοντας το χρόνο και το έργο υλοποίησης αισθητά. Η εφαρμογή θα παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας προφίλ γονέα ή επιβλέποντα και προφίλ ατόμων που χρήζουν επιτήρησης (ηλικιωμένοι, ανήλικοι, άτομα με χρόνιες σοβαρές παθήσεις κλπ.). Στην περίπτωση που τα άτομα της δεύτερης κατηγορίας έρθουν σε κίνδυνο, όπως εκδήλωση πυρκαγιάς ή απότομης αύξησης της ρύπανσης του αέρα στην τοποθεσία που βρίσκονται, τα άτομα που έχουν οριστεί ως επιβλέποντες θα ειδοποιούνται άμεσα, προκειμένου να δράσουν καταλλήλως.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. Wu, T. Liu, S. Ling, J. Szymanski, W. Zhang, and S. Su, “Air Quality Monitoring for Vulnerable Groups in Residential Environments Using a Multiple Hazard Gas Detector,” *Sensors*, vol. 19, no. 2, p. 362, Jan. 2019.
- [2] D. Melas, “Ατμοσφαιρική Διάχυση και Διασπορά: Ατμοσφαιρικοί Ρύποι και Κλίμακες Διασποράς”, *Aristotle University of Thessaloniki – Department of Physics*, 2007. [Online]. Available: <http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/simeiwseis/chapter2.pdf>.
- [3] World Health Organisation, “Ambient (outdoor) air pollution,” *World Health Organisation*, 2018. [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [4] World Health Organisation, “Air Pollution,” *World Health Organisation*, 2020. [Online]. Available: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>.
- [5] World Health Organisation, “Health Impacts of Air Pollution,” *World Health Organisation*, 2020. [Online]. Available: <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>.
- [6] World Health Organisation, “Air Pollution Infographic,” *World Health Organisation*, 2020. [Online]. Available: <https://www.who.int/airpollution/infographics/en/>.
- [7] National Geographic, “Air Pollution,” *National Geographic*, 2020. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/air-pollution/>.
- [8] L. Mishra, Vikash, and S. Varma, "Measurement of Air Quality Index using Internet of Things," In Proc. 2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), ALIGARH, India, 2019, pp. 1-5.
- [9] F. Gao, “Evaluation of the Chinese New Air Quality Index (GB3095-2012) : Based on Comparison with the US AQI System and the WHO AQGs,” *Novia University of Applied Sciences*, 2013. [Thesis]. Available: <https://www.theseus.fi/handle/10024/65044>.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Assessment Division Research Triangle Park, NC: “Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI),” *U.S. Environmental Protection Agency*, 2018. [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/airnow/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>.
- [11] UNEP - UN Environment Programme, “Air Quality Policies in China,” *UN Environment Programme*, 2015. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17167/China.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [12] UNEP - UN Environment Programme, “Air Quality Policies in Germany,” *UN Environment Programme*, 2015. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17201/Germany.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [13] K. Kuklinska, L. Wolska, and J. Namiesnik, “Air quality policy in the U.S. and the EU – a review”, *Atmospheric Pollution Research*, vol. 6, no. 1, pp. 129-137, 2015.

- [14] Environmental Protection UK, “National Air Quality Law and Policy,” *Environmental Protection UK*, 2020. [Online]. Available: <https://www.environmental-protection.org.uk/policy-areas/air-quality/air-pollution-law-and-policy/air-pollution-laws/>.
- [15] U.S. Environmental Protection Agency, “Pollution Prevention Law and Policies,” *U.S. Environmental Protection Agency*, 2019. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/p2/pollution-prevention-law-and-policies>.
- [16] University of Southern California Environmental Health Centers, “Most effective air quality policies: a study of the past 20 years,” *University of Southern California Environmental Health Centers*, 2015. [Online]. Available: <https://envhealthcenters.usc.edu/2015/04/most-effective-air-quality-policies-a-study-of-the-past-20-years.html>.
- [17] European Commission, “Clean Air,” *European Commission*, 2020. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/environment/air/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm).
- [18] European Commission, “Clean Air Programme,” *European Commission*, 2020. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/environment/air/clean\\_air/index.htm](https://ec.europa.eu/environment/air/clean_air/index.htm).
- [19] European Commission, “Environment Action Programme to 2020,” *European Commission*, 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/action-programme/>.
- [20] UNEP - UN Environment Programme, “Air Quality Policies in Greece,” *UN Environment Programme*, 2015. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17204/Greece.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [21] Greek Ministry of Environment and Energy, “Ποιότητα Ατμόσφαιρας,” *Greek Ministry of Environment and Energy*, 2020. [Online]. Available: <http://www.ypeka.gr/el-gr/Περιβάλλον/Ποιότητα-της-Ατμόσφαιρας>.
- [22] Greek Ministry of Environment and Energy, “Πράσινος Δακτύλιος,” *Greek Ministry of Environment and Energy*, 2020. [Online]. Available: <http://www.ypeka.gr/el-gr/Περιβάλλον/Ποιότητα-της-Ατμόσφαιρας/Πράσινος-Δακτύλιος>.
- [23] O. Vermesan, P. Friess, P. Guillemin, H. Sundmaeker, M. Eisenhauer, K. Moessner, M. Arndt, M. Spirito, P. Medagliani, R. Giaffreda, S. Gusmeroli, L. Ladid, M. Serrano, M. Hauswirth, G. Baldini, “Internet of Things Strategic Research and Innovation Agenda,” in *Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment*, O. Vermesan, P. Friess, Eds. Gistrup, Denmark: River Publishers, 2014, ch. 3 pp. 7-142.
- [24] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, Sep. 2013.
- [25] Statista, “Prognosis of worldwide spending on the Internet of Things (IoT) from 2018 to 2023,” *Statista*, 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/668996/worldwide-expenditures-for-the-internet-of-things/>.
- [26] I. Lee, and K. Lee, “The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises,” *Business Horizons*, vol. 58, no. 4, pp. 431-440, Jul. 2015.
- [27] J. Maneri, “How RFID Technology Can Benefit Your Brand,” *Boundless*, 2019. [Online]. Available: <https://www.boundlessnetwork.com/rfid-technology/>.

- [28] S. Khairunniza-Bejo, N. Ramli, and F. M. Muharam, "Wireless Sensor Network (WSN) Applications in Plantation Canopy Areas: A Review," *Science Alert*, 2018. [Online]. Available: <https://scialert.net/fulltext/?doi=ajsr.2018.151.161>.
- [29] S. Svorobej, P. Takako Endo, M. Bendeche, C. Filelis-Papadopoulos, K. Giannoutakis, G. Gravvanis, D. Tzovaras, J. Byrne, and T. Lynn, "Simulating Fog and Edge Computing Scenarios: An Overview and Research Challenges," *Future Internet*, vol. 11, no. 3, p. 55, Feb. 2019.
- [30] D-Link, "What is Ad-hoc mode?," *D-Link*, 2018. [Online]. Available: <https://eu.dlink.com/gr/el/support/faq/access-points-and-range-extendors/what-is-ad-hoc-mode>.
- [31] J. Lee, Y. Su and C. Shen, "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," In Proc. IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, 2007, pp. 46-51.
- [32] E. Au, M. Cheong, C. Ngo, C. Cordeiro and W. Zhuang, "The future of Wi-Fi [Guest Editorial]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 20-21, Nov. 2014.
- [33] Wikimedia Commons, "File:WiFi Logo.svg," *Wikimedia Commons*, 2020. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WiFi\\_Logo.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WiFi_Logo.svg).
- [34] S. Zeadally, F. Siddiqui, and Z. Baig, "25 Years of Bluetooth Technology," *Future Internet*, vol. 11, no. 9, p. 194, Sep. 2019.
- [35] S. Zacharias, and T. Newe, *Technologies and Architectures for Multimedia-Support in Wireless Sensor Network*. Limerick, Ireland: IntechOpen, 2010.
- [36] ECSTUFF4U, "Zigbee Topology," *ECSTUFF4U*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ecstuff4u.com/2018/03/zigbee-topology.html>.
- [37] S. K. Timalisina, R. Bhusal and S. Moh, "NFC and its application to mobile payment: Overview and comparison," In Proc. 2012 8th International Conference on Information Science and Digital Content Technology (ICIDT2012), Jeju, 2012, pp. 203-206.
- [38] Libramation, "Near Field Communication," *Libramation*. [Online]. Available: <https://www.libramation.com/Pages/LibNews.htm>.
- [39] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," In Proc. 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 2018, pp. 284-290.
- [40] Semtech, "What is LoRa?," *Semtech*, 2020. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [41] Semtech, "Why LoRa?," *Semtech*, 2020. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/lora/why-lora>.
- [42] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao and K. Hwang, "Narrow Band Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20557-20577, 2017.
- [43] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT," In Proc. 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Athens, 2018, pp. 197-202.

- [44] Sigfox, "Our Story," *Sigfox*, 2020. [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story>.
- [45] Avnet, "Sigfox is the world's leading provider of connectivity for the Internet of Things (IoT)," *Avnet*, 2020. [Online]. Available: <https://www.avnet.com/wps/portal/apac/resources/article/sigfox-is-the-worlds-leading-provider-of-connectivity-for-the-internet-of-things/>.
- [46] A. U. Gawas, "An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 3, no. 5, pp. 3130-3133, May 2015.
- [47] K. Karthik, and S Kuracha, "Security in wireless cellular networks," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, vol. 4, no. 4, pp. 190-197, Apr. 2015.
- [48] M. B. Yassein, M. Q. Shatnawi, S. Aljwarneh, and R. Al-Hatmi, "Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol," In Proc. 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Monastir, 2017, pp. 1-6.
- [49] M. B. Yaakop, I. A. Abd Malik, Z. bin Suboh, A. F. Ramli, and M. A. Abu, "Bluetooth 5.0 throughput comparison for internet of thing usability a survey," In Proc. 2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T), Kuala Lumpur, 2017, pp. 1-6.
- [50] Bluetooth, "Bluetooth Mesh Security Overview," *Bluetooth*, 2020. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-mesh-security-overview/>.
- [51] Sigfox, "Make things come alive in a secure way," *Sigfox*, 2017. [Online]. Available: [https://www.sigfox.com/sites/default/files/1701-SIGFOX-White\\_Paper\\_Security.pdf](https://www.sigfox.com/sites/default/files/1701-SIGFOX-White_Paper_Security.pdf).
- [52] D. Nelson, M. Qiao, and A. Carpenter, "Security of the near field communication protocol: an overview," *Journal of Computing Sciences in Colleges*, vol. 29, no. 2, pp. 94-104, Dec. 2013.
- [53] N. Rabia, S. Ali, & A. Ali, A. Sajid, and A. Zafar, "A SECURITY REVIEW OVER WI-FI AND LI-FI," *Information Management and Computer Science (IMCS)*, vol. 3, no. 1. pp. 1-9, Jan. 2020.
- [54] Components101, "MQ-135 - Gas Sensor for Air Quality," *Components101*, 2018. [Online]. Available: <https://components101.com/sensors/mq135-gas-sensor-for-air-quality>.
- [55] M. Jacob Rodrigues, O. Postolache, and F. Cercas, "Indoor Air Quality Monitoring System to Prevent the Triggering of Respiratory Distress," In Proc. 2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI), Lisbon, Portugal, 2019, pp. 1-6.
- [56] Components101, "MQ2 Gas Sensor," *Components101*, 2018. [Online]. Available: <https://components101.com/mq2-gas-sensor>.
- [57] M. M. Ahmed, S. Banu, and B. Paul, "Real-time air quality monitoring system for Bangladesh's perspective based on Internet of Things," In Proc. 2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, 2017, pp. 1-5.
- [58] Components101, "MQ-3 Alcohol Gas Sensor," *Components101*, 2018. [Online]. Available: <https://components101.com/sensors/mq-3-alcohol-gas-sensor>.
- [59] Components101, "DHT22 - Temperature and Humidity Sensor," *Components101*, 2018. [Online]. Available: <https://components101.com/sensors/dht22-pinout-specs-datasheet>.

- [60] S. Chanthakit, and C. Rattanapoka, "MQTT Based Air Quality Monitoring System using Node MCU and Node-RED," In Proc. 2018 Seventh ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC), Nakhonpathom, 2018, pp. 1-5.
- [61] PLANTOWER, "Digital universal particle concentration sensor," PMS5003 series data manual, 2016.
- [62] L. Chen, H. Huang, C. Wu, Y. Tsai, and Y. Chang, "A LoRa-Based Air Quality Monitor on Unmanned Aerial Vehicle for Smart City," In Proc. 2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), New Taipei, 2018, pp. 1-5.
- [63] L. Zhao, W. Wu, and S. Li, "Design and Implementation of an IoT-Based Indoor Air Quality Detector With Multiple Communication Interfaces," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 9621-9632, Dec. 2019.
- [64] ProSense Technologies, "Dart Sensors WZ-S-K formaldehyde module," *ProSense Technologies*. [Online]. Available: [http://www.szprosense.com/en/product\\_show.php?id=91#h3](http://www.szprosense.com/en/product_show.php?id=91#h3).
- [65] Zhengzhou Winsen Electronics, "Ozone Gas Sensor - Model: MQ131 Low Concentration," MQ131 manual, May 2014.
- [66] Henan Hanwei Electronics, "MQ-4 Semiconductor Sensor for Natural Gas," MQ-4 datasheet.
- [67] Components101, "MQ-4 Methane Gas Sensor," *Components101*, 2018. [Online]. Available: <https://components101.com/sensors/mq-4-methane-gas-sensor-pinout-datasheet>.
- [68] Arduino, "Introduction," *Arduino*, 2020. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>.
- [69] Arduino, "ARDUINO UNO REV3," *Arduino*, 2020. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
- [70] Raspberry Pi, "What is a Raspberry Pi?," *Raspberry Pi*, 2020. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/help/what-%20is-a-raspberry-pi/>.
- [71] Raspberry Pi, "Raspberry Pi 4," *Raspberry Pi*, 2020. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
- [72] Espressif, "ESP8266: A cost-effective and highly integrated Wi-Fi MCU for IoT applications," *Espressif*, 2019. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>.
- [73] Rare Components, "ESP8266 - ESP8266EX - Serial Interface Wi-Fi Module - ESP-01," *Rare Components*, 2020. [Online]. Available: <https://rarecomponents.com/store/1472>.
- [74] Amazon, "AWS IoT," *Amazon*, 2020. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/iot/>.
- [75] J. Sanchez, "Improved AWS IoT Management Console," *The Internet of Things on AWS - Official Blog*, 2016. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/blogs/iot/improved-aws-iot-management-console/>.
- [76] Google, "Google Cloud IoT," *Google*, 2020. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/solutions/iot>.
- [77] Google, "Firebase & Google Cloud Platform," *Google*, 2020. [Online]. Available: <https://firebase.google.com/firebase-and-gcp>.

- [78] A. Viebrantz, "Build a Weather Station using Google Cloud IoT Core and MongooseOS," *Medium*, 2017. [Online]. Available: <https://medium.com/google-cloud/build-a-weather-station-using-google-cloud-iot-core-and-mongooseos-7a78b69822c5>.
- [79] IBM, "IBM Watson IoT Platform," *IBM*, 2020. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/internet-of-things-cloud>.
- [80] S. Kansal, "Build your IoT skills by developing a door monitoring system," *IBM Developer*, 2020. [Online]. Available: <https://developer.ibm.com/tutorials/iot-lp201-build-door-monitoring-system>.
- [81] Ubidots, "Ubidots Main Page," *Ubidots*, 2020. [Online]. Available: <https://ubidots.com>.
- [82] Ubidots, "What is the difference between Ubidots and Ubidots STEM?," *Ubidots*, 2020. [Online]. Available: <https://help.ubidots.com/en/articles/639806-what-is-the-difference-between-ubidots-and-ubidots-stem>.
- [83] ThingSpeak, "Learn More About ThingSpeak," *ThingSpeak*, 2020. [Online]. Available: [https://thingspeak.com/pages/learn\\_more](https://thingspeak.com/pages/learn_more).
- [84] M. Hussain, S. Aleem, A. Karim, F. Ghazanfar, M. Hai and K. Hussain, "Design of Low Cost, Energy Efficient, IoT Enabled, Air Quality Monitoring System with Cloud Based Data Logging, Analytics and AI," In Proc. 2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST), Karachi, Pakistan, 2020, pp. 1-6.
- [85] A. Georgouli, "ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Μηχανική Μάθηση," *Τεχνητή νοημοσύνη*, 2015. [Book Chapter]. [Available]: [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3382/1/02\\_chapter\\_04.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3382/1/02_chapter_04.pdf).
- [86] V. R. Pasupuleti, Uhasri, P. Kalyan, Srikanth, and H. K. Reddy, "Air Quality Prediction Of Data Log By Machine Learning," In Proc. 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2020, pp. 1395-1399.
- [87] T. Rymarczyk, T. Cieplak, G. Kłosowski, and E. Kozłowski, "Monitoring the natural environment with the use of IoT based system," In Proc. 2019 Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine (PTZE), Janow Podlaski, Poland, 2019, pp. 151-155.
- [88] N. Liou, C. Luo, S. Mahajan, and L. Chen, "Why is Short-Time PM2.5 Forecast Difficult? The Effects of Sudden Events," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12662-12674, Jan. 2020.
- [89] M. Y. Thu, W. Htun, Y. L. Aung, P. E. E. Shwe, and N. M. Tun, "Smart Air Quality Monitoring System with LoRaWAN," In Proc. 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS), Bali, 2018, pp. 10-15.
- [90] X. Lai, T. Yang, Z. Wang, and P. Chen, "IoT Implementation of Kalman Filter to Improve Accuracy of Air Quality Monitoring and Prediction," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 9, p. 1831, May 2019.
- [91] K. Rastogi, D. Lohani, and D. Acharya, "An IoT-based System to Evaluate Indoor Air Pollutants Using Grey Relational Analysis," In Proc. 2020 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS), Bengaluru, India, 2020, pp. 762-767.
- [92] E. Alexandrova and A. Ahmadinia, "Real-Time Intelligent Air Quality Evaluation on a Resource-Constrained Embedded Platform," In Proc. 2018 IEEE 4th International Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS), Omaha, NE, 2018, pp. 165-170.

- [93] IQAir, "Our History," *IQAir*, 2020. [Online]. Available: <https://www.iqair.com/about-iqair/our-history>.
- [94] Google Play, "Air Quality | AirVisual," *Google Play*, 2020. [Android Application]. Available: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.airvisual&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.airvisual&hl=en_US).
- [95] IQAir, "AirVisual Pro," *IQAir*, 2020. [Online]. Available: <https://www.iqair.com/air-quality-monitors/airvisual-pro>.
- [96] Google Play, "Sh\*\*t! I Smoke," *Google Play*, 2020. [Android Application]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.shitismoke.app>.
- [97] ENVI4ALL, "Envi4All Main Page," *ENVI4ALL*, 2019. [Online]. Available: <http://envi4all.eu>.
- [98] Google Play, "Envi4All," *Google Play*, 2020. [Android Application]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=gr.draxis.envi4all>.
- [99] Plume Labs, "Plume Labs Main Page," *Plume Labs*, 2020. [Online]. Available: <https://plumelabs.com>.
- [100] Google Play, "Plume Labs: Air Quality App," *Google Play*, 2020. [Android Application]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.plumelabs.air>.
- [101] G. Healey "Flow 2 by Plume Labs Portable Air Pollution Sensor straps to virtually anything to measure air quality anywhere," *Gadget Flow*, 2020. [Online]. Available: <https://thegadgetflow.com/portfolio/flow-2-by-plume-labs/>.
- [102] BreezoMeter, "BreezoMeter Main Page," *BreezoMeter*, 2020. [Online]. Available: <https://breezometer.com>.
- [103] Google Play, "Air Quality Index, Pollen & Fires - BreezoMeter," *Google Play*, 2020. [Android Application]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=app.breezometer>.
- [104] S. Friedman, "BreezoMeter's Global Air Quality Index: Real-time & Micro-Local (BAQI)," *BreezoBuzz*, 2018. [Online]. Available: <https://blog.breezometer.com/breezometers-air-quality-index>.
- [105] J. Esquiagola, M. Manini, A. Aikawa, L. Yoshioka, and M. Zuffo, "Monitoring Indoor Air Quality by using IoT Technology," In Proc. 2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Lima, 2018, pp. 1-4.
- [106] G. Chiesa, S. Cesari, M. Garcia, M. Issa, and S. Li, "Multisensor IoT Platform for Optimising IAQ Levels in Buildings through a Smart Ventilation System," *Sustainability*, vol. 11, no. 20, p. 5777, Oct. 2019.
- [107] T. Mai, "Technology Readiness Level," *NASA*, 2017. [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt\\_accordion1.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html).
- [108] D. Lohani, and D. Acharya, "SmartVent: A Context Aware IoT System to Measure Indoor Air Quality and Ventilation Rate," In Proc. 2016 17th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), Porto, 2016, pp. 64-69.
- [109] F. Pradityo, and N. Surantha, "Indoor Air Quality Monitoring and Controlling System based on IoT and Fuzzy Logic," In Proc. 2019 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICOICT), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-6.

- [110] G. Marques, C. Roque Ferreira, and R. Pitarma, "A System Based on the Internet of Things for Real-Time Particle Monitoring in Buildings," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 4, p. 821, Apr. 2018.
- [111] D. Wang, C. Jiang, and Y. Dan, "Design of air quality monitoring system based on Internet of Things," In Proc. 2016 10th International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications (SKIMA), Chengdu, 2016, pp. 418-423.
- [112] S. Shitole, D. Nair, N. Pandey, and H. Suhagiya, "Internet of Things Based Indoor Air Quality Improving System," In Proc. 2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, 2018, pp. 1-4.
- [113] M. Medina-De-La-Cruz, A. Mujaico-Mariano, and M. M. Soto-Cordova, "Implementation of an evaluation system to measure air quality on public transport routes using the Internet of Things," In Proc. 2018 Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI), Buenos Aires, 2018, pp. 1-4.
- [114] O. O. Flores-Cortez, R. Adalberto Cortez, and V. I. Rosa, "A Low-cost IoT System for Environmental Pollution Monitoring in Developing Countries," In Proc. 2019 MIXDES - 26th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems", Rzeszów, Poland, 2019, pp. 386-389.
- [115] A. Tapashetti, D. Vegiraju and T. Ogunfunmi, "IoT-enabled air quality monitoring device: A low cost smart health solution," In Proc. 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), Seattle, WA, 2016, pp. 682-685.
- [116] S. Liu, C. Xia, and Z. Zhao, "A low-power real-time air quality monitoring system using LPWAN based on LoRa," In Proc. 2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), Hangzhou, 2016, pp. 379-381.
- [117] W. Song, J. Han, J. Xie, Y. Gao, and L. Song, "System for Detecting and Forecasting PM2.5 Concentration Levels Using Long Short-Term Memory and LoRa," In Proc. 2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 834-841.
- [118] S. R. Niya, S. S. Jha, T. Bocek, and B. Stiller, "Design and implementation of an automated and decentralized pollution monitoring system with blockchains, smart contracts, and LoRaWAN," In Proc. NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Taipei, 2018, pp. 1-4.
- [119] Y. Feng, H. Junyi, A. WeiPeng, C. Flanagan, C. MacNamee, and S. McGrath, "API Monitor based on Internet of Things technology," In Proc. 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), Limerick, 2018, pp. 213-216.
- [120] V. Choudhary, J. H. Teh, V. Beltran, and H. B. Lim, "AirQ: A Smart IoT Platform for Air Quality Monitoring," In Proc. 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-2.
- [121] S. R. Enigella, and H. Shahnasser, "Real Time Air Quality Monitoring," In Proc. 2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Chiang Mai, 2018, pp. 182-185.

- [122] R. Rushikesh, and C. M. R. Sivappagari, "Development of IoT based vehicular pollution monitoring system," In Proc. 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Noida, 2015, pp. 779-783.
- [123] S. Kumar, and A. Jasuja, "Air quality monitoring system based on IoT using Raspberry Pi," In Proc. 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, 2017, pp. 1341-1346.
- [124] S. Dhingra, R. B. Madda, A. H. Gandomi, R. Patan, and M. Daneshmand, "Internet of Things Mobile–Air Pollution Monitoring System (IoT-Mobair)," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5577-5584, Jun. 2019
- [125] K. Zheng, S. Zhao, Z. Yang, X. Xiong, and W. Xiang, "Design and Implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3238-3245, Jul. 2016.
- [126] S. Duangsuwan, A. Takarn, R. Nujankaew and, P. Jamjareegulgarn, "A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0," In Proc. 2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Chiang Mai, 2018, pp. 206-209.
- [127] D. Saha, M. Shinde, and S. Thadeshwar, "IoT based Air Quality Monitoring System using Wireless Sensors deployed in Public Bus Services," In Proc. ICC '17: Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing, 2017, pp. 1-6.
- [128] S. Kaivonen, and E. C.-H. Ngai, "Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus," *Digital Communications and Networks*, vol. 6, no. 1, pp. 23-30, Feb. 2020.
- [129] A. Barthwal, and D. Acharya, "An Internet of Things System for Sensing, Analysis & Forecasting Urban Air Quality," In Proc. 2018 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, 2018, pp. 1-6.
- [130] J.-I. Hernández-Vega, E.R. Varela, N.H. Romero, C. Hernández-Santos, J.L.S. Cuevas, and D.G.P. Gorham, "Internet of Things (IoT) for Monitoring Air Pollutants with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in a Smart City," In Proc. Smart Technology, 2018, pp. 108-120.
- [131] Q. Gu, and C. Jia, "A Consumer UAV-based Air Quality Monitoring System for Smart Cities," In Proc. 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 1-6.
- [132] S. Duangsuwan, and P. Jamjareegulgarn, "Development of Drone Real-time Air Pollution Monitoring for Mobile Smart Sensing in Areas with Poor Accessibility," *Sensors and Materials*, vol. 32, no. 2, pp. 511-520.
- [133] S. Devarakonda, P. Sevusu, H. Liu, R. Liu, L. Iftode, and B. Nath, "Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas," In Proc. 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing '13, 2013, pp. 1-8.
- [134] C.-L. Hsieh, Z.-W. Ye, C.-K. Huang, Y.-C. Lee, C.-H. Sun, T.-H. Wen, J.-Y. Juang, and J.-A. Jiang, "A Vehicle Monitoring System Based on the LoRa Technique," *World Academy of Science*,

Engineering and Technology International Journal of Transport and Vehicle Engineering, vol. 11, no. 5, pp. 1100-1106, Apr. 2017.

[135] L. Angrisani et al., "An Innovative Air Quality Monitoring System based on Drone and IoT Enabling Technologies," In Proc. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), Portici, Italy, 2019, pp. 207-211.

[136] Y. Shirai, Y. Kishino, F. Naya, and Y. Yanagisawa, "Toward On-Demand Urban Air Quality Monitoring using Public Vehicles," In Proc. 2nd International Workshop on Smart Cities '16, 2016, pp. 1-6.

[137] M. Chen, J. Yang, L. Hu, M. S. Hossain, and G. Muhammad, "Urban Healthcare Big Data System Based on Crowdsourced and Cloud-Based Air Quality Indicators," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 11, pp. 14-20, Nov. 2018.

[138] Z. Hu, Z. Bai, Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, and L. Song, "UAV Aided Aerial-Ground IoT for Air Quality Sensing in Smart City: Architecture, Technologies, and Implementation," *IEEE Network*, vol. 33, no. 2, pp. 14-22, Mar./Apr. 2019.

[139] S. Sendra, J. L. Garcia-Navas, P. Romero-Diaz, and J. Lloret, "Collaborative LoRa-Based Sensor Network for Pollution Monitoring in Smart Cities," In Proc. 2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), Rome, Italy, 2019, pp. 318-323.

[140] H. Aamer, R. Mumtaz, H. Anwar, and S. Poslad, "A Very Low Cost, Open, Wireless, Internet of Things (IoT) Air Quality Monitoring Platform," In Proc. 2018 15th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT), Islamabad, 2018, pp. 102-106.

[141] T. C. Jermin Jeanita, V. Sarasvathi, and Saritha, "Internet of Things based Low-Cost Air Quality Surveillance," In Proc. 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 2019, pp. 26-30.

[142] D. Mendez, S. Diaz, and R. Kraemer, "Wireless technologies for pollution monitoring in large cities and rural areas," In Proc. 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, 2016, pp. 1-6.

[143] J. Park, Y. Oh, H. Byun, and C. Kim, "Low Cost Fine-Grained Air Quality Monitoring System Using LoRaWAN," In Proc. 2019 International Conference on Information Networking (ICOIN), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 439-441.

[144] G. Suci, M. Balanescu, C. Nadrag, A. Birdici, C. M. Balaceanu, M. A. Dobrea, A. Pasat, and R.-I. Ciobanu, "IoT System for Air Pollutants Assessment in Underground Infrastructures," In Proc. 6th Conference on the Engineering of Computer Based Systems '19, 2019, pp. 1-7.

[145] P. H. Cruz Caminha et al., "SensingBus: Using Bus Lines and Fog Computing for Smart Sensing the City," *IEEE Cloud Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 58-69.

[146] Y. Gao et al., "Mosaic: A low-cost mobile sensing system for urban air quality monitoring," In Proc. IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, San Francisco, CA, 2016, pp. 1-9.

- [147] L. Kang, S. Poslad, W. Wang, X. Li, Y. Zhang and C. Wang, "A Public Transport Bus as a Flexible Mobile Smart Environment Sensing Platform for IoT," In Proc. 2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE), London, 2016, pp. 1-8.
- [148] G. Lo Re, D. Peri, and S. D. Vassallo, "Urban Air Quality Monitoring Using Vehicular Sensor Networks," in Advances onto the Internet of Things, vol. 260, Springer, Cham, 2014, pp. 311-323.
- [149] X. Liu, B. Li, A. Jiang, S. Qi, C. Xiang and N. Xu, "A bicycle-borne sensor for monitoring air pollution near roadways," In Proc. 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, Taipei, 2015, pp. 166-167.
- [150] S. Shen, C. Lv, X. Xu, and X. Liu, "A Bicycle-Borne Sensor Node for Monitoring Air Pollution Based on NB-IoT," In Proc. Machine Learning and Intelligent Communications MLICOM '19, 2019, pp. 325-332.